

MFCA-LCA model for determining product cost and environmental impact in the sawn timber industry

Modelo MFCA-LCA para determinar el costo del producto y el impacto ambiental en la industria de la madera aserrada

José Tello Ávila^{1*} & Estela Rodríguez Quezada²

¹ Dr. School of Auditing and Management Control Engineering, Universidad de Talca, Talca, Chile. jtello@utalca.cl

² Magíster, Departamento de Gestión Empresarial, Universidad del Bío-Bío, Chillán, Chile.

Received: 10/11/2025

Accepted for publication: 10/12/2025

Published: 31/12/2025

ABSTRACT

The purpose of this article is to present the design and application of a cost accounting model for the sawn timber industry, which serves as a tool not only for determining the cost of the product, but also the environmental impact of logging standing forests and transforming them into wood parts and pieces. The relevance of this work lies in the importance of forests and, in particular, the significant impact that logging has on the environment and climate change. The design proves its effectiveness as a tool to support decisions on the felling of standing forests, as it allows measurements to be taken both in the forward flow, i.e., from the standing forest to the final product, and in the reverse flow, i.e. From the final product to estimate, the density of forest mass to be exploited for its production. This allows relevant data to be incorporated into the decision-making process to estimate the loss of greenhouse gas capture capacity that logging means for the production of wood parts and pieces.

Keywords: Material flow accounting, life cycle, environmental impact.

RESUMEN

El presente artículo tiene el propósito de dar a conocer el diseño y aplicación de un modelo de contabilidad de costos para la industria de madera aserrada, que sirva como herramienta no sólo para determinar el costo del producto, sino también el impacto ambiental que significa la tala del bosque en pie y su transformación en partes y piezas de la madera. La relevancia de este trabajo radica en la importancia que tienen los bosques y especialmente el significativo impacto que su tala produce al medio ambiente y al cambio climático. El diseño elaborado demuestra su eficacia como herramienta para apoyar las decisiones de tala de bosque en pie, ya que permite mediciones tanto en el flujo hacia adelante, es decir desde el bosque en pie hasta el producto final, como en el flujo inverso. Esto es a partir del producto final, estimar la densidad de masa forestal a explotar para su concreción; permitiendo de esta forma incorporar datos relevantes en el proceso decisional para estimar el sacrificio de capacidad de captura de gases de efecto invernadero que significa la tala del bosque para la producción de partes y piezas de la madera.

Palabras clave: Contabilidad del flujo de materiales, ciclo de vida, impacto ambiental.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y sus consiguientes riesgos hacen imperativo adoptar enfoques de gestión innovadores con miras a la optimización económica y la reducción de la contaminación ambiental. Esta necesidad ha impulsado el desarrollo de sistemas de contabilidad de costos ambientales, tales como la contabilidad de costos enfocada en la ecología y la contabilidad de costos orientada a procesos, originada principalmente en las regiones de habla alemana en la década de 1990 (Dierkes & Siepelmeyer, 2019).

La industria forestal es ampliamente reconocida como una de las actividades industriales con mayor impacto ambiental. Esto se debe a que los bosques desempeñan un papel fundamental en la mitigación de los gases de efecto invernadero, siendo esenciales para contrarrestar su acumulación en la atmósfera. La deforestación, sin embargo, tiene un efecto negativo en la capacidad de los bosques para capturar estos gases y convertirlos en oxígeno, contribuyendo a un desequilibrio en el ciclo natural (Sione et al., 2021).

Al mismo tiempo, la industria forestal es una de las principales fuentes de ingresos económicos a nivel mundial, generando anualmente una cifra considerable de \$660.000 millones (FAO, 2022). A nivel local, su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) alcanza un 3% anual.

Esta dualidad destaca la importancia de medir de manera precisa y comprensiva el impacto ambiental de la industria, tanto en términos financieros como ecológicos. Tal evaluación se vuelve un objetivo crucial en el desarrollo de políticas y regulaciones dirigidas a mitigar los efectos del cambio climático.

Los modelos de Contabilidad de Costo del Flujo de Materiales (FMCA) y el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) se erigen como los pilares para la creación de un modelo integral. Este modelo busca amalgamar tanto el flujo de materiales como el ciclo de vida, con el fin de determinar el costo de producción y el impacto ambiental correspondiente a cada categoría de producto en la industria de la madera aserrada.

Para su elaboración y evaluación, se recurrió a datos provenientes de la forestación de bosques de pino insigne, su cosecha y procesamiento posterior específicamente de la industria de la madera aserrada en la Región del Maule, Chile, con un énfasis particular en la provincia de Talca.

El modelo resultante se caracteriza por su fácil comprensión, aplicación simplificada y eficacia en la medición de los costos de los productos de madera en sus diferentes partes y piezas, así como en la evaluación del impacto ambiental que cada uno de ellos conlleva. Además, demuestra flexibilidad al permitir

mediciones tanto en el flujo de avance (desde el bosque hasta el producto final) como en el flujo inverso (desde el producto final hasta las áreas forestales), incluyendo su capacidad de captura de gases de efecto invernadero a sacrificar.

