

**PROPUESTA DE PRODUCCIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE RESIDUOS DE
ASERRADEROS COMO ESTRATEGIA DE CAPTURA DE CO₂ Y GESTIÓN SOSTENIBLE
DE RESIDUOS EN TOCANCIPÁ, CUNDINAMARCA.**

AUTORA

LUZ ADRIANA MOLINA RODRÍGUEZ

DIRECTORA

ING. YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

OPCIÓN DE GRADO COTERMINAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE CENCIAS AMBIENTALES

BOGOTÁ, COLOMBIA

2026

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	10
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3	OBJETIVOS.....	15
3.1	Objetivo general.....	15
3.2	Objetivos específicos	15
4	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	16
4.1	Relevancia del estudio.....	16
5	ANTECEDENTES.....	17
6	CONTEXTO TERRITORIAL Y NORMATIVO	19
6.1	Sistema territorial del proyecto.....	19
6.2	Contexto territorial del municipio de Tocancipá.....	21
6.2.1	Localización y características geográficas	21
6.2.2	Área de estudio.....	23
6.2.3	Logística de transporte y transformación	25
6.2.4	Perfil económico e industrial	25
6.3	Generación y disponibilidad de los residuos	26
6.4	Manejo actual de los residuos de aserradero.....	28
6.5	Caracterización climática y gestión del riesgo.....	28
6.6	Emisiones asociadas al escenario base.....	29
6.7	Marco normativo del proyecto.....	29
6.7.1	Normativa colombiana	30
6.7.2	Estándares y metodologías de carbono.....	30
6.7.3	Normas técnicas de caracterización	31
7	MARCO CONCEPTUAL Y REFERENCIAL	32
7.1	Cambio climático y captura de carbono	32
7.2	Fundamentos y aplicación del biochar en suelos degradados	32
7.3	Remoción de carbono y certificación bajo el estándar PURE.earth.....	34
8	SISTEMA DE PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR	37
8.1	Gestión y caracterización de la biomasa.....	37
8.2	Proceso de pirolisis para la producción de biochar	39
9	METODOLOGÍA	43
9.1	Enfoque y tipo de investigación.....	43
9.2	Diseño metodológico	43

9.2.1	Fases del diseño metodológico.....	44
9.3	Estimación del potencial de remoción de carbono	47
9.3.1	Biomasa residual técnicamente aprovechable	47
9.3.2	Carbono contenido en la biomasa.....	48
9.3.3	Producción de biochar a partir de biomasa	49
9.3.4	Carbono contenido en el biochar	49
9.3.5	Conversión a CO ₂ equivalente.....	50
9.3.6	Pérdidas de carbono (factor de persistencia).....	50
9.4	Estimación neta de remoción de carbono del proyecto	51
10	RESULTADOS.....	53
10.1	Parámetros de entrada para la estimación.....	53
10.2	Estimación del potencial de remoción de carbono	54
10.2.1	Biomasa residual técnicamente aprovechable	54
10.2.2	Producción estimada de biochar	54
10.2.3	Carbono contenido en el biochar	54
10.2.4	Conversión a CO ₂ equivalente.....	55
10.2.5	Pérdidas de carbono por persistencia.....	55
10.3	Estimación neta de remoción de carbono del proyecto	55
11	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
11.1	Disponibilidad de biomasa residual y alcance de aprovechamiento	57
11.2	Viabilidad técnica de la conversión de biomasa a biochar.....	57
11.3	Potencial estimado de remoción de carbono.....	58
11.4	Potencial de aplicación en suelos degradados, limitaciones e implicaciones del estudio 59	
11.5	Limitaciones del estudio.....	60
12	CONCLUSIONES	62
13	BIBLIOGRAFIA.....	63
14	ANEXOS.....	67

Lista de contenido de figuras

Figura 1 Flujo conceptual	19
Figura 2 Localización del municipio de Tocancipá en la Sabana de Bogotá.....	22
Figura 3 Localización de la vereda La esmeralda de Tocancipá.	24
Figura 4 Ciclo del carbono asociado a la producción y aplicación de biochar.	33
Figura 5 Proceso de acondicionamiento de biomasa previo a la pirólisis.	40
Figura 6 Proceso de pirólisis para la producción de biochar.....	41
Figura 7 Proceso de estimación del potencial de remoción de carbono	46

Lista de contenido de tablas

Tabla 1 Origen y oferta estimada de biomasa residual del sector maderero.	38
Tabla 2 Parámetros del proceso de pirólisis.....	45
Tabla 3 Parámetros utilizados para la estimación del carbono retenido en el biochar.	53

Lista de contenido de anexos

Anexo A1 Normativa colombiana.	67
Anexo A2 Estándares y metodologías de carbono.	68
Anexo A3 Normas técnicas de caracterización.	69
Anexo B1 <i>Matriz de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV)</i>	70

Agradecimientos

Al culminar este proceso académico en Ingeniería Ambiental, deseo reconocer el esfuerzo personal que me permitió alcanzar este objetivo. Este documento refleja disciplina, perseverancia y la determinación de superar retos y dudas propias.

A mi familia, por su apoyo incondicional, a mi madre por su confianza y sus palabras de ánimo en cada etapa; a mis amigos, por su compañía y respaldo en los momentos de dedicación intensa; y a mis ángeles de cuatro patas, cuyo recuerdo me fortaleció en cada paso de este camino

Asimismo, agradezco a la Universidad por brindar el espacio formativo que posibilitó mi desarrollo académico y profesional, así como las herramientas necesarias para concretar este logro. De igual manera, extiendo un reconocimiento a mis compañeros del diplomado Proyectos Créditos de Carbono, con quienes se gestaron las bases conceptuales del Project Design Document (PDD) que sirvieron de insumo para el escalamiento técnico de esta propuesta individual.

"En lo más crudo del invierno, finalmente aprendí que en mi interior habita un verano invencible" (Camus, 1942)

Resumen

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y el manejo inadecuado de residuos maderables representan retos relevantes para la mitigación del cambio climático y el aprovechamiento sostenible de biomasa residual en el ámbito local. En el municipio de Tocancipá (Cundinamarca), el sector de transformación de madera genera una oferta bruta estimada de 1.120 t/año de residuos lignocelulósicos que, en ausencia de alternativas de valorización, pueden destinarse a disposición, degradación o quema abierta.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo formular una propuesta para la producción de biochar a partir de residuos maderables generados en aserraderos locales, como alternativa de aprovechamiento de biomasa residual, remoción de carbono y potencial aplicación en suelos degradados por incendios forestales. La propuesta se fundamenta en la metodología Biochar Carbon Removal Certification (CORC) del estándar PURE Earth, en la estimación de la disponibilidad de biomasa residual y en la definición de los parámetros técnicos del proceso de pirólisis para su conversión en biochar.

A partir de una fracción técnicamente aprovechable estimada en 560 t/año de biomasa seca y un rendimiento de conversión del 50%, se proyecta una producción aproximada de 280 t/año de biochar. Bajo los supuestos metodológicos adoptados, se estimó un potencial de remoción neta de 575 t CO₂ eq/año. Igualmente, se plantea de manera conceptual un sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) como soporte metodológico para la trazabilidad de las estimaciones, junto con posibles cobeneficios asociados al aprovechamiento de residuos maderables y al potencial de rehabilitación de suelos degradados por incendios forestales.

Palabras clave: biochar; remoción de carbono; residuos maderables; pirólisis; suelos degradados.

Abstract

The increase in greenhouse gas emissions and the inadequate management of wood residues represent significant challenges for climate change mitigation and the sustainable utilization of residual biomass at the local level. In the municipality of Tocancipá (Cundinamarca), the wood processing sector generates an estimated gross supply of 1,120 t/year of lignocellulosic residues which, in the absence of valorization alternatives, may be directed to disposal, natural degradation, or open burning.

In this context, the objective of this study is to formulate a proposal for the production of biochar from wood residues generated by local sawmills, as an alternative for residual biomass valorization, carbon removal, and potential application in soils degraded by forest fires. The proposal is based on the Biochar Carbon Removal Certification (CORC) methodology under the PURE Earth standard, on the estimation of residual biomass availability, and on the definition of the technical parameters of the pyrolysis process for its conversion into biochar.

Based on an estimated technically recoverable fraction of 560 t/year of dry biomass and a conversion yield of 50%, an approximate production of 280 t/year of biochar is projected. Under the adopted methodological assumptions, a potential net carbon removal of 575 t CO₂ eq/year was estimated. Additionally, a conceptual Monitoring, Reporting, and Verification (MRV) system is proposed as methodological support for the traceability of the estimates, together with potential co-benefits associated with the valorization of wood residues and the potential rehabilitation of soils degraded by forest fires.

Keywords: biochar; carbon removal; wood residues; pyrolysis; degraded soils.

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales actuales, debido al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas, entre otros factores, a actividades industriales, energéticas y a la gestión inadecuada de residuos orgánicos. Frente a este panorama, la implementación de estrategias orientadas a la reducción de emisiones y al almacenamiento de carbono se ha consolidado como un eje relevante dentro de las políticas de mitigación climática (IDEAM, 2022; IPCC, 2019; Congreso de la República de Colombia, 2018).

En este contexto, el biochar ha surgido como una alternativa de interés para la remoción de carbono y el aprovechamiento de biomasa residual. Se trata de un material sólido rico en carbono, obtenido mediante la conversión termoquímica de biomasa en condiciones de oxígeno limitado, proceso conocido como pirólisis. Su aplicación en el suelo puede contribuir al almacenamiento de carbono y, adicionalmente, favorecer propiedades físicas y químicas asociadas con la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes (Lehmann & Joseph, 2015; Downie et al., 2012). Asimismo, su calidad y uso en aplicaciones ambientales han sido objeto de lineamientos técnicos y criterios de caracterización establecidos por organismos como la International Biochar Initiative (International Biochar Initiative, 2015).

En Colombia, los residuos maderables generados por actividades de transformación de madera representan una oportunidad de valorización dentro de esquemas de economía circular. En el municipio de Tocancipá, estas actividades generan biomasa residual lignocelulósica que, en ausencia de alternativas de aprovechamiento, puede destinarse a disposición, degradación o quema, limitando su uso productivo y ambiental. De manera paralela, el territorio presenta áreas rurales con procesos de degradación del suelo asociados a incendios forestales, lo que plantea la necesidad de explorar estrategias que articulen la gestión de residuos con acciones de restauración y mitigación climática (CAR, 2023).

Bajo este escenario, la producción de biochar a partir de residuos maderables se plantea como una alternativa con doble propósito: por una parte, permite valorizar biomasa residual; por otra, esta ofrece un potencial de remoción de carbono y de aplicación en procesos de rehabilitación de suelos degradados (Rodríguez, C, 2021). En los últimos años, este tipo de iniciativas ha sido incorporado dentro de los enfoques de remoción de dióxido de carbono (CDR), particularmente mediante metodologías como Biochar Carbon Removal Certification (CORC), desarrollada por PURE.Earth, la cual establece lineamientos para la cuantificación, monitoreo, reporte y verificación de las remociones expresadas en toneladas de CO₂ equivalente (PURE.earth, 2024)

De acuerdo a esto, el presente trabajo tiene como objetivo formular una propuesta para la producción de biochar a partir de residuos maderables generados en el municipio de Tocancipá, como estrategia para la remoción de carbono, la gestión sostenible de residuos y la posible rehabilitación de suelos degradados. La propuesta se desarrolla con base en la metodología PURE.Earth - CORC y busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial de aprovechamiento de los residuos maderables generados en el municipio de Tocancipá para la producción de biochar, la remoción de carbono y su posible aplicación en la rehabilitación de suelos degradados?

Se espera que esta propuesta contribuya a evidenciar el potencial del biochar como alternativa técnica para valorizar residuos maderables y aportar a estrategias locales de mitigación del cambio climático y recuperación ambiental.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de Tocancipá, la presencia de seis aserraderos locales genera anualmente cerca de 1,120 toneladas de residuos lignocelulósicos (aserrín, virutas y recortes) se partió de rendimientos típicos de aserraderos tomado de reportes generados por la (FAO, 2017) y (FEDEMADERAS, 2020), donde entre el 20% y el 30 % de la madera que se procesa, se convierte en subproductos sólidos generalmente tratados como residuos. La carencia de sistemas estructurados para su aprovechamiento deriva en dos problemáticas diferenciadas: por un lado, la subutilización de la biomasa al ignorar su potencial como materia prima de valor agregado y por otro, una disposición ineficiente mediante acumulación en botaderos o quemas a cielo abierto (MinAmbiente, 2019).

Estas dinámicas constituyen un pasivo ambiental crítico: mientras que la incineración descontrolada libera por cada tonelada de biomasa volúmenes de: 1,8 t CO₂, 0,003 t CH₄, 0,0001 t N₂O. La descomposición anaerobia genera lixiviados y emisiones de: 0,04 t CH₄, 0,2 t CO₂; y en el escenario de compostaje o venta informal, corresponden a aproximadamente 1,0 t CO₂ y 0,0003 t N₂O (MADS, 2020). Gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global. Asimismo, estas prácticas propician la proliferación de plagas y elevan el riesgo de incendios forestales en el territorio (FAO, 2022).

