

## Estimating final energy consumption when logging and sawing timber

### Estimación de la energía de uso final consumida durante la extracción y aserrado de la madera

Pedro Meza-López\*; Juan A. Nájera-Luna; Ricardo de la Cruz-Carrera

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de El Salto (TecNM-ITES), Programa de Ingeniería Forestal. Tecnológico 101, La Forestal. C. P. 34942. El Salto, Durango, México.

\*Corresponding author: [pettermezza@itelsalto.edu.mx](mailto:pettermezza@itelsalto.edu.mx); tel.: +52 (618) 370 9837.

#### Abstract

**Introduction:** The forestry sector faces energy challenges that involve the precise determination of the final energy consumption to achieve improvements.

**Objective:** To estimate the final energy consumed while processing timber forest resources.

**Materials and methods:** The Total Final Consumption (TFC) was determined in six companies (statistical units) engaged in primary timber processing in Pueblo Nuevo, Durango. Activity data and significant energy uses (SEUs) for two years were obtained through an energy audit. The data were disaggregated by statistical unit, activity, form and application of energy, and expressed in tons of oil equivalent (toe).

**Results and discussion:** The energy consumption per statistical unit was estimated at 71.19 toe·yr<sup>-1</sup>, releasing 260.14 tCO<sub>2</sub>e·yr<sup>-1</sup>. SEU was identified in vehicles with diesel engines (75%). The use of gasoline and electrical energy in machines accounted for 14.2% and 10.7%, respectively. Electric motors used up to 98% of the electrical energy. Logging represented 69% of the Total Final Consumption (TFC), more than twice compared to sawing. Energy consumption was significantly different between statistical units (Tukey,  $P < 0.05$ ) for sawing, but not for logging.

**Conclusions:** Energy consumption for logging was similar among the units studied but was not similar for sawing. An effective energy management program and the integration of wood energy could optimize the consumption pattern.

**Keywords:** Sawmill; energy consumption; diesel; greenhouse gases; timber production.

#### Resumen

**Introducción:** La actividad forestal enfrenta desafíos energéticos que implican la determinación precisa del uso final de energía para lograr mejoras en su rendimiento.

**Objetivo:** Estimar la cantidad de energía de uso final consumida durante el procesamiento de los recursos forestales maderables.

**Materiales y métodos:** El consumo final total de energía (CFT) se determinó en seis empresas (unidades estadísticas) de transformación primaria de la madera en Pueblo Nuevo, Durango. Los datos de actividad y los usos significativos de la energía (USEn), correspondientes a dos años, se obtuvieron mediante una auditoría energética. Los datos se desagregaron por unidad estadística, actividad, forma y aplicación de la energía y se expresaron en toneladas equivalentes de petróleo (tep).

**Resultados y discusión:** El consumo de energía por unidad estadística se estimó en 71.19 tep·año<sup>-1</sup>, liberando 260.14 tCO<sub>2</sub>e·año<sup>-1</sup>. El USEn se identificó en vehículos con motor de diésel (75%). El uso de gasolina y energía eléctrica en máquinas correspondió al 14.2% y 10.7%, respectivamente. Los motores utilizaron hasta 98% de la energía eléctrica. La extracción de madera ocupó 69% del CFT, más del doble que el aserrado de madera. El consumo de energía fue significativamente diferente entre unidades estadísticas (Tukey,  $P < 0.05$ ) durante el aserrado, pero no en la extracción de madera.

**Conclusiones:** El consumo de energía en la actividad de extracción de madera fue similar entre las unidades estudiadas, pero no en la etapa de aserrado. Un programa efectivo de gestión de la energía y la integración de la dendroenergía podría optimizar el modelo de consumo.

**Palabras clave:** aserradero; consumo de energía; diésel; gases de efecto invernadero; producción maderable.

## Introduction

Energy is an essential input in most economic activities and is a crucial pillar in the development of the economy (Xing et al., 2023). Increasing climate threat and volatility of energy prices, mainly caused by the conflict in Ukraine and the SARS-CoV-2 virus pandemic, have led economic leaders to prioritize the optimization of their energy use patterns (Hamit-Haggar, 2012; Lee & Birol, 2020; McKinsey & Company, 2022).