ANTECEDENTES

Según el informe del programa Bosques del Mundo del Organismo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), todas las personas dependen en mayor o menor medida de los bosques y su biodiversidad. Estos ecosistemas sostienen más de 86 millones de empleos verdes y respaldan los medios de subsistencia de muchas otras personas. El estudio sobre la biodiversidad de los bosques destaca la trascendencia global de estas zonas, ya que las personas dependen de ellas para la recolección de frutos, la producción de madera y leña, y la prestación de otros servicios esenciales. Además, los bosques proveen agua, desempeñan un papel en la mitigación del cambio climático y brindan hábitats vitales para numerosos polinizadores, los cuales son fundamentales para garantizar la producción de alimentos de manera sostenible. Cabe destacar que aproximadamente el 75% de los cultivos alimentarios principales, que representan el 35% de la producción global de alimentos, dependen de la polinización animal, lo cual subraya la relevancia de los bosques como refugio de la biodiversidad mundial. Por ejemplo, el 80% de las especies de anfibios, el 75% de las especies de aves y el 68% de los mamíferos encuentran su hogar en los bosques (ONUAA, 2020).

La industria forestal

En Chile, las plantaciones forestales abarcan aproximadamente 3,11 millones de hectáreas, lo que equivale al 17,7% del total de bosques del país, según la actualización del catastro vegetacional realizado por CONAF en 2021. De éstas, un 93% consiste en especies forestales de rápido crecimiento, destacando el *Pinus Radiata* (pino insigne), que representa el 60%, y los *Eucalyptus Globulus* y *Eucalyptus Nitens* (33% en conjunto). No está demás recordar que el presente trabajo se realizó en base a la variedad Pino Insigne.

Según Nuñez & Aedo (2011), esta variedad se caracteriza por su adaptación exitosa al clima y suelo chilenos. Ha desempeñado un papel esencial en la prevención de la erosión en regiones como el Maule, el Biobío y la Araucanía. Además, el pino insigne ofrece cualidades deseables para la industria, como su fibra larga y facilidad de manejo, lo que lo convierte en un recurso muy demandado en la industria de la madera y la celulosa.

Watt & Trincado (2019) describen al pino insigne como una especie de rápido crecimiento y relevancia en las plantaciones

forestales, habiendo mejorado considerablemente su productividad en las últimas décadas gracias a la optimización de la silvicultura y la genética. Las características similares son resaltadas por Núñez & Aedo (2011) en su investigación sobre el manejo de esta variedad en Chile. Además, según Meneses & Guzmán (2000), las masas forestales de pino insigne en Chile constituyen el núcleo de plantaciones más significativo a nivel mundial, gracias a su estructura de edades que permite un aumento continuo en los niveles de cosecha.

Los bosques y la mitigación del impacto ambiental

Uno de los aspectos fundamentales de los bosques es su contribución sustancial a la mitigación del cambio climático, ya que poseen la capacidad de capturar gases de efecto invernadero de la atmósfera. Los árboles, al absorber el CO₂, contribuyen a su almacenamiento en la biomasa. Prado (2015) destaca que las plantaciones forestales, debido a su rápido crecimiento, funcionan como sumideros netos de CO₂. No obstante, los bosques nativos, aunque son reservorios de carbono, emiten importantes cantidades de CO₂, lo que subraya la relevancia del manejo de las plantaciones, incluyendo la preparación del suelo, la elección de especies, el control de incendios y la fertilización para maximizar la captura de CO₂, especialmente en el caso del pino radiata (ODEPA, 2010).

A partir del estudio "Estimación del carbono capturado en las plantaciones de Pino radiata y Eucaliptos relacionadas con el DL-701 de 1974", realizado por ODEPA en 2005; se estimó el inventario de carbono capturado por estas plantaciones. El estudio abarcó desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Lagos, excluyendo los bosques nativos, y estimó que la superficie total de pino radiata ascendía a 815.399 hectáreas. Según sus resultados, el inventario actual de carbono en las plantaciones efectivas es de alrededor de 33,27 millones de toneladas cúbicas (tC), con 28,09 millones de tC correspondientes a plantaciones de pino radiata. A nivel nacional, esto equivale a alrededor de 122 millones de toneladas de CO₂ capturadas desde la atmósfera (ODEPA, 2010). En promedio, cada hectárea de pino radiata en Chile ha capturado 34,45 tC de CO₂ desde la atmósfera. Esta cifra se basa en una hectárea promedio con 10,5 años de antigüedad y un volumen de madera sólida por hectárea de 95,7 m³ ssc (ODEPA, 2010).

De acuerdo con Cargua (2014), quien estudió la cuantificación de carbono en una plantación de 100 hectáreas de Pino Radiata y estrato de Páramo en el Parque Nacional Sangay, Ecuador, en 2013, existe una relación directa entre los bosques en crecimiento y la absorción de CO₂, con pruebas claras del impacto en la velocidad de captación. En otras

palabras, mientras el bosque esté en una etapa de crecimiento, capturará más CO₂ de manera más rápida desde la atmósfera.