Esta problemática empeora al considerar que el municipio ha experimentado procesos de degradación de suelos vinculados a incendios forestales. La vulnerabilidad del territorio se evidencia en la vereda La Esmeralda, donde sectores como Peñas Blancas han sufrido incendios recientes, eventos que han afectado alrededor de 0,2 ha en enero de 2024 (Extrategia Medios, 2024) hasta conflagraciones de gran magnitud que alcanzaron las 6 ha en años anteriores (Periodismo Público, 2016). Estos siniestros no solo comprometen la biodiversidad local, sino que exponen el suelo a un deterioro acelerado mediante la pérdida de horizontes orgánicos, la alteración del pH y la reducción de la capacidad de retención hídrica

(CAR, 2023). Ante este escenario, el biochar surge como una solución técnica necesaria para la recuperación de la estructura edáfica en esta zona.

Ojo que si se habla de los detrimentos ambientales de estos bosques habría que agregar que las tres especies pino, eucalipto y teca son exóticas, además las dos primeras especies son alelopáticas.

En este marco, el aprovechamiento de residuos maderables mediante tecnologías de conversión termoquímica, específicamente la pirólisis, se presenta como una alternativa integral. La producción de biochar; un material poroso y rico en carbono estable ofrece una solución dual: al incorporarse al suelo, permite el secuestro duradero de carbono atmosférico, mitigando el cambio climático, mientras mejora simultáneamente las propiedades físicas y químicas del sustrato degradado (Lehmann & Joseph, 2015).

A nivel global, el biochar ha sido validado como una de las principales estrategias de Remoción de Dióxido de Carbono (CDR), orientada a capturar y almacenar carbono de forma verificable y permanente. Marcos internacionales como la certificación Biochar Carbon Removal (CORC) proporcionan metodologías para cuantificar y validar dichas remociones, facilitando la inclusión de estos proyectos en esquemas de créditos de carbono y mecanismos de financiamiento climático (PURE.Earth, 2022).

Pese a este potencial técnico y económico, en Tocancipá aún no se han ejecutado iniciativas que articulen la valorización de biomasa residual de especies como pino, eucalipto y teca, utilizadas ampliamente en procesos de transformación maderera en la región. Estas especies corresponden principalmente a plantaciones forestales comerciales; en el caso del pino (*Pinus patula*, *P. podocarpus*) y el eucalipto (*Eucalyptus* spp) (FAO, 2017; FEDEMADERAS, 2020), se trata de especies exóticas ampliamente introducidas en la región Andina por su rápido crecimiento y rendimiento maderable. No obstante, ambas presentan características alelopáticas, es decir, la capacidad de liberar compuestos químicos que pueden inhibir el desarrollo de otras especies vegetales y modificar la dinámica ecológica del suelo.

Considerando que, bajo densidades promedio de 0,6 - 0,7 t/m³ reportadas para maderas de la región Andina, cada metro cúbico de madera representa aproximadamente entre 0,6 y 0,7 toneladas de biomasa aprovechable (IDEAM, 2018; CAR, 2021), lo que permite dimensionar su aporte potencial en términos de captura de carbono y la contribución ecológica rehabilitando zonas críticas como la vereda La Esmeralda.

En este sentido, resulta pertinente de formular una propuesta que evalúe la producción de biochar a partir de residuos maderables como una estrategia técnica y ambientalmente viable para la gestión de excedentes maderables, la recuperación de suelos degradados por incendios y la mitigación del cambio climático en el municipio.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar el potencial de aprovechamiento de residuos maderables generados en Tocancipá mediante su conversión termoquímica en biochar, para la remoción de carbono y rehabilitación de suelos degradados.

3.2 Objetivos específicos

1. Estimar la disponibilidad de biomasa residual maderable generada en Tocancipá, identificando los tipos de residuos y volúmenes con el fin de aprovecharlos como materia prima para la producción de biochar.
2. Definir los parámetros técnicos del proceso de pirólisis y los factores de conversión de biomasa a biochar, como base para la estimación de su producción.
3. Estimar el potencial de remoción de carbono asociado a la producción de biochar, considerando el contenido de carbono de la biomasa, la fracción de carbono estable retenida y su conversión a CO₂ equivalente, así como su potencial contribución a la rehabilitación de suelos degradados.

4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

4.1 Relevancia del estudio

La valorización de residuos maderables mediante pirólisis controlada para la producción de biochar constituye una estrategia relevante para abordar problemáticas asociadas a la gestión de residuos y a la mitigación del cambio climático. Este material, obtenido a partir de la conversión termoquímica de biomasa, presenta una alta estabilidad en el suelo, con tiempos de permanencia que pueden superar los 100 años dependiendo de su composición (Lehmann & Joseph, 2015). Además de su capacidad para almacenar carbono de manera duradera, se ha evidenciado que la incorporación de biochar puede mejorar propiedades físicas y químicas del suelo, tales como la retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica del suelo.

En este contexto, el presente estudio contribuye a la resolución del problema identificado en el municipio de Tocancipá, asociado a la gestión ineficiente de aproximadamente 1.120 t/año de residuos maderables, mediante la propuesta de su transformación técnica en biochar a través de procesos de pirólisis. Este enfoque permite evitar emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de prácticas como la quema abierta o la descomposición no controlada de la biomasa. A partir de este aprovechamiento, se estima una remoción neta potencial cercana a 575 t CO₂ eq/año, lo que representa una alternativa de mitigación climática y valorización de biomasa bajo principios de economía circular. Asimismo, el proyecto plantea una solución para la rehabilitación de suelos degradados por incendios forestales en la vereda La Esmeralda, mediante la aplicación de biochar para mejorar propiedades como la retención hídrica, la estructura edáfica y la disponibilidad de nutrientes. Finalmente, el estudio aporta un marco metodológico de monitoreo, reporte y verificación (MRV) orientado a garantizar la trazabilidad y permanencia del carbono capturado bajo estándares internacionales de remoción de carbono

5 ANTECEDENTES

En el contexto colombiano, particularmente en la región andina, se han documentado efectos positivos del biochar de origen maderable en suelos afectados por alteraciones antrópicas y eventos de incendio. Investigaciones desarrolladas en el departamento de Cundinamarca evidencian mejoras en la retención hídrica y en la fertilidad del suelo tras la aplicación de biochar, lo cual respalda su uso como herramienta para procesos de restauración ecológica en áreas degradadas (Rodríguez, C, 2021).

Desde la perspectiva productiva, los aserraderos constituyen una fuente significativa de biomasa residual susceptible de valorización. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, entre el 20 % y el 30 % del volumen de madera procesado en aserraderos se convierte en residuos sólidos como aserrín, virutas y recortes (FAO, 2017).

En Colombia, reportes sectoriales indican la presencia de estructuras productivas medianas con volúmenes de procesamiento anual que oscilan entre 1.000 m³ y 2.000 m³ por planta en regiones centrales del país (FEDEMADERAS, 2020). Estos residuos, cuando no son gestionados adecuadamente, pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su descomposición o a prácticas de quema abierta.

En este contexto, la transformación de biomasa residual mediante pirólisis controlada permite retener una fracción significativa del carbono en forma estable dentro del biochar (Lehmann & Joseph, 2015), lo que posiciona esta tecnología como una alternativa alineada con estrategias de mitigación climática y economía circular. En el ámbito local, la implementación de iniciativas orientadas al aprovechamiento de residuos maderables puede contribuir a la reducción de emisiones, al fortalecimiento de prácticas de gestión sostenible de residuos y a la rehabilitación de suelos degradados y aumento de opciones laborales en zonas rurales.

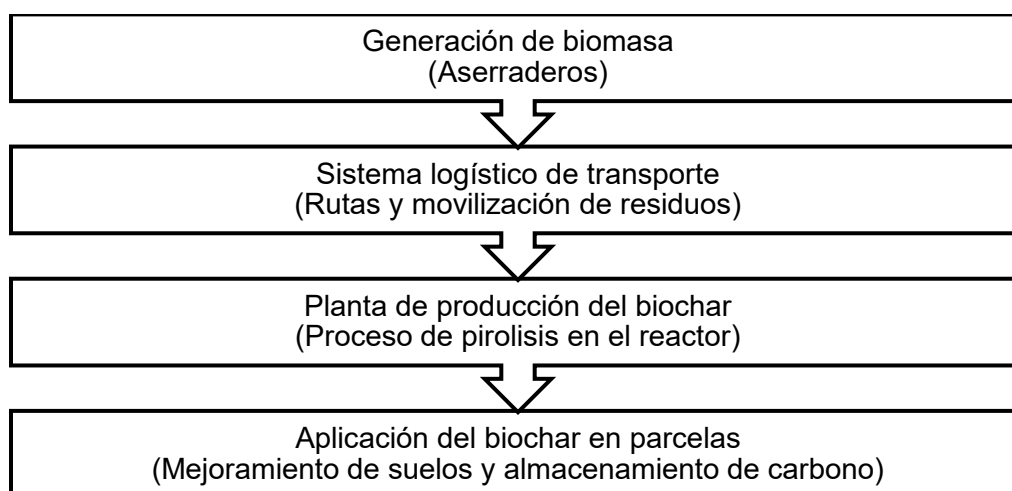
En este marco, el presente trabajo de grado se justifica en la necesidad de analizar el potencial del aprovechamiento de residuos, integrando estrategias de captura de carbono, restauración de suelos y valorización de biomasa residual en una escala territorial.

6 CONTEXTO TERRITORIAL Y NORMATIVO

6.1 Sistema territorial del proyecto

El sistema territorial del proyecto se estructura a partir de cuatro componentes principales que articulan la generación, transformación y aplicación del biochar dentro del territorio, configurando un sistema integrado de aprovechamiento de biomasa residual, los cuales se representan esquemáticamente en la Figura 1.

Figura 1
Flujo conceptual



Nota. El sistema territorial del proyecto se articula a partir de cuatro componentes principales.

Elaboración propia

En primer lugar, se encuentran los centros de generación de biomasa residual, considerados en el presente estudio, correspondientes a seis aserraderos ubicados principalmente en la zona industrial y en el corredor de la Autopista Norte del municipio (Confecámaras, 2024). Estos fueron seleccionados con base en su estado operativo activo y en la disponibilidad de información reportada en registros (Cámara de Comercio de Bogotá, 2024), lo que permitió su inclusión como fuentes viables de suministro de materia prima en el desarrollo del estudio. Las empresas seleccionadas son: Forestal Cimitarra S.A., Manufacturas en Maderas Cimitarra Ltda., Madera e Ingeniería S.A.S., Manufacturas Terminadas S.A.,

Surtimaderas Nubis S.A.S. y Maderas La Serranía Ltda. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2024), las cuales generan residuos maderables derivados de actividades de aserrado, cepillado y manufactura de productos de madera. Dichos residuos constituyen un recurso potencial para su valorización energética y ambiental mediante procesos de pirólisis controlada.

El segundo componente corresponde al sistema logístico de transporte de biomasa, mediante el cual los residuos recolectados en los aserraderos son trasladados hacia la planta de transformación. De acuerdo con el diseño del proyecto, el corredor logístico principal conecta al municipio de Tocancipá con la ciudad de Bogotá, recorriendo aproximadamente 35 km, distancia utilizada para el cálculo de emisiones asociadas al transporte dentro del análisis de ciclo de vida del proyecto.

El tercer componente del área de estudio es la planta piloto de pirólisis ubicada en la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, específicamente dentro del campus universitario en el edificio destinado a procesos de ingeniería química y operaciones de reacción (UNAL, 2024). La investigación sobre producción y aplicaciones de biochar en Colombia ha sido impulsada por la Universidad Nacional de Colombia, en esta instalación se realiza la conversión térmica de la biomasa residual en biochar mediante pirólisis controlada (UNAL, 2025), proceso que permite estabilizar el carbono contenido en la biomasa y generar un material carbonoso con alta capacidad de almacenamiento de carbono y potencial de mejora del suelo. Esta planta constituye el nodo tecnológico del proyecto, al asegurar el control de calidad del biochar producido y el cumplimiento de los parámetros establecidos por la metodología de certificación de remoción de carbono (Sánchez Reinoso, Ávila Pedraza, & Restrepo Díaz, 2020).