One of the most recurring challenges for optimizing energy models is the precise determination of final energy consumption, and even more complex, demonstrating improvements in energy performance (Navarrete & Labelle, 2023). The term 'final energy consumption' refers to the form and application of energy consumed directly at a point of use (International Energy Agency [IEA], 2016; International Organization for Standardization [ISO], 2018). The accuracy of final energy consumption is influenced by the quality and availability of activity data (IEA, 2016).

In 2018, timber production in Mexico reached 8.3 million cubic meters of round wood ( $m^3r$ ), with Durango and Chihuahua as the main producers, accounting for 30.2 % and 19.9 %, respectively (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021). On the other hand, the total final consumption (TFC) for the sector was 4442 772.53 tons of oil equivalent (toe), of which diesel represented 68.46 %, followed by electrical energy with 28.38 % (Secretaría de Energía [SENER], 2021).

To achieve desirable levels of timber production, it is essential to involve a wide range of machinery and equipment in logging and mechanical wood processing operations. The implementation of these operations implies the use of some form of energy source and often represents a significant cost not only in financial terms but also in environmental issues (Food and Agriculture Organization [FAO], 1991).

The energy consumption in forest enterprises accounts for up to 50 % of operating costs in forest supply activities (Reyes et al., 2022), while the carbon footprint in primary wood processing centers is  $710.62 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{yr}^{-1}$  (tons of carbon dioxide equivalent per year) (Meza et al., 2022). For this reason, the current energy situation in forestry demands a set of actions focused on managing accurate data on the use and final consumption of energy. This information will help identify opportunities for improvement in energy performance to address climate and economic challenges. Therefore, the objective of this study was to estimate the amount of final energy consumed in logging and sawing.

## Introducción

La energía es un insumo esencial en la mayoría de las actividades económicas y es un pilar importante en el desarrollo de la economía (Xing et al., 2023). La amenaza climática creciente y la volatilidad de los precios de los energéticos, causadas principalmente por el conflicto en Ucrania y la pandemia del virus SARS-CoV-2, han ocasionado que los dirigentes de actividades económicas apuesten por la optimización de sus modelos de uso de energía (Hamit-Haggar, 2012; Lee & Birol, 2020; McKinsey & Company, 2022).

Uno de los desafíos más recurrentes para la optimización de los modelos energéticos es la determinación precisa del uso final de la energía y, aún más complejo, demostrar mejoras en el rendimiento energético (Navarrete & Labelle, 2023). El término 'uso final de la energía' se refiere a la forma y aplicación de la energía consumida directamente en un punto de uso (International Energy Agency [IEA], 2016; International Organization for Standardization [ISO], 2018). La precisión del uso final de la energía está influenciada por la calidad y disponibilidad de los datos de actividad (IEA, 2016).

La producción forestal maderable en México alcanzó los 8.3 millones de metros cúbicos rollo ( $m^3r$ ) en 2018, siendo Durango y Chihuahua los principales productores con 30.2 % y 19.9 %, respectivamente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021). Por otro lado, el consumo final total de energía (CFT) del sector fue de 4442 772.53 toneladas equivalentes de petróleo (tep), de las cuales, el diésel representó 68.46 % seguido por la energía eléctrica con 28.38 % (Secretaría de Energía [SENER], 2021).

Para alcanzar niveles deseables de producción forestal maderable es imprescindible movilizar una gama amplia de maquinaria y equipo en operaciones de extracción y procesamiento mecánico de la madera. La ejecución de estas operaciones implica el uso de algún tipo de fuente de energía y con frecuencia representa un costo significativo no solo en términos financieros, sino también medioambientales (Food and Agriculture Organization [FAO], 1991).

El consumo de energía en empresas forestales representa hasta 50 % de los costos de operación en actividades de abastecimiento forestal (Reyes et al., 2022), mientras que la huella de carbono en los centros de transformación primaria de la madera se ubica en  $710.62 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{año}^{-1}$  (toneladas de dióxido de carbono equivalente al año) (Meza et al., 2022). Por esta razón, la situación energética actual de la actividad forestal demanda un conjunto de acciones orientadas a la gestión de datos precisos sobre el uso y consumo final de la energía. Tal información permitirá identificar

## Materials and Methods

### Characteristics of forestry companies

In the study, six forestry companies participated, all dedicated to primary wood processing, five were community-based and one was private. These companies are in the municipality of Pueblo Nuevo, Durango, within a radius of approximately 60 km from the central area of the city of El Salto. Participation in the study was voluntary, and the identity of the companies is preserved, keeping the information confidential.