La contabilidad de costos del flujo de materiales

La Contabilidad de Gestión Ambiental (EMA, por sus siglas en inglés) se define como el proceso de identificación, recopilación, estimación, análisis y reporte interno de datos relacionados con el uso de materiales y flujos de energía, así como información de costos ambientales y otros costos, con el propósito de respaldar tanto las decisiones convencionales como las ambientales dentro de una organización (Xiaomei, 2004). Su enfoque ha sido desarrollado para superar las limitaciones inherentes a la contabilidad de gestión tradicional en términos de abordar aspectos de gestión y decisiones relacionadas con asuntos ambientales, incluyendo costos e impactos asociados. Por lo tanto, se considera que la EMA es una herramienta clave que permite mejorar la relación entre el retorno económico de las actividades y su impacto ambiental, logrando así la reducción de costos y la minimización de los efectos ambientales resultantes de dichas actividades.

En este mismo contexto, la Contabilidad de Costos del Flujo de Materiales (MFCA por sus siglas en inglés) es un término que surgió del Institut für Management und Umwelt (IMU) de Alemania. Diseñada como una herramienta para organizaciones, busca evaluar los flujos de materiales y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, generando así mejoras en el desempeño ambiental y económico. Debido a su enfoque en la optimización de la producción en términos de materiales y medio ambiente, el modelo MFCA captó la atención de las autoridades gubernamentales de Japón a principios de la década del 2000. El Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) inició un plan para promover la adopción de la MFCA en el entorno empresarial japonés. Este esfuerzo culminó en la creación del "Proyecto de Promoción de Contabilidad de Gestión Ambiental" y finalmente en la publicación de la "Guía para la Contabilidad de Costos de Flujo de Materiales" en 2007. Tanto Alemania como Japón se destacaron por impulsar la producción ambientalmente sostenible a través de la implementación de la MFCA en sus empresas. Cabe resaltar que las versiones de MFCA desarrolladas por ambos países difieren en sus enfoques, ya que la versión japonesa se centra en líneas de productos o procesos, mientras que la versión alemana se orienta hacia la gestión de toda la instalación productiva (IFAC, 2005).

En 2011, la Organización Internacional de Normalización (ISO) publicó la norma ISO 14.051: "Contabilidad de Costos de

Flujos de Materiales", que proporciona un marco de referencia para la adopción de la MFCA. Esta norma establece la MFCA como una herramienta de gestión que ayuda a las organizaciones a comprender las consecuencias ambientales y financieras de sus prácticas de uso de materiales y energía, permitiendo mejoras en ambos aspectos a través de cambios en la gestión y cuantificación de dichas prácticas (ISO 14.051, 2011).

De acuerdo con Bieres (2015), la MFCA es un enfoque contable orientado a la identificación y valoración monetaria de las ineficiencias en los procesos de producción, modelando el entorno de producción como un sistema de flujos y centros de cantidad, o procesos. Esta perspectiva más amplia de la MFCA permite identificar los puntos críticos del sistema de producción analizado.

Por otro lado, Bierer, Sygulla y Götze (2015) indican que el objetivo principal de la MFCA es respaldar los análisis centrados en los flujos de materiales y la toma de decisiones para mejorar la eficiencia de recursos y costos. Esto permite identificar y cuantificar pérdidas materiales, convirtiéndolas en el foco de las decisiones de gestión.

El procedimiento general de la MFCA comprende tres pasos fundamentales: 1) modelado de la estructura de flujos, 2) cuantificación de los flujos y 3) valoración monetaria del sistema de flujos. El modelado implica la identificación de los límites del sistema, los centros de cantidad y los flujos de materiales para configurar el MFCA. La cuantificación de flujos aborda las cantidades de materiales y energía utilizadas en un período de tiempo determinado. Finalmente, en la valoración monetaria se evalúa el sistema de flujos para resaltar los efectos adversos de las ineficiencias en el uso de materiales y energía.

Guenther, Jasch, Schmidt, Wagner & Ilg (2015) resaltan que la MFCA se centra en la relevancia monetaria de los flujos y pérdidas de materiales físicos para las empresas. Al cuantificar los flujos de materiales físicos, no solo se proporciona una base para el análisis técnico, sino que también se realiza una evaluación ambiental que contribuye a la optimización económica, ya que todos los flujos se evalúan en términos monetarios.

Así, la MFCA posibilita la identificación de usos ineficientes de materiales y energía desde una perspectiva económica y ecológica. Señala oportunidades económicamente ventajosas para las organizaciones, permitiendo el ahorro de recursos, emisiones y residuos con impacto ecológico. La MFCA debe considerarse como una herramienta de control de gestión que se aplica regularmente y se integra con la contabilidad tradicional.

De manera similar, el enfoque de MFCA analiza los aspectos ambientales de una organización, incluyendo el seguimiento y monitoreo de residuos generados por la producción, así como el consumo eficiente de materiales y su manejo. La MFCA es un método que abarca tanto el seguimiento de los aspectos ambientales como el análisis de los costos de residuos, el consumo racional de materiales, el uso de energía y la amortización de inversiones (Kouřilová J. y Sedláček J. 2014).

De acuerdo con la ley de conservación de la masa y la energía, así como de las fuentes financieras, los residuos también poseen un valor. En este contexto, los desechos no son simplemente un resultado negativo, sino que incorporan la energía utilizada, los materiales y otros recursos que no se transforman en productos positivos y quedan sin utilizar en la empresa (Kouřilová J. y Sedláček J. 2014). En consecuencia, el enfoque MFCA permite un análisis detallado desde la materia prima utilizada en la producción de un bien, su proceso de fabricación, uso del producto y su destino final en términos de reciclaje, desecho o reutilización.