Finalmente, el cuarto componente corresponde a las parcelas de aplicación del biochar, localizadas en áreas rurales del municipio, particularmente en la vereda La Esmeralda. En estas zonas se prevé la incorporación del material en suelos degradados, mediante una dosis de aplicación de 10 toneladas por hectárea (Lehmann & Joseph, 2015; MinAmbiente, 2019;

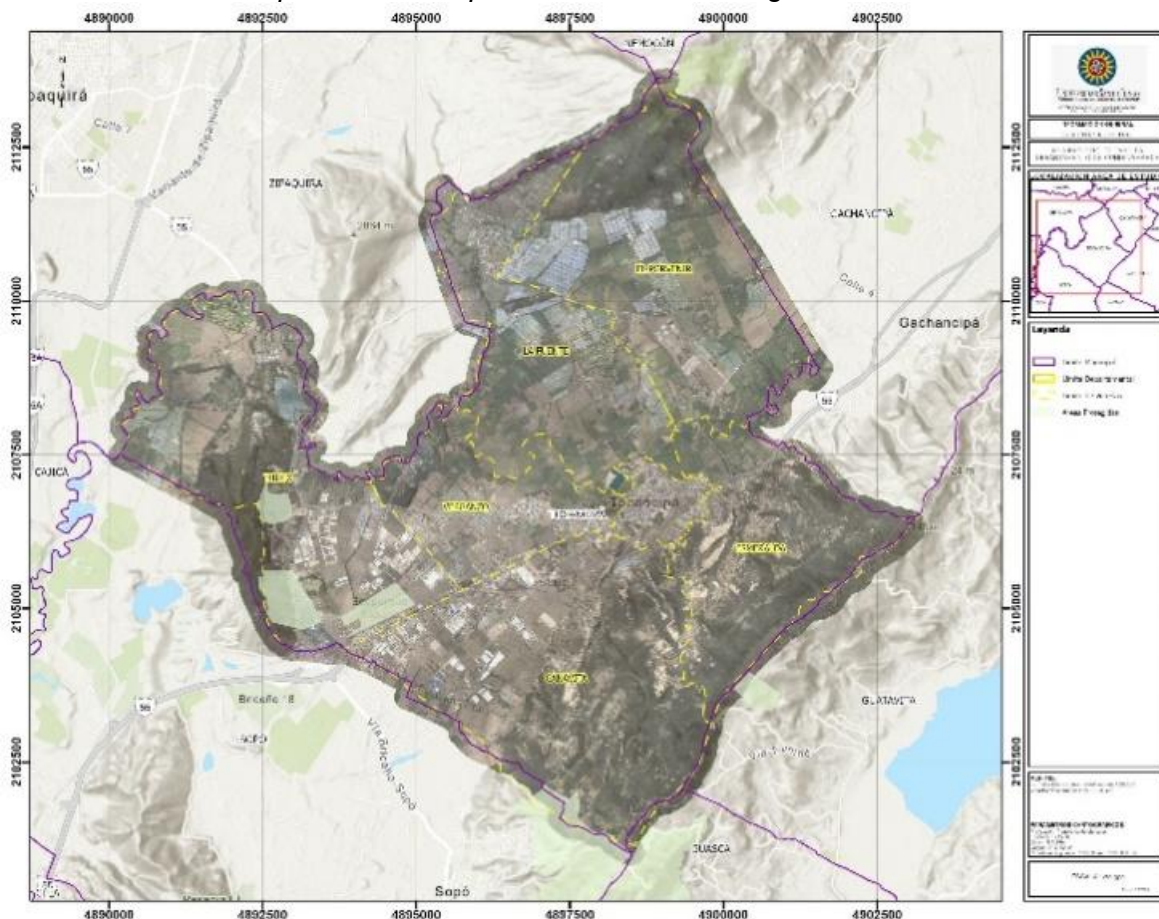
Rodríguez, C, 2021). Esta intervención se orienta a la recuperación de suelos afectados por incendios forestales, con el propósito de mejorar sus propiedades físico-químicas, incrementar la retención de agua y favorecer la restauración de la productividad agrícola. Asimismo, la aplicación del biochar se articula con los objetivos de remoción de carbono del proyecto, al contribuir al almacenamiento estable de carbono en el suelo.

6.2 Contexto territorial del municipio de Tocancipá

6.2.1 Localización y características geográficas

El municipio de Tocancipá se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca, dentro de la zona de influencia de la Sabana Norte de Bogotá. La ubicación geográfica del municipio dentro del departamento se presenta cartográficamente en la Figura 2. en las coordenadas 4,967° N y -73,912° O, bajo el sistema de referencia WGS 84 (EPSG: 4326). Posee una extensión territorial de 73,46 km², con predominio de área rural (70,85 km²) sobre el área urbana (2,61 km²) (Alcaldía de Tocancipá, s.f.)

Figura 2
Localización del municipio de Tocancipá en la Sabana de Bogotá.



Nota. Elaboración propia con base en datos del (IGAC, 2023).

Tocancipá se caracteriza por presentar una dinámica territorial donde convergen actividades industriales, logísticas y agropecuarias, lo cual genera una interacción relevante entre procesos productivos y ecosistemas rurales (Alcaldía de Tocancipá, s.f.). Dentro de este contexto, el municipio alberga un sector maderero activo compuesto por varios aserraderos que generan residuos lignocelulósicos como aserrín, virutas y retales de madera (CAR, 2023). Estos subproductos constituyen la materia prima principal para el desarrollo del proyecto de producción de biochar descrito en el presente estudio.

Se sitúa a una altitud aproximada de 2.605 m s. n. m., en el Altiplano Cundiboyacense, lo cual determina un clima templado frío de montaña (IDEAM, 2005). Esta condición geográfica

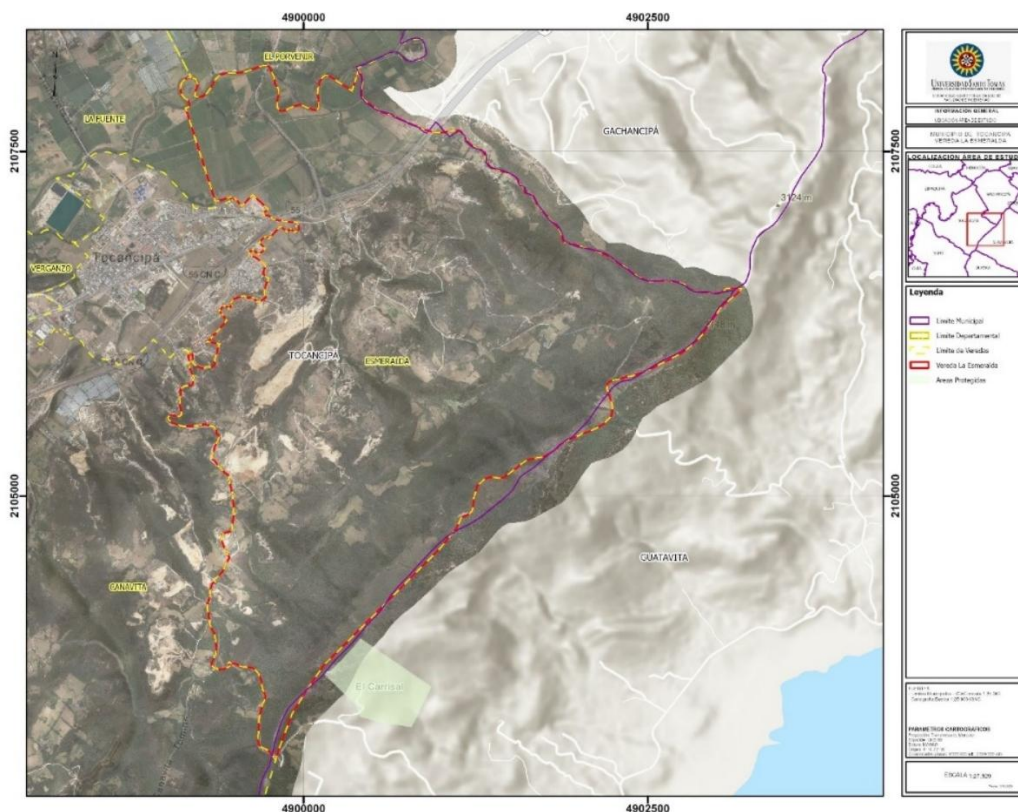
incide directamente en los regímenes de precipitación, en la dinámica de incendios forestales y en la productividad de los sistemas agrícolas y forestales.

Según proyecciones oficiales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024), Tocancipá contaba con una población estimada de 48.318 habitantes para 2024, lo que representa aproximadamente el 1,4 % del total departamental. Con base en su extensión territorial, la densidad poblacional se aproxima a 657 hab/km², evidenciando un proceso de consolidación urbano-industrial superior al de municipios rurales tradicionales.

6.2.2 Área de estudio

Corresponde a la vereda La Esmeralda, localizada en la zona rural del municipio. Su ubicación dentro del contexto municipal se presenta cartográficamente en la Figura 3, localizada al oriente del municipio de Tocancipá formando parte de las ocho veredas principales del municipio, situada en el área rural de aproximadamente 70,85 km² (Alcaldía de Tocancipá, s.f.).

Figura 3
Localización de la vereda La esmeralda de Tocancipá.



Nota. Elaboración propia con base en datos del (IGAC, 2023).

En el ámbito rural del municipio se localiza la vereda La Esmeralda, considerada en este trabajo como una de las áreas prioritarias para la aplicación del biochar producido. Esta vereda presenta características típicas de la ruralidad de la Sabana de Bogotá, con predominio de suelos agrícolas y presencia de comunidades dedicadas a actividades agropecuarias. Sin embargo, algunos sectores han experimentado procesos de degradación asociados a incendios forestales y pérdida de cobertura vegetal, lo que ha generado disminución del contenido de materia orgánica y deterioro en las propiedades físico-químicas del suelo (CAR, 2023). En consecuencia, estos territorios constituyen un escenario pertinente para la implementación de estrategias de restauración y biorremediación mediante la incorporación de biochar (Rodríguez, C, 2021), con el fin de mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la retención de agua y contribuir a la recuperación funcional de los ecosistemas productivos

En conjunto, el área de estudio puede interpretarse como un sistema territorial circular, donde los residuos generados por la industria maderera local son transformados mediante una tecnología de valorización de carbono y posteriormente reintegrados al suelo en zonas rurales degradadas. Este enfoque integra componentes industriales, tecnológicos y agroecológicos dentro de una misma cadena de valor, permitiendo analizar de manera integral los impactos ambientales y climáticos asociados a la producción y aplicación de biochar en el contexto regional de Tocancipá.

6.2.3 Logística de transporte y transformación

La biomasa recolectada en los aserraderos de Tocancipá es transportada hacia la planta de pirólisis de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realiza el proceso de transformación. Este sistema logístico busca optimizar la movilización del material y reducir las emisiones asociadas al transporte.

En el componente logístico del proyecto también se contempla la posibilidad de articulación con entidades locales, como la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Rural del municipio de Tocancipá, con el objetivo de facilitar la coordinación entre actores y promover rutas de transporte eficientes.

Posteriormente, el biochar producido podrá ser distribuido hacia áreas agrícolas o proyectos de restauración de suelos, donde se aplicará como enmienda orgánica y como mecanismo de almacenamiento estable de carbono

6.2.4 Perfil económico e industrial

Tocancipá se caracteriza por presentar una dinámica territorial donde convergen actividades industriales, logísticas y agropecuarias, lo cual genera una interacción relevante entre procesos productivos y ecosistemas rurales (Alcaldía de Tocancipá, s.f.). Dentro de este contexto, el municipio alberga un sector maderero activo compuesto por varios aserraderos que generan residuos lignocelulósicos como aserrín, virutas y retales de madera (CAR , 2023).

Estos subproductos constituyen la materia prima principal para el desarrollo del proyecto de producción de biochar descrito en el presente estudio.

Tocancipá ha experimentado una transición desde una economía rural hacia una estructura predominantemente industrial. Según la ficha de caracterización municipal del (DANE, 2025), el municipio generó aproximadamente 6.513,78 mil millones de pesos en valor agregado, representando el 7,31% del total departamental.

Las actividades secundarias (industria y manufactura) concentraron 4.040,56 mil millones de pesos, superando ampliamente las actividades primarias. Esta estructura productiva posiciona al municipio como uno de los principales nodos industriales de la Sabana Centro.

Dentro de este sector, la industria maderera desempeña un papel relevante, con unidades productivas dedicadas al aserrado, transformación y comercialización de madera, generando residuos como aserrín, virutas, recortes y piezas no comercializables.

6.3 Generación y disponibilidad de los residuos

El sector maderero genera una cantidad significativa de residuos durante los procesos de transformación de la madera. Entre los subproductos más comunes se encuentran el aserrín, las virutas, las astillas, los recortes y las piezas no comercializables, los cuales se originan principalmente en actividades de aserrado, cepillado y manufactura de productos de madera. (FAO, 2017); (FEDEMADERAS, 2020).

Diversos estudios han señalado que entre el 20 % y el 30 % de la madera procesada se convierte en subproductos sólidos, que en muchos casos son considerados residuos (FAO, 2017); (FEDEMADERAS, 2020).

En contextos locales donde no existen sistemas de aprovechamiento estructurados, estos materiales suelen ser dispuestos mediante quema, descomposición natural o comercialización a bajo valor, lo cual puede generar emisiones de gases de efecto invernadero.

En el municipio de Tocancipá, ubicado en el departamento de Cundinamarca, operan diversas empresas dedicadas al procesamiento y comercialización de madera, las cuales generan residuos lignocelulósicos tales como aserrín, virutas, recortes y piezas defectuosas. Un inventario preliminar de empresas activas del sector evidencia que estas pueden generar entre 100 y 300 toneladas anuales de residuos maderables por empresa, dependiendo de su escala de operación.

Para completar el apartado de cantidad aproximada y potencial aprovechable, se realizó una estimación preliminar de residuos maderables en Tocancipá, se partió de rendimientos típicos de aserraderos tomado de reportes generados por la (FAO, 2017) y (FEDEMADERAS, 2020), donde entre el 20% y el 30 % de la madera que se procesa, se convierte en subproductos sólidos generalmente tratados como residuos.

Considerando las densidades promedio de las especies maderables más utilizadas en la región andina, estimadas entre 0,6 y 0,7 t/m³, y los volúmenes anuales de procesamiento reportados para aserraderos de tamaño medio en la región central de Colombia, se estima que las empresas del municipio podrían generar entre 150 y 350 toneladas de residuos por año (IDEAM, 2018).

Sin embargo, no todos los residuos generados pueden destinarse a procesos de valorización, ya que algunos presentan usos alternativos o pueden estar contaminados. En este sentido, estudios regionales sugieren que entre 40 % y 60 % de los residuos maderables generados podrían ser técnicamente aprovechables para procesos de transformación termoquímica como la pirólisis (CAR, 2021).