The community sawmills operate with one production line, while the private company has two lines; each company has a recovery mill. The average installed capacity of the sawmills is 70 m<sup>3</sup> per week, equivalent to 29664 board foot (BF), and in the recovery mills it is 20 m<sup>3</sup> (8476 BF). The main forest resource is round wood from *Pinus* spp. with dimensions ranging from 0.30 to 0.65 m in diameter and 4.88 to 6.10 m in length.

Logging activities in the felling areas consist of felling and transporting round wood to the sawmills, while the sawmill production line configuration consists of six sequentially developed mechanized operations. The process begins with the storage and handling of round wood, followed by sawmilling, sanitation and sizing activities, and then the sawn timber is sorted and handled and stored.

The timber products with the highest production levels are boards with commercial dimensions ranging from 4 to 12 inches (in) wide by 7/8 thick by 8 to 20 feet (ft) long and planks of 4 to 12 in by 5/4 in by 8 to 20 ft. The products with lower production are beams (6-10 in \* 3-4 in \* 8-20 ft), bars (3-4 in \* 5/4 in \* 8-20 ft), wooden sleepers (7 in \* 8 in \* 8 ft), polines (3-4 in \* 3-4 in \* 8-20 ft) and waldras. The dimensions of the latter depend on demand. In addition, by-products such as decking, packing box material, broom handle squares, mulch, firewood and sawdust are also manufactured. The latter two are sometimes considered residues.

### Final energy use coverage

The coverage boundaries of final energy consumption were established using predefined homogeneity criteria by the IEA (2015 and 2016); determination of the main economic activity, geographical location, definition of a time series, and breakdown of the type of energy consumed.

The main economic activity of forestry companies was determined based on the highest value added or contribution in the production chain (>50 %), according to the top-down approach method as suggested by

oportunidades de mejora en el desempeño energético, para afrontar los retos climáticos y económicos. Por tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la cantidad de energía de uso final consumida en el aprovechamiento de los recursos forestales maderables durante las operaciones de abastecimiento forestal y el proceso de aserrío de la madera.

## Materiales y métodos

### Características de las empresas forestales

En el estudio participaron seis empresas forestales dedicadas a la transformación primaria de la madera, de las cuales cinco fueron de carácter comunitario y una particular. Las empresas están distribuidas en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, a un radio de 60 km aproximadamente de la zona centro de la ciudad de El Salto. La participación de las empresas fue voluntaria y se preserva su identidad, manteniendo la confidencialidad de la información.

Los aserraderos de carácter comunitario operan con una línea de producción, mientras que la empresa particular cuenta con dos líneas; cada empresa tiene una fábrica de recuperación. La capacidad media instalada de los aserraderos es de 70 m<sup>3</sup> por semana que equivalen a 29664 pies-tabla (pt) y en las fábricas de recuperación es de 20 m<sup>3</sup> (8476 pt). El principal recurso forestal es madera en rollo del género *Pinus* spp., cuyas dimensiones se encuentran entre 0.30 y 0.65 m de diámetro y 4.88 a 6.10 m de largo.

Las actividades de extracción de madera en las áreas de corta consisten en el derribo y transporte de la madera en rollo hasta los aserraderos, mientras que la configuración de las líneas de producción en los aserraderos consiste en seis operaciones mecanizadas y desarrolladas secuencialmente. El proceso comienza con el almacenamiento y manejo de madera en rollo en patio; posteriormente, se realizan las actividades de asierre, saneamiento y dimensionado; luego, la madera aserrada se clasifica y se hace el manejo y almacenamiento correspondiente en patio.