En última instancia, de acuerdo con la norma ISO 14.051 sobre Gestión Ambiental de la Contabilidad de Costos de Flujos de Materiales, la producción, el reciclaje y otros sistemas deben representarse mediante modelos visuales que ilustren múltiples centros de costos en los cuales los materiales se almacenan, usan o transforman, junto con los movimientos de materiales entre esos centros de costos. Este modelo visualiza el flujo total de materiales dentro de los límites definidos para el análisis de la MFCA.

Análisis del Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se refiere a la recopilación y evaluación de los impactos ambientales que surgen a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. LCA es una técnica que considera los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales y, finalmente, interpretando los resultados en relación con los objetivos del estudio (ISO 14.040, 2006).

Un proceso típico de LCA consta de cuatro fases clave: 1) definición de los objetivos y alcance del análisis, 2) análisis del inventario, 3) evaluación de impacto y 4) interpretación de los resultados. Estas fases están interrelacionadas y se sustentan mutuamente para lograr una evaluación coherente de los aspectos ambientales y su impacto en el entorno, en consonancia con los objetivos de la organización.

En resumen, la EMA y la MFCA son enfoques contables que permiten evaluar y mejorar la gestión ambiental de una organización, optimizando la relación entre eficiencia económica e impacto ambiental. Estos enfoques son esenciales para la toma de decisiones informadas y la identificación de oportunidades de mejora en términos ambientales y financieros. Por otro lado, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una técnica que evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida, contribuyendo a la comprensión y mitigación de los impactos ambientales asociados. Estas herramientas son fundamentales en la gestión sostenible de organizaciones y productos, promoviendo la consideración integral de los aspectos ambientales en la toma de decisiones y operaciones empresariales.

Método de medición

Según Zou et al. (2019), la MFCA es una herramienta que permite cuantificar y rastrear el flujo de materiales y el inventario de materias primas, energía, y costos del sistema en un proceso de producción; aunque también permitir encontrar deficiencias en el proceso.

Bajo este modelo, se obtienen flujos positivos y negativos de materiales que se pueden calcular de acuerdo con el movimiento secuencial de materiales y de energía dentro de los distintos procesos. Además, se pueden identificar los costos de materiales, costos de energía, costos del sistema o proceso y los costos de desechos o desperdicios. A diferencia con la forma común de contabilizar costos, según el estudio realizado por Zou et al., 2019. El modelo MFCA se diferencia especialmente en su propósito central de identificación de desechos y desperdicios, considerando todas las pérdidas materiales como desperdicios o salidas que no son productos y que se denominan “inventarios negativos”.

Asimismo, el análisis del ciclo de vida, también conocido como el análisis “de la cuna hasta la tumba”, se considera la herramienta del modelo que permite determinar y evaluar los efectos ambientales de productos, procesos y actividades (Roy et al., 2009a).

Así entonces, los flujos de materiales se basan en el principio del ciclo de vida completo, el que consta de una serie de actividades interrelacionadas que crean valor, incluidos los recursos, la fabricación, logística, el uso, eliminación y reciclaje (Ver figura 5). Los productos positivos son los que se pueden vender directamente o pasar al siguiente proceso. Los productos negativos se refieren a los residuos, que pueden aportar valor a la empresa, pero también tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Los costos sistemáticos son los costos incurridos en el curso del manejo interno de los

flujos de materiales. Los costos del daño ambiental de los residuos representan la contaminación y los daños causados en el ambiente externo por la descarga de desechos, y se cuantifican por su valor monetario. Y por último está el valor económico agregado que se refiere al incremento del valor un producto formado por los recursos que se mueven a través de cada eslabón

METODOLOGÍA, MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo combina la Contabilidad del Flujo de Materiales (MFCA) con el Análisis del Ciclo de Vida (LCA). La MFCA es un método normalizado (ISO 14051) que mejora la eficiencia material y energética al focalizarse en las pérdidas de materiales y calcular su costo real; esto se consigue asignando a los residuos los costes proporcionales de energía, materiales, personal y demás gastos generales incurridos a lo largo del proceso. Por su parte, el LCA es una herramienta de gestión ambiental que evalúa los impactos ambientales de productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final o reciclaje. Está regulado por las normas ISO 14040/44 e incluye cuatro etapas básicas: definición de objetivos y límites del sistema, inventario del ciclo de vida, evaluación de impactos y la interpretación de los resultados.

Integrar ambos instrumentos permite obtener una “visión de flujo” que cuantifica simultáneamente el costo de los materiales (incluidos los residuos) y los impactos ambientales asociados. Este enfoque se conoce como MFCA-LCA; consiste en un modelo de flujo integrado y un método de contabilización que evalúa el valor del daño ambiental y el costo de los flujos materiales, e incluye pasos de implementación para una evaluación exhaustiva.