El aprovechamiento de estos residuos dentro de proyectos de valorización energética o de captura de carbono constituye una estrategia alineada con los principios de la economía circular, en la medida en que transforma un residuo potencialmente contaminante en un recurso con valor ambiental y productivo

6.4 Manejo actual de los residuos de aserradero

En el panorama actual de Tocancipá, los residuos madereros (aserrín, virutas, costeros y recortes) generados por los aserraderos locales presentan una gestión ineficiente debido a la falta de plantas de aprovechamiento en la Sabana Norte. La biomasa residual sigue principalmente tres rutas de disposición:

Quema al aire libre o en hornos artesanales

Es una práctica común utilizada por aserraderos de pequeña escala para reducir rápidamente el volumen de los residuos o secar madera (MinAmbiente, 2019).

Disposición en botaderos o rellenos improvisados

Los residuos se depositan en propiedades cercanas o vertederos locales sin control ambiental, lo que favorece la descomposición anaerobia (FAO, 2022).

Ventas a bajo costo o disposición informal

Parte del material se comercializa a precios mínimos o simplemente se desecha de manera descontrolada (FEDEMADERAS, 2020), lo que representa una pérdida de carbono que podría ser capturado.

6.5 Caracterización climática y gestión del riesgo

De acuerdo con el (IDEAM, 2019), la región presenta temperaturas medias anuales entre 16 °C y 18 °C, con una evidente estacionalidad bimodal en la precipitación. Los periodos de mayor lluvia se registran entre abril - mayo y octubre - noviembre, mientras que los meses de junio - agosto y diciembre - febrero presentan condiciones de menor precipitación.

El *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá* (POMCA, 2019) reconoce la necesidad de incorporar la gestión del riesgo y la restauración de áreas degradadas dentro de los instrumentos de ordenamiento territorial. Asimismo, la *Unidad Administrativa Especial para la Gestión del Riesgo de Desastres* (UAEGRD) y el IDEAM han identificado que la

variabilidad climática y los periodos de estiaje incrementan la susceptibilidad a incendios forestales en la región andina.

En el municipio, la afectación estimada por incendios alcanza aproximadamente 120 hectáreas en sectores como la vereda La Esmeralda, generando pérdida de cobertura vegetal, disminución de materia orgánica y alteración estructural del suelo. Este escenario territorial constituye la base técnica que justifica la intervención mediante biochar.

6.6 Emisiones asociadas al escenario base

La ausencia del proyecto conlleva impactos negativos significativos cuantificados mediante factores de emisión del (IPCC, 2019) e (IDEAM, 2022):

Emisiones por combustión: La quema incontrolada libera inmediatamente dióxido de carbono biogénico (CO_2), estimado en aproximadamente 1,8 toneladas de CO_2 , por tonelada de biomasa quemada. Además, debido a la baja eficiencia de estas quemas, se generan gases críticos como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), así como material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) con carbono negro.

Emisiones por descomposición: En los vertederos, la madera experimenta una degradación lenta en condiciones de bajo oxígeno, generando metano (CH_4), un GEI que es entre 28 y 36 veces más potente que el CO_2 en un horizonte de 100 años.

6.7 Marco normativo del proyecto

La implementación del proyecto se encuentra respaldada por instrumentos normativos nacionales, estándares internacionales de cuantificación de carbono y normas técnicas de caracterización de materiales. En Colombia, el marco regulatorio en materia ambiental y climática promueve la reducción de emisiones de (GEI), el aprovechamiento sostenible de recursos y la adopción de tecnologías orientadas a la transición hacia economías bajas en carbono (Congreso de la República de Colombia, 2018); (MADS, 2015).

En este contexto, la producción de biochar se alinea con los lineamientos de mitigación climática, gestión ambiental y valorización de residuos establecidos en la política ambiental nacional. Asimismo, la cuantificación de los beneficios climáticos asociados a este tipo de proyectos requiere la aplicación de estándares internacionales para la MRV de remociones de carbono, así como metodologías analíticas estandarizadas para la caracterización del biochar y de los suelos donde este es aplicado.

6.7.1 Normativa colombiana

La normativa ambiental colombiana establece disposiciones orientadas a la gestión del cambio climático, el control de emisiones atmosféricas y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. En este marco, la Ley 1931 de 2018 define las directrices para la gestión del cambio climático y crea el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), con el propósito de articular las acciones de mitigación y adaptación en el país (Congreso de la República de Colombia, 2018).

De manera complementaria, el Decreto 1076 de 2015, como decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, consolida las disposiciones relacionadas con la gestión ambiental y el cumplimiento de la normativa aplicable a actividades productivas (MADS, 2015). Asimismo, la Resolución 909 de 2008 establece los estándares de emisión para fuentes fijas, relevantes para procesos industriales que involucran transformación térmica de biomasa (MAVDT, 2008). Se evidencia en el Anexo A1. Normativa colombiana aplicable al proyecto de producción de biochar el cual presenta un resumen de las principales disposiciones normativas consideradas en el desarrollo del proyecto.

6.7.2 Estándares y metodologías de carbono

La cuantificación de las reducciones o remociones de emisiones de GEI en proyectos climáticos requiere la aplicación de metodologías estandarizadas que permitan garantizar la trazabilidad y verificabilidad de los resultados. En el caso del presente proyecto, los estándares

internacionales establecen criterios para la estimación del carbono almacenado, el monitoreo del proceso y la certificación de las remociones de carbono.

El principal referente es el estándar PURE.Earth, el cual establece metodologías específicas para la certificación de remoción de carbono mediante biochar y define requisitos relacionados con la permanencia del carbono y los sistemas de monitoreo y verificación (PURE Earth, 2024). De manera complementaria, la norma ISO 14064-2 proporciona lineamientos para la cuantificación, monitoreo y reporte de reducciones o remociones de emisiones de GEI a nivel de proyecto (International Organization for Standardization, 2019).

Asimismo, las directrices metodológicas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) constituyen la referencia científica utilizada para la estimación de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019). Se evidencia en el Anexo A2. Estándares y metodologías internacionales para la cuantificación de remociones de carbono, el cual presenta un resumen de los principales referentes metodológicos considerados en el desarrollo del proyecto.

6.7.3 Normas técnicas de caracterización

La evaluación de la calidad del biochar producido y la verificación de sus efectos sobre el suelo requiere la aplicación de metodologías analíticas estandarizadas que garanticen la confiabilidad de los resultados. De acuerdo a esto, normas técnicas internacionales establecen procedimientos para la determinación de propiedades fisicoquímicas de la biomasa, del biochar y de los suelos donde este es aplicado.

Estas normas incluyen métodos para la determinación de parámetros como contenido de humedad, composición elemental y estabilidad del carbono, (ISO, 2017); (ASTM International, 2019). Se evidencia en el Anexo A3. Normas técnicas para la caracterización de biomasa, biochar y suelos, este presenta un resumen de las principales metodologías analíticas consideradas en el desarrollo del proyecto.

7 MARCO CONCEPTUAL Y REFERENCIAL

7.1 Cambio climático y captura de carbono

El cambio climático se define como la alteración del sistema atmosférico derivada de actividades humanas, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (IDEAM, 2014). En Colombia, estas emisiones han mostrado una tendencia creciente, alcanzando cerca de 154 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2019 (MADS, 2020).

Dentro de este inventario, la gestión inadecuada de residuos lignocelulósicos constituye una fuente crítica de contaminación. Es imperativo diferenciar el dióxido de carbono CO₂ de origen biogénico de gases como el metano CH₄ y el óxido nitroso N₂O, los cuales poseen un mayor potencial de calentamiento global y se generan durante la degradación anaerobia o la combustión incompleta de la biomasa (IPCC, 2019).

Específicamente, los residuos maderables de aserraderos se convierten en focos de emisión significativos al ser dispuestos en botaderos (generación de CH₄) o sometidos a quema abierta (liberación de CO₂ biogénico y otros GEI) (IDEAM, 2021; IPCC, 2019). Ante este escenario, la valorización mediante pirólisis para la producción de biochar surge como una alternativa estratégica. Este proceso no solo mitiga la liberación de gases de efecto invernadero, sino que promueve el secuestro de carbono en estructuras estables, alineando la gestión sostenible de la biomasa con los objetivos de acción climática (FAO, 2017).

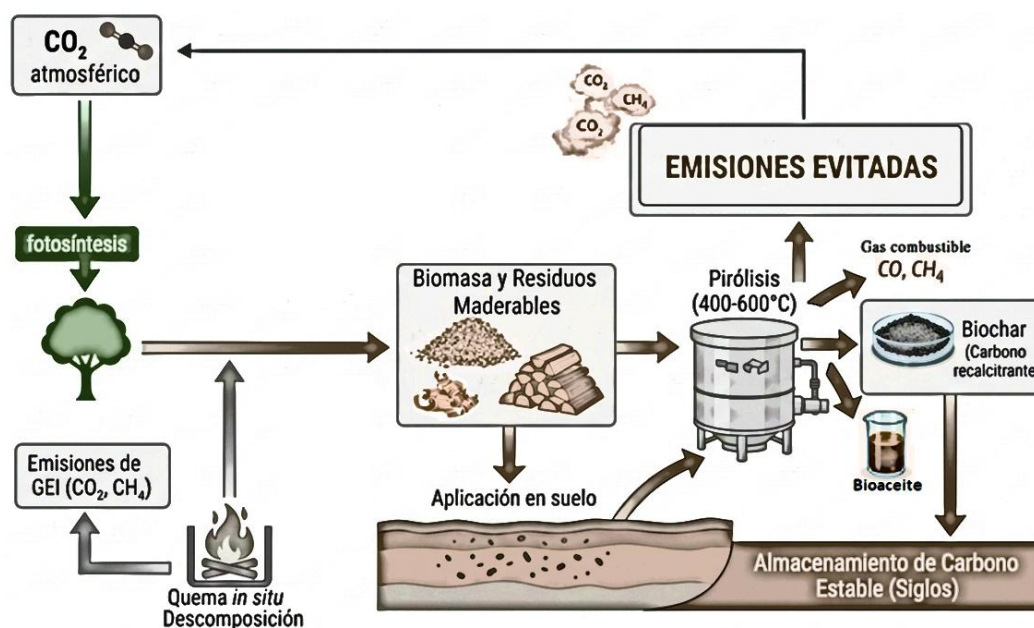
7.2 Fundamentos y aplicación del biochar en suelos degradados

El biochar se define como un material sólido poroso, obtenido mediante la conversión térmica de biomasa en condiciones limitadas de oxígeno, proceso conocido como pirólisis. Durante este proceso, los componentes estructurales de la biomasa principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina se descomponen y se transforman en tres fracciones principales: una sólida (biochar), una líquida (bio-oil) y una gaseosa (gases no condensables) (Lehmann & Joseph, 2015).

La estructura molecular del producto principal biochar, le otorga una alta resistencia a la degradación química y biológica y su aplicación como mejora de condiciones físicas, químicas o biológicas se fundamenta en la capacidad para modificar las propiedades del suelo, actuando como un sumidero de carbono y un catalizador para la restauración de ecosistemas afectados. La Figura 4 ilustra el ciclo del carbono asociado a la producción y aplicación de biochar, desde la captura inicial de CO_2 por la biomasa vegetal hasta su estabilización en el suelo tras el proceso de pirólisis.

Figura 4

Ciclo del carbono asociado a la producción y aplicación de biochar.



Nota. Elaboración propia con base en (Lehmann & Joseph, 2015)

Como se observa en la figura, el carbono capturado por las plantas mediante fotosíntesis se incorpora a la biomasa y posteriormente puede transformarse mediante pirólisis en biochar. A diferencia de la descomposición natural o la quema de residuos, donde el carbono retorna rápidamente a la atmósfera, el biochar permite almacenar una fracción significativa de este carbono en el suelo durante largos periodos, contribuyendo a la remoción neta de CO_2 de la atmósfera.

En suelos degradados por incendios forestales, como los identificados en Tocancipá, el biochar interviene en tres niveles críticos: Restauración de la estructura física: Los incendios en la zona de Peñas Blancas generan capas de suelo hidrofóbicas que impiden la infiltración de agua y aceleran la erosión. La porosidad del biochar rompe esta repelencia, incrementando la capacidad de retención hídrica entre un 10% y 20%, lo cual es vital en terrenos de pendiente moderada (< 35%) propios de la Vereda La Esmeralda (CAR, 2023; Rodríguez, C, 2021). Recuperación química y de nutrientes: Las altas temperaturas de las conflagraciones incineran la materia orgánica, dejando niveles de Carbono Orgánico del Suelo (COS) inferiores al 1.5%. El biochar, al poseer un pH alcalino (8.0 – 9.0), actúa como agente de acondicionamiento del suelo que neutraliza la acidez inducida por el fuego y mejora la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), facilitando la biodisponibilidad de nutrientes esenciales (CAR, 2023). Estabilización biológica: Al funcionar como un refugio microbiano o "microhábitat" protegido, el biochar acelera la recolonización de microorganismos beneficiosos en los suelos estériles tras el paso del fuego.

Considerando que en Tocancipá se han reportado afectaciones que varían desde 0.2 ha hasta 6 ha en eventos recientes de 2024 en la zona de interés, el uso de biochar no es solo una estrategia de disposición de residuos, sino una herramienta que favorece los procesos de biorremediación para mitigar la pérdida de horizontes orgánicos. La incorporación técnica de este material permite que el carbono capturado por la biomasa original de los aserraderos sea secuestrado de forma permanente (PURE.Earth, 2022), transformando un riesgo de incendio (acumulación de residuos maderables) en un insumo para la rehabilitación de la estructura edáfica local.