Los productos maderables con niveles más altos de producción son tablas de diversas clases con dimensiones comerciales de 4 a 12 pulgadas (in) de ancho por 7/8 in de espesor por 8 a 20 pies (ft) de largo y tablones de 4 a 12 in por 5/4 in por 8 a 20 ft. Los productos con menor producción son vigas (6-10 in \* 3-4 in \* 8-20 ft), barrotes (3-4 in \* 5/4 in \* 8-20 ft), durmientes (7 in \* 8 in \* 8 ft), polines (3-4 in \* 3-4 in \* 8-20 ft) y waldras. Las dimensiones de estas últimas dependen de la demanda. Asimismo, se manufacturan subproductos como habilitado para tarima, material para caja de empaque, cuadrado para mango de escoba, capote, leña y aserrín. En ocasiones, estos dos últimos son considerados como residuos.

the International Standard Industrial Classification (ISIC) of All Economic Activities Revision 4 (United Nations, 2009). The value added was adjusted based on information from Pro Floresta (2008), to ensure that the main economic activity referred to the same boundaries in terms of final energy consumption.

Table 1 shows the main economic activity of forestry companies and a summary of the application of the top-down approach. This follows a hierarchical principle where economic activities are subdivided into categories consisting of four mutually exclusive levels (section, division, group, and class). The section is the highest level, while the class is the lowest or most detailed level. Sections A and C were the sectors in which the companies participated.

Division 02 comprised the production of round wood for industries using forest products. Classes 0210 and 0220 refer to activities such as logging and the production of forest products requiring minimal processing, such as round wood, firewood, wood chips, as well as round wood for direct use (pulpwood). Class 0240 included activities such as forestry management consulting services, timber stock assessment, and transportation of round wood in the forest for remuneration.

Division 16 refers to the manufacture of wood products such as lumber, plywood, veneer sheets, and other derivatives. Class 1610 includes activities such as sawing, planing, and debarking of wood. The highest value added corresponded to this class. It also includes drying, impregnation and chemical treatment of wood.

## Cobertura del uso final de la energía

Los límites de cobertura del uso final de la energía se establecieron mediante los criterios de homogeneidad predefinidos por la IEA (2015 y 2016): determinación de la actividad económica principal, ubicación geográfica, definición de una serie temporal y desglose del tipo de energía utilizada.

La actividad económica principal de las empresas forestales se determinó en función del mayor valor añadido o aportación en la cadena productiva (>50 %), de acuerdo con el método descendente como lo sugiere la clasificación industrial internacional uniforme (CIIU) de todas las actividades económicas revisión 4 (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2009). El valor añadido se ajustó a partir de la información de Pro Floresta (2008), para lograr que la actividad económica principal se encontrara referida a los mismos límites en términos de uso final de la energía.

El Cuadro 1 muestra la actividad económica principal de las empresas forestales y un resumen de la aplicación del método descendente. Este sigue un principio jerárquico donde las actividades económicas se subdividen en categorías integradas por cuatro niveles mutuamente excluyentes (sección, división, grupo y clase). La sección es el nivel más alto mientras que la clase es el nivel más bajo o más detallado. Las secciones A y C fueron el sector en el que las empresas participaron.

La división 02 comprendió la producción de madera en rollo para industrias que utilizan productos forestales.

**Table 1. Main economic activity of forestry companies studied using the top-down approach.**

**Cuadro 1. Actividad económica principal de las empresas forestales estudiadas aplicando el método descendente.**

Section/ Sección	Division/ División	Group/ Grupo	Class/ Clase	Description/ Descripción	Value added (%) / Valor añadido (%)
A				Agriculture, livestock, forestry and fishing / Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	
	02			Forestry and timber extraction / Silvicultura y extracción de madera	
		021	0210	Forestry and other forestry activities / Silvicultura y otras actividades forestales	4
		022	0220	Logging* / Extracción de madera*	13
		024	0240	Forestry support services / Servicios de apoyo a la silvicultura	7
C				Manufacturing industries / Industrias manufactureras	
	16			Production of wood and manufacture of timber products, except furniture / Producción de madera y fabricación de productos de madera, excepto muebles	
		161	1610	Sawing / Aserrado de madera	67

\*Logging is carried out successively in the same unit and when the product of one process serves as an input for the next. That is the case of the combination of forestry and logging with the subsequent transportation of round wood in the forest.

\*Las fases de extracción se realizan sucesivamente en la misma unidad y cuando el producto de un proceso sirve como insumo del siguiente. Tal es el caso de la combinación de la silvicultura y explotación de madera en pie con el subsiguiente transporte de madera en rollo en el bosque.

## Energy review

To identify the significant energy uses (SEUs) in the sawmills, a level 1 energy diagnosis or audit was carried out as established by ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2011). The audit consisted of plant and felling area tours, as well as analyzing the companies' activity data or records for two calendar years. The audit involved no direct measurement of energy variables in the field.