Fuentes de datos

El estudio utiliza información de plantaciones de *Pinus radiata* en la Región del Maule (Chile). Se recabaron datos de densidad de árboles por hectárea, volúmenes promedio de madera (400 m³ por hectárea), rendimiento de trozas y distribución de productos y residuos a partir de reportes del Instituto Forestal de Chile (INFOR, 2020) y la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2010). También se consultaron estudios científicos sobre la capacidad de captura de carbono de las plantaciones de *Pinus radiata* y su relación con la edad del bosque.

Procedimiento MFCA

Definición del sistema y límites : Se delimitaron las etapas del proceso productivo de un aserradero tipo: compra de bosque en pie, trozado, descortezado, aserrado, canteado, despuntado, secado y cepillado. Para cada proceso se

identificaron entradas y salidas de materiales, energía y mano de obra.

Medición de flujos de materiales: Se aplicó el método de Huber para calcular el volumen de las trozas de madera (centrándose en la sección transversal del punto medio) y se convirtieron los volúmenes a pulgadas cúbicas para relacionarlos con la cantidad de bosque en pie necesaria por producto. Se elaboraron factores de conversión para distribuir una troza estándar en productos positivos (madera aserrada) y productos negativos (astillas, corteza, aserrín y lampazos).

Asignación de costos: Siguiendo la lógica MFCA, cada flujo se categorizó como producto positivo o negativo y se asignaron los costos de materiales, energía y procesos. Los productos negativos se valoraron considerando el coste total de su producción y potenciales ingresos por su venta o reutilización.

Cálculo del valor añadido: Se analizó el valor económico agregado en cada eslabón de la cadena (región, comuna, empresa, taller) para relacionar los costos de transformación con el flujo de materiales y estimar la rentabilidad de cada categoría de producto.

Procedimiento LCA

Definición del objetivo y alcance: El LCA se centró en el ciclo “de la cuna a la puerta”, evaluando las etapas desde la plantación del pino hasta la obtención del producto aserrado, incluyendo el manejo forestal, la tala, el transporte y el proceso industrial.

Inventario del ciclo de vida (LCI): Se construyó un inventario de inputs y outputs: consumo de energía (electricidad y combustibles fósiles), uso de agua, emisiones de CO₂ y otros contaminantes, así como generación de residuos en cada fase del proceso.

Evaluación de impactos (LCIA): Se cuantificaron impactos potenciales tales como calentamiento global, acidificación y eutrofización. La elección de las categorías se basó en la relevancia ambiental del sector forestal y el acceso a bases de datos secundarias (e.g., ecoinvent) que complementan los datos primarios.

Interpretación y retroalimentación: Los resultados del LCA se interpretaron para identificar los procesos con mayor contribución a los impactos y se conectaron con los resultados de la MFCA para proponer medidas de optimización (reducción de residuos, eficiencia energética, aprovechamiento de subproductos). Este análisis integrado informó ajustes al diseño del modelo para maximizar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales.

Modelo MFCA-LCA integrado

El modelo resultante representa de manera tridimensional (organización, flujo de materiales y flujo de valor) los procesos de la industria de la madera aserrada. Permite medir flujos hacia adelante (del bosque en pie al producto final) y hacia atrás (del producto al bosque), estimando la masa de bosque necesaria para un volumen dado de producto. La MFCA ofrece una asignación detallada de costos a cada flujo, mientras que la LCA aporta la evaluación de los impactos ambientales. La integración de ambos permite analizar, de manera sistemática, el valor económico y el daño ambiental de cada producto, sirviendo como herramienta para tomar decisiones sobre tala, producción y estrategias de economía circular.

RESULTADOS

Ajustes al modelo MFCA-LCA

Considerando el modelo MFCA y LCA bajo la lógica planteada por Zeng et al (2021), y dado que ello es coherente con lo que Zou et al (2019) diseñaron como modelo de tres dimensiones (3D) que considera la circulación de materiales desde el ciclo de vida excediendo a la organización y enmarcándolo en la teoría de economía circular; se plantea un diseño que incorpora estas tres dimensiones: 1) organización, 2) flujo de materiales, y; 3) flujo de valor. Así los flujos de materiales se basan en el principio de ciclo de vida completo.

Así, la propuesta de diseño incluye el valor económico agregado que se refiere al incremento del valor un producto formado por los recursos que se mueven a través de cada eslabón. Las dimensiones organizacionales de abajo hacia arriba se dividen en cuatro niveles, que, para el caso del aserradero utilizado en este trabajo, serían: Región del Maule, Comuna de San Clemente, empresa y taller ordenados de macro a micro.

El marco sistemático del modelo 3D considera tres partes: base común, metodología y modo de aplicación.

Diseño final del modelo contable

El modelo MFCA combinado con el modelo LCA para la industria de la madera aserrada, va desde el bosque en pie hasta los productos finales o productos terminados. Así, la entrada de materiales se origina en la compra de bosque en pie de pino insigne, donde los procesos para obtener las trozas son la poda, el raleo y la cosecha, donde en cada proceso se generan productos negativos. Así también puede formar parte de la entrada la compra de trozas con corteza, que no requieren procesos adicionales en esta etapa. Luego están los procesos de producción tales como: descortezado, partidora, canteado, despuntado, secado y cepillado donde se obtiene

los productos finales. En dichos procesos se obtienen tanto productos positivos como negativos, éstos últimos correspondiente a los residuos o pérdidas de material.