7.3 Remoción de carbono y certificación bajo el estándar PURE.earth

La cuantificación de las remociones de carbono generadas por el proyecto se realiza bajo el estándar internacional PURE.Earth – CORC (Carbon Removal Certificate), el cual se

fundamenta en el principio de remociones netas-negativas y duraderas. Este marco metodológico establece que únicamente se contabiliza el carbono efectivamente capturado de la atmósfera y almacenado de forma estable, garantizando un horizonte de permanencia mínimo de 100 años (PURE.earth, 2024). En este contexto, y de acuerdo con la metodología CORC, el balance de remoción de carbono para la presente propuesta se determina a partir de la ecuación general de remoción neta:

$$\mathbf{CORC}_2 = C_{stored} - C_{baseline} - C_{loss} - E_{Eproject} - E_{leakage}$$

Los componentes, variables y supuestos técnicos de esta relación se definen a continuación:

C_{stored} = Carbono almacenado en biochar: Corresponde a la cantidad de carbono orgánico estable retenido en el biochar producido. Este valor representa el carbono atmosférico almacenado de forma duradera en el biochar y se expresa como dióxido de carbono equivalente (tCO₂e)

$C_{baseline}$ = Emisiones del escenario sin proyecto: Representa las emisiones de gases de efecto invernadero que se generarían en ausencia del proyecto, asociadas al destino habitual de la biomasa residual, como la quema abierta o la descomposición natural. (tCO₂e)

C_{loss} = Pérdida por persistencia: Calcula el carbono contenido en el biochar que podría liberarse nuevamente a la atmósfera con el tiempo debido a procesos de degradación en el suelo. Depende del Factor de Persistencia (PF), el cual se determina por la relación molar H/Corg y la temperatura del suelo (Ts) Este valor debe ser caracterizado por análisis elemental de laboratorio, en este proyecto se toma de referencia bibliográfica.

$E_{Eproject}$ = Emisiones del proyecto: Corresponde a las emisiones de GEI asociadas a las actividades necesarias para la producción de biochar, incluyendo el transporte de

biomasa, el consumo energético del proceso de pirólisis y las emisiones directas generadas durante la operación del sistema, como CH₄ y N₂O.

En este estudio, ante la ausencia de mediciones directas del sistema de pirólisis, las emisiones operacionales se estiman mediante factores obtenidos en la literatura o, cuando su contribución es despreciable, se consideran despreciables.

E_{leakage}= Emisiones por fuga: Corresponde a las emisiones indirectas de GEI que podrían generarse fuera de los límites del proyecto como consecuencia del desplazamiento de usos de la biomasa u otras actividades asociadas.

Para este término se asume un valor nulo, dado que la biomasa utilizada corresponde a residuos de aserraderos sin un uso alternativo significativo, es decir, la biomasa carece de valor comercial, por lo que no se generan efectos de desplazamiento de mercado.

Para efectos de este estudio, el análisis se enfoca en la estimación del carbono almacenado en el biochar y las emisiones del escenario base, considerando de manera simplificada las pérdidas y emisiones asociadas al proceso.

8 SISTEMA DE PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR

8.1 Gestión y caracterización de la biomasa

La materia prima seleccionada consiste en biomasa residual lignocelulósica generada por el sector de transformación de madera en Tocancipá. Para determinar la viabilidad de la propuesta, se realizó una estimación técnica basada en rendimientos sectoriales y la capacidad instalada local.

A partir de información de registro empresarial (Confecámaras, 2024), se identifican seis empresas representativas que constituyen fuentes relevantes de biomasa residual lignocelulósica. La estimación de la cantidad de residuos generados se fundamenta en parámetros técnicos reportados en la literatura. Se considera en el apartado de generación aproximada y potencial aprovechable, una estimación preliminar de residuos maderables en Tocancipá, se parte de rendimientos típicos de aserraderos tomado de reportes generados por la FAO (2017) y FEDEMADERAS (2020), donde entre el 20% y el 30 % de la madera que se procesa, se convierte en subproductos sólidos generalmente tratados como residuos (aserrín, virutas y recortes) (FAO, 2017; FEDEMADERAS, 2020).

Asimismo, para la conversión de volumen a masa, se emplean densidades promedio entre 0,6 y 0,7 t/m³ para especies predominantes en Cundinamarca, como pino, eucalipto y teca (IDEAM, 2018). De acuerdo a estos criterios y en volúmenes de procesamiento típicos de aserraderos medianos (1.000 - 2.000 m³/año) valores que sirven como referencia para la estimación, se proyecta una generación de residuos entre 100 y 300 t/año por empresa, los valores estimados en la Tabla 1 se encuentran dentro de este rango

Actualmente, la gestión de estos residuos presenta limitaciones en términos de aprovechamiento. Una proporción significativa se maneja mediante prácticas informales, incluyendo la venta a bajo valor, la disposición en botaderos o su degradación directa en el suelo, así como la quema no controlada, las cuales generan emisiones de GEI (IPCC, 2019).

En este contexto, la siguiente tabla presenta un inventario preliminar de las empresas identificadas y su potencial de generación de residuos maderables:

Tabla 1

Origen y oferta estimada de biomasa residual del sector maderero.

Empresa	Actividad principal	Tipo de biomasa lignocelulósica	Generación aprox. (t/año)	Flujo actual (destino BAU)	Potencial aprovechable (%)
Forestal Cimitarra S.A.	Aserrado, acepillado, impregnación	Aserrín, virutas, recortes	300	Disposición / venta parcial	60
Manufacturas en Maderas Cimitarra Ltda	Aserrado y conservación de madera	Residuos de corte y cepillado	250	Venta a terceros / quema	60
Madera e Ingeniería S.A.S	Recipientes de madera	Sobras de madera maciza y virutas	200	Reutilización parcial / desecho	50 - 60
Manufacturas Terminadas S.A.	Muebles y puertas de madera	Retales y piezas defectuosas	150	Venta interna / disposición	50
Surtimaderas Nubis S.A.S	Comercio y surtido de maderas	Piezas no comercializadas, sobrantes	100	Almacenaje / pérdida	40 - 50
Maderas La Serranía Ltda	Comercio mayorista de madera y materiales de construcción	Sobras de corte, trozos, piezas dañadas	120	Venta a bajo valor / disposición	40 - 50
TOTAL			1.120		

Nota: Elaboración propia con base en información empresarial y registros sectoriales.

La información permite identificar una disponibilidad total de 1.120 t/año de residuos generados. No obstante, esta cifra corresponde a la oferta total estimada de subproductos y no implica que la totalidad sea apta para su aprovechamiento en la pirolisis. Una fracción de estos materiales presenta usos alternativos, limitaciones logísticas o condiciones que restringen su uso en procesos de pirólisis.

En este sentido, y con base en criterios técnicos reportados en la literatura, se considera que entre el 40 % y el 60 % de los residuos maderables generados pueden ser efectivamente aprovechados en procesos de valorización como la producción de biochar (CAR, 2021). Este rango será incorporado como supuesto metodológico en la estimación del potencial de remoción de carbono desarrollada en el capítulo de resultados

8.2 Proceso de pirolisis para la producción de biochar

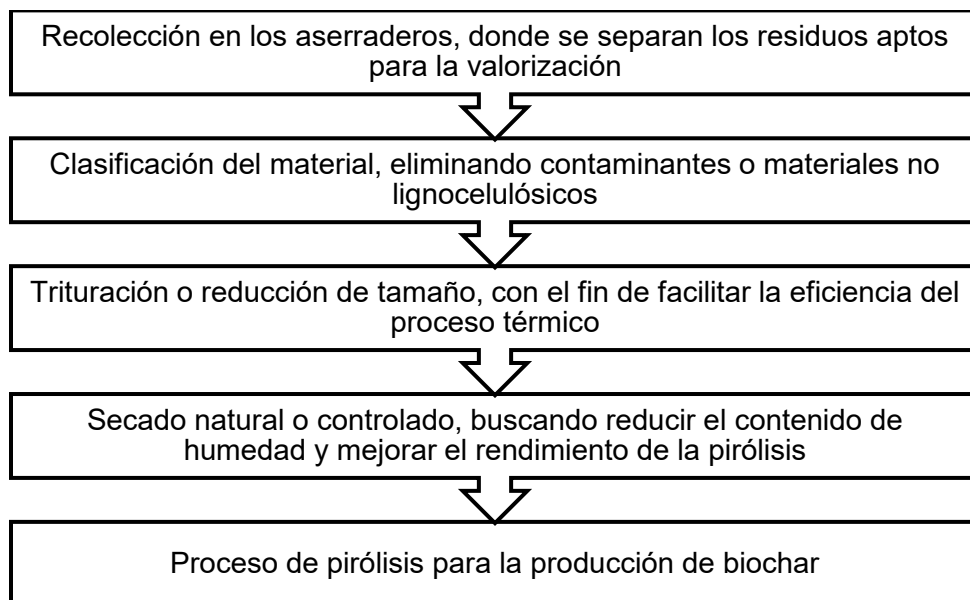
El sistema propuesto se basa en la conversión de materia prima lignocelulósica mediante un proceso térmico controlado, es decir, en ausencia de oxígeno que permite la descomposición de la biomasa en productos sólidos, líquidos y gaseosos del cual se obtiene un material carbonoso estable denominado biochar con potencial para aplicar posteriormente en suelos degradados (Lehmann & Joseph, 2015). En este trabajo, se establece que la biomasa usada proviene de residuos maderables generados en aserraderos del municipio de Tocancipá, previamente caracterizados en el apartado 7.1.

Para fines de estimación, en el proceso se considera únicamente la fracción técnica aprovechable de dicha biomasa, la cual debe cumplir condiciones mínimas de homogeneidad, tamaño y aptitud para su acondicionamiento previo a la pirólisis. Previo a su transformación, la biomasa seleccionada es sometida a un proceso de acondicionamiento que incluye etapas de secado, reducción de tamaño y homogenización, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso térmico. Dado que el rendimiento de conversión a biochar se expresa en base seca, los cálculos del potencial de producción se desarrollan considerando biomasa equivalente seca

En la Figura 5 se presenta el esquema general del proceso de acondicionamiento de la biomasa previo a la pirólisis.

Figura 5

Proceso de acondicionamiento de biomasa previo a la pirólisis.



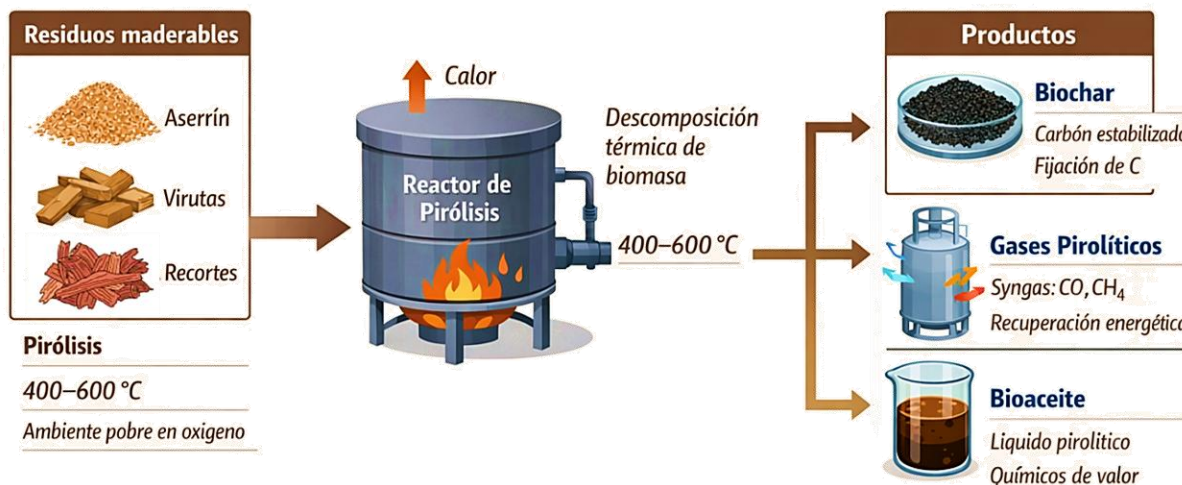
Nota. Elaboración propia con base en (Lehmann & Joseph, 2015).

Se propone para el desarrollo del proceso un reactor tipo batch de acero inoxidable, con capacidad aproximada de 500 kg por ciclo, ubicado en la planta piloto de la Universidad Nacional de Colombia con sede en Bogotá. El sistema opera en un rango de temperatura entre 400 y 600 °C (UNAL, 2024), condiciones que favorecen la obtención de biochar con alta estabilidad química y un contenido de carbono fijo entre 65% y 80% (PURE Earth, 2024).

Durante el proceso, se generan subproductos como gases no condensables, los cuales pueden ser recirculados para mantener la temperatura del reactor y mejorar la eficiencia energética, así como fracciones líquidas condensables.

En la Figura 6 se presenta el esquema conceptual del proceso de pirólisis para la producción de biochar.

Figura 6
Proceso de pirólisis para la producción de biochar.



Nota. Elaboración propia con base en parámetros reportados en (PURE Earth, 2024)

Bajo estas condiciones operativas, el proceso presenta un rendimiento aproximado del 50% en base seca, lo que permite convertir la biomasa residual en un producto sólido estable. En cuanto a los tiempos de residencia de la materia prima en el reactor, oscila entre 3 y 5 horas (UNAL, 2025), garantizando un adecuado control térmico del proceso.

Apoyado en la literatura, se establecen parámetros que permiten hacer control de calidad del biochar, de este modo asegurar que el biochar obtenido presenta condiciones adecuadas para su uso como enmienda orgánica y su potencial contribución a procesos de recuperación de suelos. Una vez finalizada la pirólisis, el biochar es sometido a procesos de enfriamiento, almacenamiento y caracterización, con el fin de verificar sus propiedades físico-químicas y su aptitud para aplicación en suelos.