Logging operations (class 0220) considered in the audit were: forest survey, construction or rehabilitation of logging roads, tree felling, wood chopping, timber skidding, loading, transportation of roundwood standing on a forestry road to the sawmill. On the other hand, sawmilling operations (class 1610) were: management of round wood, debarking of wood, sawing, sanitation and sizing, classification of sawn wood, processing of by-products and management of sawn wood. Office activities were also considered part of this process.

## Data collection

A census of activity was carried out due to the relevance of data accuracy, i.e., physical and digital records for two calendar years to serve as a primary source of information to determine energy consumption in forestry companies (ASHRAE, 2011).

The number of records varied significantly and depended largely on the information access policies of each company. A detailed analysis of these records (accounting reports, invoices, receipts, purchase orders, accountability reports, and modules of the MicroSIP® digital administrative system) allowed for the collection of data associated with purchased electrical energy consumption (in Mexican pesos, MXN) in kilowatt-hours (kWh) and the use of fossil fuels expressed in volume units (L), including diesel, gasoline, and additive lubricants. Some records also provided insight into the use of woody forest biomass (kg).

Since the activity data involved diverse units of energy measurement, it was necessary to standardize them using a set of conversion factors proposed by Capehart et al. (2012). Additionally, average daily prices (MXN) reported by retail fuel stations' operators were consulted to determine the volume (L) of fossil fuel used (Comisión Reguladora de Energía [CRE], 2022).

Total final energy consumption or TFC is the sum of all final energy accounted for in the activity data for the set of companies during the time series. For convenience, TFC units were expressed in tons of crude oil equivalent (toe), as this is the form in which national energy balances are expressed (SENER, 2021). Energy consumption was

Las clases 0210 y 0220 se refieren a las actividades de extracción de madera en pie y producción de productos forestales que requieren poca transformación como madera en rollo, leña, astillas de madera, así como madera en rollo para su uso en bruto (entibos). La clase 0240 incluyó actividades de servicios de consultoría de gestión forestal, evaluación de existencias maderables y transporte de madera en rollo en el bosque a cambio de una retribución.

La división 16 se refiere a la fabricación de productos de madera como escuadría, tableros contrachapados, hojas de madera para enchapado y otros derivados. La clase 1610 comprende actividades de aserrado, tableado y descortezado de madera. El mayor valor añadido correspondió a esta clase. En esta también se encuentran el secado, la impregnación y el tratamiento químico de la madera.

## Revisión energética

Con la finalidad de identificar los usos significativos de la energía (USEn) en los aserraderos, se hizo un diagnóstico o auditoría energética de nivel 1 como lo establece la ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2011). La auditoría consistió en hacer recorridos en planta y en áreas de corta, así como analizar los datos de actividad o registros de las empresas de dos años calendario. La auditoría no incluyó algún tipo de medición directa de variables energéticas en campo.

Las operaciones de extracción de madera (clase 0220) consideradas en la auditoría fueron: recorrido de monte, construcción o rehabilitación de caminos forestales de saca, derribo de árbol, troceo, arrastre, carga, transporte a planta y transporte libre a bordo en brecha. Por otro lado, las operaciones del proceso de aserrado de madera (clase 1610) fueron: manejo de madera en rollo en patio, descortezado de la madera, asierre, saneamiento y dimensionado, clasificación de la madera aserrada, habilitado de subproductos y manejo de madera aserrada en patio. Las actividades de oficina también se consideraron parte de este proceso.

## Recolección de datos

Debido a la relevancia de la precisión de los datos se hizo un censo de actividad; es decir, registros físicos y digitales de dos años calendario que sirvieran como fuente de información primaria para determinar el consumo de energía en las empresas forestales (ASHRAE, 2011).

El número de registros varió y dependió en gran medida de las políticas de acceso a la información de cada empresa. El análisis minucioso de estos registros (reportes contables, facturas, recibos, notas de compra,

expressed as a percentage (%) and in terajoules (TJ); one TJ (billion Joules) is equivalent to 23.88 toe.