En la industria de madera aserrada se obtienen productos intermedios, tales como palos, vigas o tablas en bruto y en diferentes dimensiones; o con mayor grado de elaboración, como tablas y otras partes y piezas de la madera cepillados y en condiciones de ser usados en distintas industrias. Así también, en cada uno de los procesos se producen desechos o residuos tales como cortezas, aserrín, despuntes, etc., los cuales pueden ser reprocesados, vendidos en su estado natural o enviados a su disposición final.

El modelo MFCA-LCA para la industria de la madera aserrada en su flujo inverso permite, a partir de la cuantificación de las pulgadas cúbicas de madera que significa cada producto intermedio o terminado, determinar la masa boscosa que se debe sacrificar para la obtención de la madera en cantidades de pulgadas cúbicas de bosque en pie suficientes para lograr un volumen de producto deseado. Ahora bien, considerando los datos aportados por el Instituto Forestal de Chile (INFOR), se elaboraron las siguientes conversiones:

Densidad de árboles por hectárea plantada

El crecimiento de los árboles en un bosque depende de la capacidad de cada uno para competir por la luz del sol, y a nivel radicular, por el agua y los nutrientes (Sotomayor et al., 2002), y para el caso del pino insignie, las plantaciones se clasifican según el crecimiento de los dominantes (D), los codominantes (C), los intermedios (I) y los suprimidos (S). Considerando lo anterior, la selección para cosecha debe favorecer siempre a los árboles dominantes (D) y codominantes (C), y sólo circunstancialmente a los intermedios (I).

La densidad estimada en plantaciones de especie Pino Radiata es de 1.600 a 2.000 árboles por hectárea, la clasificación de ellos parte de entre los 4 a 6 años de plantados, cuando comienzan a diferenciarse por su tamaño, ya sea en su tronco como en sus ramas.

El manejo de las plantaciones de la especie Pino Radiata fue establecido por INFOR en el año 2000; según el cual, la cosecha se deriva a aproximadamente cuando el árbol logra entre 28 a 32 metros de altura, con una edad estimada entre 22 a 25 años. Al transcurso entre 25 a 30 años se cosecha la totalidad de árboles.

Luego, se estima que, por cada hectárea de bosque en pie de pino insignie, se pueden obtener de 300 a 500 metro cúbicos (m³) de madera (Sistema de Gestión Forestal, s.f.) Obteniendo la media de dicha estimación, para efectos de las conversiones

del modelo se establece que, en una tala normal, se obtendrán 400 m³ de madera en forma de trozas como producto positivo; y los desechos, residuos y desperdicios como productos negativos.

Método de medición de volumen Huber

El método es utilizado para medir el tronco de un árbol, o denominado árbol trozado, se basa en la hipótesis de asimilarlo a un cilindro cuya base y altura corresponden respectivamente a la selección media y a la longitud de dicho tronco (Juárez Félix, 2014). Esta fórmula mide el diámetro a la mitad de total longitudinal con se explica en la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\pi}{4} * Dm^2 * L$$

$$v = 0,7854 * Dm^2 * L$$

$$v = Sm * L$$

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2 \quad \frac{\pi}{4} = 0,7854$$

$$Sm = 0,7854 * Dm^2$$

$$Dm = \frac{(D1 + D2)}{2}$$

Donde;

A = Área de forestal de circunferencia

v = Volumen del tronco

π = Número constante igual a 3,1416

Dm = Diámetro medio de longitud entre dos caras

D = Diámetro del tronco

L = Longitud del tronco

Sm = Sección a la mitad de la longitud

1 metro cubico (m³) = 61023.74 pulgada cubica [(in)³]

Luego, y considerando una productividad de 400 m³ de madera por hectárea, y la conversión Huber, por cada hectárea cosechada se obtienen 24,4 millones de pulgadas cúbicas.

Por tanto, considerando una troza estándar con largo (L) 3,20 metros, diámetro 1 (D1) de 0,55 metros, diámetro 2 (D2) 0,45 metros; se obtiene un Dm de 0,50 metros y un Dm² de 0,25 m². Y luego, considerando la longitud (L) y la sección media (Sm) se obtiene un volumen (V) de 0,62832 m³ de madera. Finalmente, convirtiendo ello a pulgadas cúbicas (in³) se obtiene que una troza estándar de pino insignie tiene un volumen de 38.342,44 in³.

Estimación de la distribución de la troza en un proceso normal de aserrado

Para las estimaciones de madera aserrada, residuos, desechos y desperdicios, se consideran los datos reportados por el INFOR en su informe “Elaboración de una Industria de Aserrío en Chile” del año 2020. Con ello, se considera que cada troza estándar de madera de pino insigne se distribuye de la siguiente forma (ver tabla 1):

Tabla 1. Distribución de la troza por tipo de producto.

Productos positivos y negativos	ln3	% de madera por Troza estándar
Madera aserrada	18.181,99	47,42%
Astillas	9.259,70	24,15%
Tapas	325,91	0,85%
Lampazos	1.311,31	3,42%
Aserrín	6.433,86	16,78%
Corteza	2.829,67	7,38%

Fuente: Elaboración propia en base INFOR (2020).