Entre los principales parámetros evaluados se encuentran el contenido de carbono fijo (65–80%), la relación molar H/C_{org} (<0,7), el contenido de cenizas (2-8%) y el pH (8-9), los cuales permiten inferir la estabilidad del carbono y su comportamiento en el suelo (Lehmann & Joseph, 2015; International Biochar Initiative, 2015; PURE.earth, 2024). Adicionalmente, se consideran propiedades como el área superficial específica (200–400 m²/g) y la capacidad de

retención de agua, las cuales favorecen la adsorción de nutrientes y la mejora de las condiciones edáficas, especialmente en suelos degradados (Rodríguez, C, 2021).

9 METODOLOGÍA

9.1 Enfoque y tipo de investigación

El presente trabajo, se define como una propuesta de carácter ambiental con enfoque investigativo, orientada a evaluar el potencial de aprovechamiento de residuos maderables para la producción de biochar y la remoción de dióxido de carbono (CDR).

Se clasifica como un estudio de tipo prospectivo y estimativo, basado en la recopilación y análisis de información proveniente de literatura científica, documentos técnicos y metodologías internacionales de contabilidad de carbono (IPCC, 2019; PURE Earth, 2024). En este sentido, corresponde a una investigación evaluativa, al proyectar una alternativa técnica frente a una problemática ambiental a escala municipal.

El análisis se fundamenta en la estimación del potencial de producción de biochar y la capacidad de almacenamiento de carbono, empleando parámetros técnicos reportados en la literatura. Por tanto, no contempla desarrollo experimental ni validación a escala piloto, sino que se centra en la modelación teórica del sistema propuesto.

Como soporte metodológico, se plantea a modo de concepto un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), alineado con los lineamientos del estándar PURE.earth – CORC. La estructura general del sistema se presenta en la Matriz MRV, en Anexo B1, como base para la trazabilidad y verificabilidad de las estimaciones realizadas.

Este enfoque permite abordar la gestión de residuos cuantificable, bajo criterios medibles, reportables y verificables. (PURE Earth, 2024; Lehmann & Joseph, 2015).

9.2 Diseño metodológico

Este se estructura en una serie de fases de análisis técnico y ambiental orientadas a evaluar la viabilidad de una propuesta de aprovechamiento de residuos maderables para la producción de biochar que actúa como remoción de dióxido de carbono. Dichas fases integran el análisis de disponibilidad de biomasa, la evaluación del proceso de conversión termoquímica, la estimación del potencial de aplicación en suelos degradados y el cálculo prospectivo de

remoción de carbono, siguiendo los lineamientos metodológicos establecidos por el IPCC y el estándar de Biochar (CORC) (IPCC, 2019; PURE Earth, 2024).

9.2.1 Fases del diseño metodológico

Fase 1. Fundamentación metodológica y selección de referentes técnicos

En una primera etapa se identificaron y seleccionaron los referentes técnicos y metodológicos que orientan la estimación del potencial de remoción de carbono del estudio. Para ello, se tomaron como base las directrices del (IPCC, 2019) y el estándar Biochar Carbon Removal Certification (CORC) desarrollado por (PURE Earth, 2024), a partir de los cuales se definieron los criterios generales para la cuantificación del carbono contenido en la biomasa, su conversión a biochar y la estimación de la remoción de CO₂ equivalente.

Esta fase tuvo como propósito establecer el marco metodológico del estudio y sustentar la selección de parámetros técnicos empleados en los cálculos posteriores.

Fase 2. Identificación y caracterización de la biomasa residual

La segunda fase consistió en la identificación de proveedores potenciales de materia prima (biomasa residual) en Tocancipá (Cundinamarca). A partir de diagnósticos regionales sobre el sector maderero y residuos industriales, se identificaron seis aserraderos formalmente constituidos que generan subproductos lignocelulósicos aprovechables, entre ellos aserrín, virutas y piezas de madera no comercializables

Fase 3. Identificación del proceso de producción de biochar

En la tercera fase se estudió el proceso de conversión de la biomasa mediante pirólisis controlada, considerando parámetros operativos reportados en la literatura (International Biochar Initiative, 2015). La propuesta contempla un sistema tipo batch operado en un rango de 400 a 600 °C (UNAL, 2024), condiciones que favorecen la obtención de biochar con alto contenido de carbono estable

El proceso se plantea a nivel conceptual sobre infraestructura existente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Los principales parámetros técnicos del proceso se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2
Parámetros del proceso de pirólisis.

Parámetro	Valor estimado / rango	Fuente / tecnología de referencia
Temperatura de operación	400–600 °C	Pirolizador de lecho fijo / móvil
Tiempo de residencia	30–60 min	Diseño preliminar
Capacidad de tratamiento	1 t/hora	Según escala piloto/propuesta
Consumo energético	Variable	Depende del horno seleccionado
Emisiones del proceso	Controlable	Estimado según balance de ciclo

Nota: Elaboración propia con base en información empresarial y registros sectoriales.

Fase 4. Determinación del potencial de aplicación en suelos degradados

Posteriormente se realizó una revisión de información secundaria sobre la aplicación de biochar en procesos de recuperación de suelos degradados, así como de reportes regionales asociados a afectaciones por incendios forestales y pérdida de cobertura vegetal en el municipio de Tocancipá y la Sabana de Bogotá (CAR, 2023; IDEAM, 2025)

Con base en la literatura, se identificaron rangos típicos de aplicación de biochar en suelos, los cuales se consideran como referencia para la proyección del potencial de uso del material en escenarios de implementación (Rodríguez, C, 2021), sin que ello implique una validación en campo dentro del presente estudio.

Fase 5. Estimación del potencial de remoción de carbono y sistema MRV

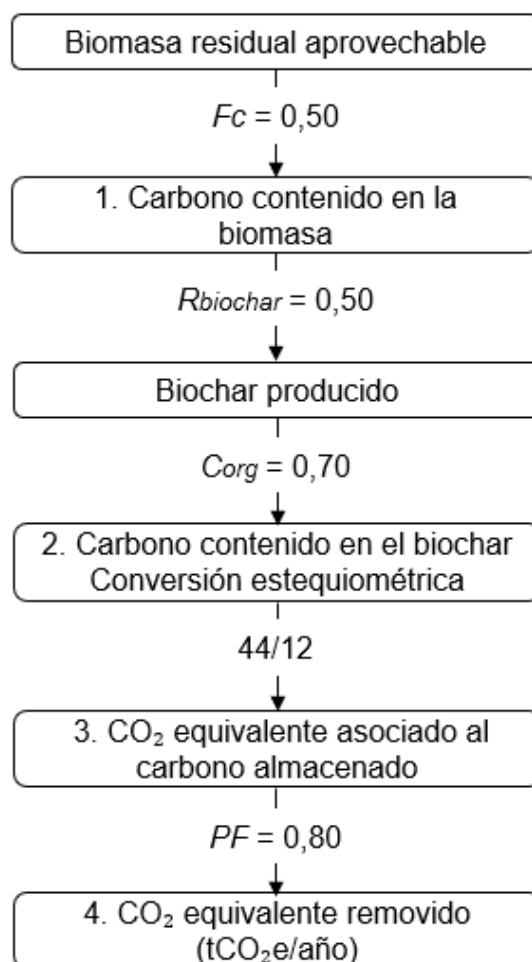
Finalmente, se realizó una estimación prospectiva del potencial de remoción de dióxido de carbono asociado a la producción de biochar, con base en los lineamientos metodológicos

del estándar Biochar (CORC) de PURE Earth. El cálculo se estructuró a partir de la determinación del carbono contenido en la biomasa, su conversión a biochar, la estimación del carbono contenido en este material, su conversión a CO₂ equivalente y el ajuste por persistencia del carbono (PURE.Earth, 2022).

El procedimiento general de estimación se resume en la Figura 7, en la cual se presentan las etapas conceptuales del cálculo desde el carbono contenido en la biomasa hasta la estimación del CO₂ eq removido.

Figura 7

Proceso de estimación del potencial de remoción de carbono



Nota. Esquema conceptual del proceso de estimación del potencial de remoción de carbono. Elaboración propia con base en (PURE.Earth, 2022).

Como soporte metodológico, se plantea de manera conceptual un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), alineado con los lineamientos del estándar CORC y la norma ISO 14064-2 (International Organization for Standardization, 2019). Su estructura general se presenta en la Matriz MRV (ver Anexo B1), como base para la trazabilidad de las estimaciones realizadas, sin que ello implique su aplicación dentro del alcance del presente estudio.

9.3 Estimación del potencial de remoción de carbono

La estimación del potencial de remoción de carbono se realiza con base en la metodología de certificación para biochar propuesta por (PURE.Earth, 2022), la cual establece un enfoque cuantitativo fundamentado en la relación entre el carbono contenido en la biomasa, su conversión a biochar y la fracción de carbono estable retenida a largo plazo.

La estimación del potencial de remoción de carbono se realiza mediante un enfoque cuantitativo basado en la transformación de biomasa lignocelulósica en biochar, considerando la fracción de carbono que puede ser estabilizada a largo plazo.

El procedimiento de cálculo se fundamenta en la relación entre la masa de biomasa procesada, su contenido de carbono, el rendimiento de conversión a biochar y la fracción de carbono estable retenida en el material.

La estimación se desarrolla de manera secuencial a través de la determinación del carbono contenido en la biomasa, el carbono retenido en el biochar, la fracción de carbono estable y su conversión a dióxido de carbono equivalente mediante relación estequiométrica.

A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas para cada una de las etapas del cálculo.

9.3.1 Biomasa residual técnicamente aprovechable

La oferta total estimada de residuos maderables del sector analizado corresponde a 1.120 t/año. No obstante, dado que no la totalidad del material generado presenta condiciones adecuadas para su aprovechamiento en el proceso de pirólisis, se adoptó una fracción

técnicamente aprovechable del 50 %, valor representativo del rango 40–60 % reportado para residuos lignocelulósicos con potencial de valorización. En consecuencia, la biomasa considerada en el análisis se determina mediante la siguiente expresión:

$$M_{biomasa} = M_{residuos} \times f_{aprv}$$

Donde:

$M_{biomasa}$ = masa seca de biomasa (aprovechable) (t)

$M_{residuos}$ = masa de biomasa residual (t)

f_{aprv} = fracción de masa aprovechable para pirolisis

9.3.2 Carbono contenido en la biomasa

Constituye la biomasa lignocelulósica, como la proveniente de residuos madereros que está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos orgánicos que contienen una fracción significativa de carbono estructural. De acuerdo con las directrices del IPCC, la biomasa vegetal presenta típicamente contenidos de carbono cercanos al 50 % en base seca, valor que suele emplearse como aproximación en estudios de inventarios de gases de efecto invernadero cuando no se dispone de análisis elementales específicos (IPCC, 2019).

En el caso del presente proyecto, la materia prima está compuesta principalmente por residuos de madera provenientes de procesos de aserrado, tales como viruta, aserrín y retales. Estos materiales presentan una composición lignocelulósica relativamente homogénea y un contenido de carbono comparable al reportado en la literatura científica para residuos forestales. El carbono contenido en la biomasa se determina a partir de la masa seca de biomasa procesada y su fracción de carbono, de acuerdo con la siguiente expresión

$$C_{biomasa} = M_{biomasa} \times f_c$$

Donde:

$C_{biomasa}$ = carbono contenido en la biomasa (t C)

$M_{biomasa}$ = masa seca de biomasa (t)

f_c = fracción de carbono en la biomasa (t C/t biomasa)

9.3.3 Producción de biochar a partir de biomasa

La cantidad de biochar producido se estima a partir de la masa de biomasa procesada y el rendimiento del proceso de pirólisis. Este rendimiento depende de las condiciones operativas, como temperatura y tiempo de residencia, así como de las características de la biomasa utilizada.

La producción de biochar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{biochar} = M_{biomasa} \times R_{biochar}$$

Donde:

$Q_{biochar}$ = cantidad de biochar producido (t)

$M_{biomasa}$ = masa de biomasa seca (t)

$R_{biochar}$ = rendimiento del proceso de pirólisis (t biochar/t biomasa)

Esta relación permite establecer el flujo de conversión de biomasa a biochar, constituyendo la base para la estimación del carbono almacenado en el material resultante.

9.3.4 Carbono contenido en el biochar

El carbono contenido en el biochar se estima a partir de la masa de biochar producida y su contenido de carbono orgánico. Esta aproximación permite cuantificar la cantidad total de carbono presente en el material, previo a la consideración de factores de permanencia o pérdidas asociadas a su estabilidad en el tiempo.

La estimación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$C_{biochar} = Q_{biochar} \times C_{org}$$

Donde:

$C_{biochar}$ = carbono contenido en el biochar (t C)

$Q_{biochar}$ = Cantidad de biochar producido (t)

$C_{org} = \frac{t C}{t biochar} =$ fracción de carbono orgánico en el biochar (adimensional)

9.3.5 Conversión a CO₂ equivalente

El carbono contenido en el biochar se expresa en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) mediante la relación estequiométrica entre la masa molecular del carbono (C) y el dióxido de carbono (CO₂).

Esta conversión permite representar la cantidad total de CO₂ equivalente asociada al carbono almacenado en el biochar, previo a la aplicación de factores de pérdida o ajustes del sistema.

$$CO_{2eq} = C_{biochar} \times \frac{44}{12}$$

Donde:

CO_{2eq} = CO₂ equivalente asociado al carbono almacenado (t CO₂eq)

$C_{biochar}$ = carbono contenido en el biochar (t C)

$\frac{44}{12}$ = factor de conversión estequiométrico

9.3.6 Pérdidas de carbono (factor de persistencia)

Para estimar la cantidad de carbono que no permanece almacenada a largo plazo, se utiliza un factor de persistencia (PF), el cual representa la fracción del carbono en el biochar que se mantiene estable en el tiempo.