Greenhouse gas (GHG) emissions from energy consumption in forestry companies were expressed in tCO<sub>2</sub>e and estimated using the documented Tier 1 emission factors method (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006; World Business Council for Sustainable Development & World Resource Institute, 2005). Global warming potentials were taken from the fifth assessment report (AR5) of the IPCC (2015). Also, the emission factors of the national electricity system disseminated and estimated annually by the CRE (2018 and 2019) were required for the years 2017 and 2018 corresponding to the time series of this study.

### Statistical Analysis

Companies and their establishments were defined as statistical unit E1, E2, E3, E4, E5 and SP in accordance with ISIC (UN, 2009). The statistical unit facilitated the consistency and analysis of energy use and consumption in a standardized way.

The dataset was treated by levels of disaggregation, which consisted of separating and hierarchizing the activity data in a pyramidal fashion, thereby determining the maximum and minimum level of disaggregation (IEA, 2016), which was conditioned by the availability and quality of the activity data. The level with the highest data disaggregation was the form and application of energy, followed by activity (ISIC class) and the most aggregated level was the statistical unit. The highest level of disaggregation required the most activity data. TFC is also presented by level of disaggregation.

Chebyshev's theorem was used to determine the fraction or proportion of observations (at least 75 % and more likely 95 % of the observations) that were at an interval  $k = 2$  standard deviations from the arithmetic mean of the data (Mendenhall et al., 2010).

An ANOVA was conducted at each level of energy consumption disaggregation to identify differences among statistical units. Whenever significant differences were detected, the Tukey's HSD test for equal samples ( $P = 0.05$ ) was applied. Data analysis was carried out using the InfoStat software version 2019 (Di Rienzo et al., 2019).

## Results and Discussion

### Energy form and applications

Logging of timber forest resources in the six statistical units required energy in the form of fossil fuel, electric

informes de rendición de cuentas y módulos del sistema administrativo digital MicroSIP®) permitió la recopilación de datos asociados al consumo de energía eléctrica comprada (pesos mexicanos, MXN) en kilowatt hora (kWh) y uso de combustibles fósiles expresado en unidades de volumen (L), incluyendo combustóleo número dos (diésel), gasolina y lubricantes aditivos. Algunos registros también permitieron conocer el uso de biomasa forestal leñosa (kg).

Dado que los datos de actividad presentaron unidades diversas de medida de energía fue necesario homogeneizarlas mediante una serie de factores de conversión propuestos por Capehart et al. (2012). Los precios promedio diarios (MXN) reportados por los permisionarios de estaciones de servicio de expendio al público también se consultaron para conocer el volumen (L) de combustible fósil utilizado (Comisión Reguladora de Energía [CRE], 2022).

El consumo final total de energía o CFT es la suma de toda la energía de uso final contabilizada en los datos de actividad del conjunto de empresas durante la serie temporal. Por conveniencia, las unidades del CFT se expresaron en toneladas equivalentes de petróleo crudo (tep), ya que es la forma en la que se expresan los balances de energía nacionales (SENER, 2021). El consumo de energía se expresó en porcentaje (%) y en terajoules (TJ); un TJ (billón de Joules) equivale a 23.88 tep.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del consumo de energía en las empresas forestales se expresó en tCO<sub>2</sub>e y se estimó mediante el método factores de emisión documentados nivel 1 (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006; World Business Council for Sustainable Development & World Resource Institute, 2005). Los potenciales del calentamiento global se tomaron del quinto reporte de evaluación (AR5) del IPCC (2015). Asimismo, se requirieron los factores de emisión del sistema eléctrico nacional difundidos y estimados anualmente por la CRE (2018 y 2019) para los años 2017 y 2018 correspondientes a la serie temporal de este estudio.

### Análisis estadístico

Las empresas y sus establecimientos se definieron como unidad estadística E1, E2, E3, E4, E5 y UD en concordancia con la CIU (ONU, 2009). La unidad estadística facilitó la coherencia y análisis del uso y consumo de energía de forma estandarizada.

El conjunto de datos se trató por niveles de desagregación que consistió en la separación y jerarquización de los datos de actividad de forma piramidal, y con ello se determinó el nivel máximo y mínimo de desagregación (IEA, 2016), la cual estuvo condicionada por la disponibilidad y

and thermal energy. The use of renewable energy was non-existent. Table 2 shows in detail the forms and types of energy per activity (ISIC class).