Conversión a pulgadas cúbicas por producto

Los productos intermedios y finales de la industria de la madera aserrada se convierten a pulgadas cúbicas en función de sus dimensiones. Así, multiplicando el espesor por el ancho y el largo del producto, se obtienen las pulgadas cúbicas por cada uno de los productos (ver tabla 2).

Tabla 2. Distribución de la troza por tipo de producto.

Productos	Anc ho (in)	Anch o (cm)	Espe sor (in)	Espe so r (cm)	Alto (cm)	ln3 de madera
Palos 2x3x320	2	5,08	3	7,62	320	755,91
Tablas 1x4x320	1	2,54	4	10,16	320	503,94
Vigas 2x6x320	2	5,08	6	15,24	320	1.511,81

Fuente: Elaboración propia.

Conversión de la capacidad de captura de CO2 por pulgada de madera de bosque de pino en pie

Como ya se mencionó, y de acuerdo con datos del Instituto Forestal (INFOR), las plantaciones de pino insigne capturan más de 30 millones de toneladas de gases de efecto invernadero, principalmente CO2 y ozono; lo que, según las estimaciones de este instituto, equivalen a un total de 8.662.369 toneladas cúbicas para la macrozona central de Chile. Considerando la información relacionada reportada por INFOR (ver Tabla 3), las plantaciones de pino en la Región del

Maule representan el 84,85% del total de las plantaciones de esta variedad en el país, lo que equivale a una capacidad de captura de 25.707,09 toneladas cúbicas (tC) de CO2 de la atmósfera.

Tabla 3. Captura de CO2 de las plantaciones de pino insigne.

Región	Ha plantadas	%	tC de captura	Captura en tC
Metropol itana	5.969	1,405%	121.730	425,75
V	17	0,004%	347	1,21
VI	58.363	13,740%	1.190.241	4.162,91
VII	360.407	84,850%	7.350.051	25.707,09
Totales	424.756	100%	8.662.369	30.296,97

Fuente: INFOR (2020).

Considerando que cada hectárea de pino plantada equivale a 30.511.870 pulgadas cúbicas de madera de bosque en pie, y que cada hectárea tiene una capacidad de captura de 84 toneladas cúbicas de CO2, entonces una pulgada de bosque en pie tiene una capacidad de captura de 1 tC de CO2.

Supuestos para la aplicación del modelo

Para valorar los costos y beneficios de la industria de la madera aserrada se partió de los siguientes supuestos. Se consideró la compra de 0,5 ha de bosque con aproximadamente 12.204.000 pulgadas cúbicas de madera a un costo de \$50.000.000. Los costos de cosecha del bosque se estimaron en \$10.000.000, el transporte de las trozas al aserradero en \$5.000.000. Adicionalmente se adquirieron 38.400.000 pulgadas cúbicas de trozas con corteza como materia prima a \$120.000.000, el traslado al aserradero fue de \$7.500.000. A partir de esa materia prima se obtuvieron 12.700 palos, 17.896 tablas y 4.986 vigas. Los precios de venta unitarios y las unidades vendidas se muestran en la Tabla 4 (ver tabla 4).

Tabla 4. Precios unitarios y unidades vendidas e ingresos.

Producto	Precio unitario	Unidades vendidas	Ingresos
Palos	\$2.790	12.000	\$33.480.000
Tablas	\$2.990	16.000	\$47.840.000
Vigas	\$5.460	4.800	\$26.208.000

A partir de estos supuestos se calcularon los ingresos por los que ascendieron a \$107.528.000. En contraste, los costos iniciales considerados —compra del bosque, cosecha, transporte y operación del aserradero— suman \$72.500.000 millones, sin incluir el valor de las trozas adquiridas. De manera preliminar, la diferencia entre ingresos y costos operativos básicos alcanza alrededor de \$35 millones, lo cual

proporciona un margen para cubrir el costo de las trozas y otros gastos indirectos.

La transformación de las trozas genera tanto productos positivos (palos, tablas y vigas) como subproductos o residuos (astillas, aserrín y corteza). Aunque estos subproductos no se valoran en esta simulación, la metodología MFCA-LCA permite asignarles costos y cuantificar su impacto ambiental. En estudios más detallados podrían integrarse al análisis ingresos adicionales por la venta de astillas o energía generada a partir del aserrín, lo que mejoraría la eficiencia económica y ambiental del proceso.

Resultados de la aplicación del modelo MFCA-LCA

Considerando el modelo hacia adelante, es decir, desde el bosque en pie hasta los productos terminados, se puede apreciar que el costo de los productos positivos asciende a \$81.450.415, equivalente al 51,16% del costo de los materiales, mientras que el costo de los productos negativos ascendió a \$78.148.765, equivalente al 48,84% del costo de los materiales.

Por otro lado, y considerando el modelo inverso, es decir, estimando desde el volumen de productos terminados positivos esperados hasta el bosque en pie, se puede observar que para lograr dicho volumen, se deben sacrificar 29.223.136 pulgadas cúbicas de madera de bosque en pie, lo que equivale a 0,96 hectáreas de bosque; lo que equivale a sacrificar 80,64 toneladas cúbicas de captura de gases de efecto invernadero; o dicho de otra forma, 10,5 años de captura de CO₂, lo que en pesos equivale a \$67.732.690.-

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, podemos concluir que el modelo diseñado permite la valorización financiera de los costos y el impacto ambiental de la industria de la madera aserrada; con el mayor valor informativo de conocer, ya sea de manera posterior a la cosecha y procesamiento de la madera (modelo hacia adelante), o antes de decidir explotar el bosque (modelos inverso), el costo de los productos y el valor monetario del impacto ambiental en pérdida de captura de gases de efecto invernadero.