A partir de este factor, las pérdidas de carbono se calculan como la fracción que no es persistente, es decir, la parte del carbono almacenado que puede degradarse y retornar a la atmósfera. Estas pérdidas se estiman mediante la siguiente expresión:

$$C_{loss} = CO_{2eq} \times (1 - PF)$$

Donde:

C_{loss} = pérdidas de carbono (t CO_{2eq})

CO_{2eq} = CO₂ equivalente asociado al carbono almacenado (t CO_{2eq})

PF = factor de persistencia (adimensional)

9.4 Estimación neta de remoción de carbono del proyecto

La estimación de la remoción neta de dióxido de carbono del proyecto se realiza mediante un balance que considera el carbono contenido en el biochar y las posibles pérdidas o emisiones asociadas al sistema, fundamentado en la metodología del Biochar Carbon Removal Certification Framework (CORC), la cual integra tanto las remociones directas como los factores que pueden reducir su efectividad (PURE Earth, 2024).

La remoción neta de carbono se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CORC = CO_{2eq} - C_{baseline} - C_{loss} - E_{project} - E_{leakage}$$

Donde:

$CORC$ = remoción neta de CO₂ equivalente (t CO_{2eq})

CO_{2eq} = CO₂ equivalente asociado al carbono contenido en el biochar

$C_{baseline}$ = emisiones o almacenamiento en el escenario base

C_{loss} = pérdidas de carbono por no permanencia

$E_{Eproject}$ = emisiones asociadas a la operación del proyecto

$E_{leakage}$ = emisiones por efectos indirectos o fugas

En el presente estudio, se adoptan los siguientes supuestos metodológicos:

$C_{baseline}$ = 0, dado que la biomasa residual no presenta un uso previo que implique almacenamiento estable de carbono (IPCC, 2019; IDEAM, 2022).

$E_{Eproject}$ = no fue cuantificado de forma específica dentro del alcance del estudio, en relación con la magnitud de las remociones estimadas, por lo cual no se incluye en el balance ex ante.

Si bien las emisiones asociadas a la operación del proyecto, transporte de biomasa y el proceso de conversión termoquímica existen, no se cuantifican de manera explícita, debido a que el análisis se desarrolla previo a la implementación real y de carácter estimativo.

En este contexto, dichas emisiones se consideran despreciable en comparación con la magnitud de las remociones estimadas, en concordancia con enfoques de evaluación preliminar de proyectos de remoción de carbono (IPCC, 2019; PURE.earth, 2024)

$E_{leakage}$ = 0, debido a que la biomasa utilizada corresponde a residuos sin valor comercial, por lo que no se generan desplazamientos de mercado.

Estos supuestos permiten estimar de manera conservadora el potencial de remoción neta del proyecto, priorizando la consistencia metodológica y la trazabilidad de los resultados

10 RESULTADOS

10.1 Parámetros de entrada para la estimación

Para la estimación del potencial de remoción de carbono del proyecto, se definieron los parámetros de entrada a partir de la oferta total estimada de residuos maderables identificada en el apartado 7 y de valores de referencia reportados en la literatura para procesos de pirólisis de biomasa lignocelulósica. La Tabla 3 presenta los parámetros adoptados, sus unidades y el criterio técnico utilizado para su selección

Tabla 3

Parámetros utilizados para la estimación del carbono retenido en el biochar.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Justificación
Residuos generados	$M_{residuos}$	1.120	t/año	Estimación del sector maderero en Tocancipá (apartado 7.1)
Fracción aprovechable	F_{aprov}	0,50	adimensional	Valor medio del rango 40–60 % reportado para residuos utilizables en pirólisis
Biomasa aprovechable	M_{aprov}	560	t/año	Calculado como $M_{residuos} \times F_{aprov}$
Rendimiento de biochar	$R_{biochar}$	0,50	-	Valor teórico para pirólisis en base seca
Carbono orgánico en biochar	C_{org}	0,70	t C/t biochar	Valor medio del rango 65–80 % reportado en literatura
Factor de persistencia	PF	0,80	adimensional	Supuesto bibliográfico conservador para carbono estable
Factor de conversión	$\frac{44}{12}$	3,67	-	Conversión estequiométrica estándar

Nota: Elaboración propia con base en (FAO, 2017; FEDEMADERAS, 2020; CAR, 2021; IDEAM, 2018; Lehmann & Joseph, 2015; International Biochar Initiative, 2015; PURE.earth, 2024)

10.2 Estimación del potencial de remoción de carbono

10.2.1 Biomasa residual técnicamente aprovechable

$$M_{biomasa} = 1.120 \times 0,50$$

$$M_{biomasa} = 560 \text{ t/año}$$

Este valor representa la biomasa residual equivalente seca considerada como base para la estimación de la producción de biochar y del potencial de remoción de carbono del proyecto.

10.2.2 Producción estimada de biochar

A partir de la biomasa técnicamente aprovechable, la cantidad de biochar producida se estimó mediante un rendimiento de conversión del 50 % en base seca, valor adoptado como supuesto técnico para un proceso de pirólisis controlada de biomasa lignocelulósica. La producción anual de biochar se calcula así:

$$Q_{biochar} = 560 \times 0,50$$

$$C_{biochar} = 280 \text{ t/año}$$

Por tanto, bajo los parámetros considerados, el proyecto tendría una producción estimada de 280 t/año de biochar.

10.2.3 Carbono contenido en el biochar

El carbono contenido en el biochar se estimó a partir de la masa de biochar producida y de una fracción de carbono orgánico de 0,70, adoptada como valor intermedio dentro del rango reportado para biochar lignocelulósico. El cálculo se realiza mediante la expresión:

$$C_{biochar} = 280 \times 0,70$$

$$C_{biochar} = 196 \text{ t C/año}$$

En consecuencia, la producción anual estimada de biochar contendría aproximadamente 196 t de carbono por año

10.2.4 Conversión a CO₂ equivalente

Para expresar el carbono contenido en el biochar en términos de dióxido de carbono equivalente, se empleó el factor estequiométrico 44/12. El cálculo es:

$$CO_2eq = 196 \times 3,67$$

$$CO_2eq = 718,7 \text{ t} \frac{CO_2eq}{año}$$

Así, el carbono contenido en el biochar equivale a una remoción potencial bruta de 718,7 t CO₂ eq /año.

10.2.5 Pérdidas de carbono por persistencia

Con el fin de estimar la fracción de carbono que no permanece almacenada a largo plazo, se aplicó un factor de persistencia de 0,80. Las pérdidas de carbono se calcularon como la fracción no persistente del CO₂ eq almacenado.

$$C_{loss} = 718,7 \times (1 - 0,80)$$

$$C_{loss} = 143,7 \text{ t CO}_2eq/año$$

Por consiguiente, las pérdidas potenciales asociadas a la fracción no persistente del carbono almacenado se estiman en 143,7 t CO₂ eq/año.

10.3 Estimación neta de remoción de carbono del proyecto

La remoción neta de carbono del proyecto se estimó a partir del balance entre el dióxido de carbono equivalente asociado al carbono contenido en el biochar y las deducciones correspondientes a pérdidas de permanencia, emisiones del escenario base, emisiones del proyecto y posibles fugas. Sustituyendo los valores obtenidos en los apartados anteriores:

$$CORC_{neto} = 718,7 - 0 - 143,7 - E_{project} - 0$$

$$CORC_{neto} = 575 - E_{project} \text{ t CO}_2\text{eq/año}$$

Bajo esta aproximación, la cifra de 575,0 t CO₂ eq/año, debe interpretarse como un potencial preliminar de remoción neta, sujeto a ajuste una vez se incorporen las emisiones operativas del sistema en una fase posterior de evaluación detallada.

11 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.1 Disponibilidad de biomasa residual y alcance de aprovechamiento

Los resultados obtenidos permiten identificar que en Tocancipá existe una oferta bruta de 1.120 t/año de restos maderables procedente del sector de transformación de madera, a partir del inventario preliminar de empresas y residuos presentado en el estudio. Esto evidencia un potencial de aprovechamiento para su uso como materia prima en la producción de biochar, en concordancia con el primer objetivo específico del estudio.

Sin embargo, la disponibilidad total de residuos no debe interpretarse como una cantidad completamente utilizable dentro del proyecto, ya que una parte de estos materiales puede presentar usos alternativos, pérdidas por manejo, almacenamiento inadecuado o condiciones no óptimas para su procesamiento térmico. Por esta razón, la incorporación de una fracción técnicamente aprovechable 560 t/año, resulta metodológicamente pertinente porque permite aproximar la estimación a un escenario más realista y evitar la sobrevaloración del potencial del sistema. Este criterio es coherente con el enfoque de valorización de biomasa residual, en los cuales la oferta teórica debe diferenciarse de la oferta efectivamente recuperable (FAO, 2017; CAR, 2021).

Más allá de la cantidad estimada de residuos, la viabilidad del aprovechamiento depende también de factores logísticos e institucionales, como la articulación con los generadores, la continuidad en la oferta del material y la capacidad de acopio y acondicionamiento. Por ello, el potencial identificado en Tocancipá representa una oportunidad técnica y ambiental, pero su materialización requiere condiciones operativas que garanticen el acceso estable a la biomasa residual.

11.2 Viabilidad técnica de la conversión de biomasa a biochar

Con relación al segundo objetivo específico, la definición de parámetros técnicos para la conversión termoquímica permitió estructurar una base metodológica coherente para la

estimación de la producción de biochar. El proceso fue planteado a partir de condiciones de pirólisis reportadas en la literatura para biomasa lignocelulósica, considerando un rango térmico entre 400 y 600 °C, un rendimiento de conversión en base seca cercano al 50 % y contenidos de carbono orgánico acordes con materiales de origen maderero (Lehmann & Joseph, 2015; International Biochar Initiative, 2015; PURE.earth, 2024). Bajo estos supuestos, la fracción técnicamente aprovechable de biomasa proyecta una producción de biochar de 280 t/año, de acuerdo con el rendimiento adoptado.

El estudio no incluyó ensayos de pirólisis ni caracterización directa del biochar obtenido, por lo cual los valores utilizados se entienden como supuestos sustentados en referencias técnicas y no como mediciones verificadas en condiciones operativas reales del proyecto. Esta precisión es importante, ya que el rendimiento y la calidad del biochar pueden variar según la humedad de la biomasa, la homogeneidad del material, el tiempo de residencia y el control efectivo de la temperatura durante el proceso.

Aun con estas limitaciones, la definición de dichos parámetros constituye un aporte metodológico relevante, dado que permite establecer una relación técnica entre la biomasa residual disponible y la producción potencial de biochar. De este modo, el estudio no se limita a identificar una oferta de residuos, sino que avanza hacia la valoración de su transformación bajo criterios técnicamente consistentes.

11.3 Potencial estimado de remoción de carbono

Respecto al tercer objetivo específico, los resultados muestran que la producción de biochar a partir de biomasa residual maderable presenta un potencial de remoción de carbono significativo. La estimación se construyó a partir del contenido de carbono de la biomasa, su conversión a biochar, el carbono contenido en el material resultante y la aplicación de un factor de persistencia para representar la fracción que podría permanecer almacenada a largo plazo.

La proyección de remoción neta estimada, correspondiente a 575 t CO₂ eq/año, está condicionada por los supuestos adoptados en el modelo. Este resultado es sensible a variables

como la cantidad de biomasa que realmente se puede aprovechar, el rendimiento de biochar, el contenido de carbono orgánico y el factor de persistencia adoptado. Por tanto, variaciones en cualquiera de estos parámetros modifican la magnitud final de la remoción estimada. Este comportamiento es consistente con la literatura técnica, que señala que la cuantificación del carbono removido mediante biochar depende de las características de la biomasa, de las condiciones del proceso y de la estabilidad del material obtenido (IPCC, 2019; PURE.earth, 2024).

Aunque el balance metodológico incorpora el componente de línea base, las pérdidas de carbono y las posibles emisiones asociadas al proyecto, la cuantificación de las emisiones operativas no se desarrolló dentro del alcance del trabajo. En consecuencia, la remoción neta obtenida debe entenderse como una estimación preliminar, útil para valorar el potencial del sistema, pero susceptible de ajuste en etapas posteriores mediante análisis más detallados de operación, transporte y verificación.

Estos resultados respaldan la pertinencia del biochar como alternativa de remoción de carbono donde exista disponibilidad de biomasa residual lignocelulósica. Sin embargo, la certeza de la estimación dependerá, en fases futuras, de la validación experimental de los parámetros y de la incorporación de información operativa específica del proyecto.

11.4 Potencial de aplicación en suelos degradados, limitaciones e implicaciones del estudio

Además de su aporte potencial a la remoción de carbono, el biochar podría constituir una alternativa de uso en procesos de recuperación de suelos degradados. La literatura reporta que este material puede favorecer propiedades como la retención de agua, la adsorción de nutrientes y ciertas condiciones físico-químicas del suelo (Lehmann & Joseph, 2015; Rodríguez, C, 2021; Sánchez Reinoso, Ávila Pedraza, & Restrepo Díaz, 2020), especialmente cuando se aplica en contextos de degradación como es el caso de la vereda La Esmeralda. En este estudio este aspecto se plantea únicamente como un potencial de aplicación y no como un

resultado demostrado, dado que no se realizaron ensayos experimentales ni evaluaciones de campo.

Por ello, tanto la producción de biochar como su contribución a la rehabilitación de suelos deben interpretarse como escenarios técnicamente sustentados, pero aún no verificados en el territorio de estudio.

En general, los resultados obtenidos permiten dar respuesta al objetivo general y a los objetivos específicos planteados, al identificar la oferta potencial de biomasa residual maderable en Tocancipá, definir los principales parámetros técnicos de su conversión a biochar y estimar el potencial de remoción de carbono asociado, así como su posible aplicación en estrategias de recuperación de suelos degradados.

11.5 Limitaciones del estudio

El presente estudio se basa en estimaciones teóricas y en parámetros reportados en la literatura para la producción de biochar a partir de biomasa lignocelulósica. En este sentido, valores como la fracción de carbono de la biomasa (0,50), de acuerdo con el (IPCC, 2019), y el contenido de carbono orgánico del biochar (0,70), reportado por (Lehmann & Joseph, 2015), se adoptaron como referencias técnicas para la estimación del potencial de remoción de carbono.

Una de las principales limitaciones del análisis es la ausencia de caracterización experimental directa del biochar producido, por lo que parámetros como el contenido elemental de carbono o la estabilidad del material en el suelo se estimaron a partir de información bibliográfica. Asimismo, las emisiones asociadas al proceso de pirólisis y al transporte no fueron cuantificadas de manera directa, por lo que su tratamiento dentro del balance corresponde a un supuesto metodológico de carácter preliminar.

Finalmente, el estudio se centra en la estimación del potencial de remoción de carbono desde una perspectiva técnica, sin incluir evaluaciones económicas ni estudios agronómicos

detallados sobre la aplicación del biochar en suelos locales, aspectos que podrían abordarse en futuras investigaciones.

Adicionalmente, el estudio no incluye un análisis económico detallado sobre la viabilidad financiera de la implementación de sistemas de pirólisis para la producción de biochar a partir de residuos maderables. Si bien existen iniciativas emergentes asociadas a mercados voluntarios de carbono y certificaciones de remoción de carbono que podrían generar incentivos económicos para este tipo de proyectos, su aplicación depende de factores como los costos de inversión en tecnología, la escala de producción, los mecanismos de certificación y la estabilidad del mercado de créditos de carbono. En consecuencia, la viabilidad de implementar este tipo de iniciativas en el contexto local requiere evaluaciones financieras específicas que permitan analizar costos, potenciales ingresos y mecanismos de financiamiento, aspectos que se sugieren abordar en futuras investigaciones.

12 CONCLUSIONES

El estudio permitió establecer que en Tocancipá existe un potencial de aprovechamiento de residuos maderables para su conversión en biochar, a partir de una oferta estimada de biomasa residual lignocelulósica y de la definición de una fracción técnicamente aprovechable para el proyecto.

De igual modo, se definieron los principales parámetros técnicos del proceso de pirólisis, lo que permitió proyectar la producción potencial de biochar y, con base en ello, estimar una remoción neta de carbono de 575 t CO₂ eq/año. Este resultado evidencia que el biochar representa una alternativa técnicamente sustentada para la valorización de residuos maderables y la remoción de carbono en el contexto local.

De igual manera, el estudio identificó un potencial de aplicación del biochar en procesos de recuperación de suelos degradados. Sin embargo, este aporte se plantea en términos prospectivos, dado que no fue validado mediante ensayos experimentales ni pruebas de campo.

En general, los resultados permiten concluir que la producción de biochar a partir de biomasa residual constituye una alternativa con potencial ambiental para Tocancipá. No obstante, su implementación requiere validaciones experimentales, caracterización del material obtenido y análisis complementarios que permitan fortalecer la precisión de las estimaciones realizadas.

13 BIBLIOGRAFIA

- Alcaldía de Tocancipá. (s.f.). *Información del municipio*. Obtenido de Alcaldía de Tocancipá:
<https://www.tocancipa-cundinamarca.gov.co/sala-prensa/mi-municipio/informacion-del-municipio>
- ASTM International. (2019). *Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels*.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2024). *Registro mercantil de empresas del sector madera en Tocancipá, Cundinamarca*. Bogotá.
- CAR. (2023). *Diagnóstico de residuos maderables en Tocancipá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- CAR. (2021). *Lineamientos técnicos para el aprovechamiento de residuos maderables en Cundinamarca*.
- CAR. (2023). *Reporte de afectaciones por incendios forestales y restauración de suelos en Cundinamarca*. Bogotá, Colombia.
- CAR. (2023). *Reporte de afectaciones por incendios forestales y restauración de suelos en Cundinamarca*. Bogotá, Colombia.
- Confecámaras. (2024). *(RUES) – consulta de empresas*. Obtenido de <https://www.rues.org.co>
- Congreso de la República de Colombia. (2018). *Ley 1931 de 2018 por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático*.
- DANE. (2024). *Proyecciones de población y estudios demográficos (2018-2050)*.
- DANE. (2025). *Ficha de caracterización municipal: Tocancipá*.
- Downie et al. (2012). Physical properties of Biochar.
- EBC. (2019). Guidelines for a Sustainable Production of Biocha. European Biochar Foundation. *European Biochar Certificate*. Obtenido de <https://www.european-Biochar.org>

- El Espectador. (2016). *elespectador.com*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/colombia/cundinamarca/incendio-forestal-afecta-zona-rural-del-municipio-de-tocancipa-article-623820/>
- European Biochar Certificate. (2019). *Guidelines for a sustainable production of biochar*. European Biochar Foundation.
- Extrategia Medios. (2024). *Los días 18 y 19 de enero de 2024 se han registrado incendios en Tocancipá*. Obtenido de <https://extrategiamedios.com/los-dias-18-y-19-de-enero-de-2024-se-han-registrado-incendios-en-tocancipa/>
- FAO. (2017). *Forest product conversion factors*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *Bioenergy and Carbon Sequestration Manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). *MRV Systems for Agriculture and Forestry*.
- FEDEMADERAS. (2020). *Diagnóstico de la cadena forestal-maderera en Colombia*.
- Gobierno de Colombia. (2015). *Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Colombia*.
- IDEAM. (2005). *Atlas interactivo, clasificación de los climas*.
- IDEAM. (2014). *Cambio climático*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>
- IDEAM. (2018). *Factores de emisión y parámetros de biomasa forestal para Colombia*.
- IDEAM. (2019). *Boletín climatológico mensual*.
- IDEAM. (2021). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2022). *Guía para la cuantificación y reporte de emisiones de gases efecto invernadero en proyectos forestales y de biomasa en Colombia*.
- IDEAM. (2025). *Monitoreo de focos de calor y suelos degradados en la Sabana de Bogotá y provincia de Ubaté-Chiquinquirá*.

- IGAC. (2023). *cartografía oficial permite identificar la delimitación territorial y características geográficas del municipio de Tocancipá*.
- INFOBAE. (2026). *INFOBAE*. Obtenido de <https://www.infobae.com/colombia/2023/08/27/en-tocancipa-los-bomberos-controlaron-un-incendio-de-gran-magnitud-tras-4-horas-de-lucha-contra-las-llamas/>
- International Biochar Initiative. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil*. International Biochar Initiative.
- International Biochar Initiative. (2015). *Testing protocols*.
- International Organization for Standardization. (2019). *Greenhouse gases—Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements*. ISO. GENEVA: International Organization for Standardization.
- IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO. (2017). *ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Earthscan.
- MADS. (2015). *Decreto 1076 de 2015*.
- MADS. (2020). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Colombia*. Gobierno de Colombia.
- MADS. (2023). *Mercado voluntario de carbono en Colombia: Oportunidades para proyectos de mitigación*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MAVDT. (2008). *Resolución 909 de 2008. Normas y estándares de emisión para fuentes fijas*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

MinAmbiente. (2019). *Guía técnica para el uso sostenible de biomasa residual en Colombia*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Periodismo Público. (2016). *Graves afectaciones por incendio forestal en Tocancipá*.

POMCA. (2019). *Resolución 0957 de 2019*.

PURE Earth. (2024). *Biochar Carbon Removal Certification Framework (CORC Methodology)*.

PURE.Earth. (2022). *Biochar carbon removal methodology*.

PURE.earth. (2024). *CORC Biochar v1.2 (elegibilidad, PF por H/Corg, ecuación CORC Neto)*.

Rodríguez, C. (2021). *Evaluación del Biochar de origen maderable en la retención de agua y mejora de suelos andinos*. Bogotá: Revista Colombiana de Ciencias Ambientales.

Sánchez Reinoso, A. D., Ávila Pedraza, E. A., & Restrepo Díaz, H. (2020). Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319079758015.pdf>

UNAL. (2024). *Planta Piloto de Ingeniería Química – Sede Bogotá*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

UNAL. (2025). *Biochar en Colombia, hacia una agroindustria sostenible*. Facultad de Minas, Sede Medellín. Obtenido de <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/6371-biochar-en-colombia-hacia-una-agroindustria-sostenible>

14 ANEXOS

Anexo A1

Normativa colombiana.

Normatividad	Descripción breve	Referencia	Relación con el proyecto
Ley 1931 de 2018	Establece directrices para la gestión del cambio climático en Colombia.	Congreso de la República (2018). Ley 1931 de 2018	Promueve acciones de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), dentro de las cuales se incluyen tecnologías de remoción de carbono como el biochar.
Ley 2232 de 2022	Establece medidas para promover la economía circular y el aprovechamiento eficiente de recursos en Colombia.	Congreso de la República (2022). Ley 2232 de 2022.	El proyecto promueve la valorización de residuos maderables mediante su transformación en biochar, contribuyendo a modelos productivos circulares y sostenibles.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Decreto 1076 de 2015	Regula la gestión ambiental y el cumplimiento de la normativa aplicable al manejo de residuos y procesos industriales.
Resolución 909 de 2008	Establece las normas y estándares de emisión para fuentes fijas en Colombia.	Ministerio de Ambiente (2008)	El proceso de pirólisis implementado en el proyecto debe cumplir con los límites máximos permisibles de emisiones atmosféricas.

Nota. Elaboración propia con base en leyes, decretos y resoluciones del marco normativo ambiental colombiano.

Anexo A2*Estándares y metodologías de carbono.*

Normatividad	Descripción breve	Referencia	Relación con el proyecto
PURE.Earth – Metodología CORC v1.2 (2024)	Estándar internacional para la certificación de remoción de carbono mediante biochar.	PURE.Earth (2024). Biochar Carbon Removal Certification Framework	Define los criterios para certificar la remoción de carbono y establece que el carbono almacenado en biochar debe tener una permanencia mínima de 100 años.
ISO 14064-2	Norma internacional para la cuantificación, monitoreo y reporte de reducciones o remociones de emisiones de GEI en proyectos.	ISO 14064 - 2:2019	Sirve como base para el diseño del sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) del proyecto.
IPCC Guidelines (2019 Refinement)	Directrices internacionales para la elaboración de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.	IPCC (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines	Proporciona metodologías para la cuantificación de emisiones evitadas y remociones de carbono asociadas al proyecto.

Nota. Elaboración propia con base en estándares y metodologías internacionales de cuantificación y certificación de carbono.

Anexo A3*Normas técnicas de caracterización.*

Normatividad	Descripción breve	Referencia	Relación con el proyecto
ISO/IEC 17025:2017	Requisitos para la competencia técnica de laboratorios de ensayo y calibración.	ISO/IEC 17025:2017	Los análisis fisicoquímicos del biochar deben realizarse en laboratorios acreditados bajo esta norma.
ISO 23470:2018	Norma para la determinación de carbono orgánico y calidad de datos en suelos.	ISO 23470:2018	Aplica para la evaluación del carbono en suelos antes y después de la aplicación del biochar.
ASTM E871	Método estándar para determinar el contenido de humedad en biomasa sólida.	ASTM E871	Se emplea para determinar la masa seca elegible de biomasa utilizada en el proceso de pirólisis.
ISO 17225-1	Clasificación y especificaciones de biocombustibles sólidos derivados de biomasa.	ISO 17225-1	Define parámetros para el análisis elemental y la relación molar H/Corg del biochar.

Nota. Elaboración propia con base en normas técnicas internacionales de caracterización.

Anexo B1*Matriz de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV).*

Componente	Variable principal	Und	Medio de verificación	Finalidad
Abastecimiento de biomasa	Masa de biomasa residual recibida	t	Registros de ingreso y pesaje	Verificar la cantidad de materia prima disponible para el proceso
Calidad de biomasa	Contenido de humedad	%	Reportes de laboratorio o fichas de caracterización	Ajustar la biomasa a base seca para la estimación
Producción de biochar	Cantidad de biochar producido	t	Registros de producción y pesaje	Determinar el rendimiento de conversión
Calidad del biochar	Contenido de carbono orgánico	fracción	Reportes de laboratorio o valores de referencia metodológica	Estimar el carbono contenido en el biochar
Estabilidad del carbono	Factor de persistencia (PF)	fracción	Criterios metodológicos y/o caracterización del biochar	Estimar la fracción de carbono estable
Remoción estimada	CO ₂ equivalente almacenado	t CO ₂ eq/año	Memoria de cálculo	Cuantificar la remoción potencial de carbono
Balance del proyecto	Emisiones del proyecto y fugas	t CO ₂ eq/año	Registros operativos y supuestos metodológicos de remoción neta	Ajustar la estimación

Nota. Elaboración propia con base en los lineamientos metodológicos del estándar (PURE Earth, 2024) y la ISO 14064-2. La matriz se presenta como propuesta conceptual de seguimiento para una eventual implementación del proyecto.