Las consideraciones prácticas de este hallazgo se relacionan con la necesidad y urgencia de invertir en métodos y tecnologías que maximicen la proporción de inventarios positivos de esta industria, toda vez que cada pulgada de madera de inventario negativo significa una pérdida en vano de 1 tonelada de capacidad de captura de CO₂; sin perjuicio que cada pulgada de inventario negativo significa también desechos y desperdicios que, en su disposición final (quema),

implica devolver al ambiente 1 tonelada de CO₂ capturado en 10,5 años de crecimiento de un bosque.

REFERENCIAS

Bierer, A., Götze, U., Meynerts, L., & Sygulla, R. (2015). Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1289-1301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.036>

Cargua, F., Rodríguez, M., Recalde, C., & Vinuesa, L. (2014). Cuantificación del Contenido de arbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. 25(3), 83-92. <https://doi.org/doi: 10.4067/S0718-07642014000300011>

Christ, K. L., & Burritt, R. L. (2015). Material flow cost accounting: A review and agenda for future research. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1378-1389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.005>

CORMA. (2003). Centro de Transferencia Tecnológica, Pino Radiata.

Guenther, E., Jasch, C., Schmidt, M., Wagner, B., & Ilg, P. (2015). Material Flow Cost Accounting – looking back and ahead. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1249-1254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.018>

Huang, S. Y., Chiu, A. A., Chao, P. C., & Wang, N. (2019). The Application of Material Flow Cost Accounting in Waste Reduction. *Sustainability*, 11(5), 1270. <https://doi.org/10.3390/su11051270>

IFAC. (2005). Building an Investment Climate of Trust. International Federation of Accountants.

Instituto Forestal (INFOR). (2020). La industria del aserrío 2020: Boletín Estadístico N.º 177. Santiago, Chile: Instituto Forestal.

INNOVA BIO BIO. (2016). Manejo de Plantaciones Forestales en Pequeñas y Medianas Propiedades. <http://asisma.cl/ade/wp-content/uploads/2016/01/Manual-de-manejo.pdf>

ISO. (2006). ISO: 14.040. Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Principios y marco de referencia. Norma Internacional de Normativa.

- ISO 14051. (2011). ISO: 14.051. Gestión ambiental. Contabilidad de costos del flujo de materiales. Marco de referencia general. Organización Internacional de Normalización.
- ISO-14040-2006.pdf. (s. f.). Recuperado 15 de agosto de 2022, de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/37456/0e3ee22afc7540488f66804b504580a4/ISO-14040-2006.pdf>
- Juárez Félix, Y. (2014). Dasometría.
- Meneses, M., & Guzmán, S. (2000). Productividad y eficiencia en la producción forestal basadas en las plantaciones de pino radiata. *Bosque*, 21(2), 3-11.
- Núñez, L., & Aedo, B. (2011). Reconfiguración del mercado de *Pinus Radiata* en Chile.
- ODEPA. (2010). Estimación del carbono capturado en las plantaciones de Pino radiata y Eucaliptos relacionadas con el DL-701 del 1974. Ministerio de Agricultura.
- ONUAA. (2020). El estado de los bosques del mundo; Los bosques, la biodiversidad y las personas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Prado, D. (2015). Plantaciones Forestales. Más allá de los árboles.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009a). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1-10). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009b). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>
- Sione, S. M. J., Andrade, H. J., Wilson, M. G., Rosenberger, L. J., Sasal, M. C., Ledesma, S. G., & Gabioud, E. A. (2021). Reducción de emisiones de carbono por deforestación evitada en bosques del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *Colombia Forestal*, 24(2), 39-51.
- Sistema de Gestión Forestal. (s. f.). Paquete tecnológico *Pinus radiata*. Recuperado 3 de noviembre de 2022, de http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/fichap_radiata.htm
- Sotomayor, A., Helmke, E., & García, E. (2002). Manejo y mantención de plantaciones forestales, *Pinus Radiata* y *Eucalyptus* Sp. INFOR.
- Watt, M. S., & Trincado, G. (2019). Modelling the influence of environment on basic density of the juvenile wood for *Pinus radiata* grown in Chile. *Forest Ecology and Management*, 448, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.001>
- Xiaomei, L. (2004). Theory and practice of environmental management accounting. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 3(1), 47-57. <https://doi.org/10.1386/ijtm.3.1.47/0>
- Zeng, H., Zhou, Z., & Xiao, X. (2021). MFCA extension from a life cycle perspective: Methodical refinements and use case. *Resources Policy*, 74, 101507. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101507>
- Zou, T., Zeng, H., Zhou, Z., & Xiao, X. (2019a). A three-dimensional model featuring material flow, value flow and organization for environmental management accounting. *Journal of Cleaner Production*, 228.