Forest machinery consumed fossil fuels. Diesel fuel (No. 2 fuel oil) was used in all types of off-road heavy-duty vehicles (ORHDV). Gasoline was utilized in light-duty vehicles and portable internal combustion engine machines (LDV&PICEM). Additive lubricants (synthetic oils with a ratio of 250 mL of oil per 12.5 L of gasoline) were employed in portable internal combustion engine machines (PICEM) with both four-stroke and two-stroke engines. The use of liquefied petroleum gas, natural gas, and propane was not observed in the processes of the statistical units.

Purchased electrical energy was used in all classes of electrical machines and thermal energy in artificial drying stoves (ADS). The application of thermal energy to generate steam was identified in facilities for the artificial drying of wood; however, there was no evidence that the facilities were in operation.

calidad de los datos de actividad. El nivel con la mayor desagregación de datos fue la forma y aplicación de la energía, seguido por la actividad (clase de la CIU) y el nivel más agregado fue la unidad estadística. El nivel máximo de desagregación requirió mayor cantidad de datos de actividad. El CFT se presenta también por nivel de desagregación.

El teorema de Chebyshev se utilizó para determinar la fracción o proporción de observaciones (al menos 75 % y más probablemente 95 % de las observaciones) que se encontraban a un intervalo  $k = 2$  desviaciones estándar de la media aritmética de los datos (Mendenhall et al., 2010).

En cada nivel de desagregación de consumo de energía se realizó un análisis de varianza para determinar diferencias entre unidades estadísticas. Cuando hubo evidencia de diferencias significativas se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey para muestras iguales ( $P = 0.05$ ). El análisis de los datos se ejecutó en el programa InfoStat versión 2019 (Di Rienzo et al., 2019).

**Table 2. Description of energy use in six sawmills in Pueblo Nuevo, Durango, México.**

**Cuadro 2. Detalle del uso de energía en seis aserraderos de Pueblo Nuevo, Durango, México.**

Activity (ISIC)/ Actividad (clase de la CIU)	Diesel in ORHDV/ Diésel en VPSPTT	Gasoline in LDV&PICEM/ Gasolina en VPSLyMCIP	Additive Lubricants in PICEM/ Lubricantes aditivos en MCIP	Electrical in EM/ Eléctrica en ME	Thermal in ADS/ Térmica en ESA
Logging (0220)/ Extracción de madera (0220)	Cranes Trucks Tractors Excavators Backhoe loaders/ Grúas Camiones Arrastradores Excavadoras Retroexcavadoras	Pick-up trucks Brushcutters Chainsaws/ Camionetas con caja abierta Desbrozadoras Motosierras	Brushcutters Chainsaws/ Desbrozadoras Motosierras	Not identified/ No identificada	Not identified/ No identificada
Sawing (1610)/ Aserrado de madera (1610)	Articulated boom loaders Front loaders Forklifts/ Cargadores con pluma articulada Cargadores frontales Montacargas	Chainsaws/ Motosierras	Chainsaws/ Motosierras	Electric motors Lighting equipment Computer and telecommunication equipment Power tools/ Motores eléctricos Equipo de iluminación Equipo informático y telecomunicación Herramienta eléctrica	Wood burning boilers/ Calderas a leña

ISIC: International Standard Industrial Classification, ORHDV: off-road heavy-duty vehicles, LDV&PICEM: light-duty vehicles and portable internal combustion engines, PICEM: portable internal combustion engines, EM: electric machines, ADS: artificial drying stoves.

CIU: clasificación industrial internacional uniforme, VPSPTT: vehículos para servicios pesado todo terreno, VPSLyMCIP: vehículos para servicio ligero y máquinas de combustión interna portátiles, MCIP: máquinas de combustión interna portátiles, ME: máquinas eléctricas, ESA: estufas de secado artificial.

On-site energy generation from indigenous renewable energy resources (solar, wind, hydro or forest biomass) was also not observed in forestry activities.

For logging, gasoline-powered chainsaws were used to fell and cut down trees. This type of machinery was also used for forestry support services (pruning and shredding of branches and tree tips in the felling area). The pick-up trucks with gasoline engines were used for forest routes and forest management activities. On the other hand, fuel oil number two (diesel) was required for excavators and backhoes for construction or rehabilitation operations of forest roads; draggers and cranes for haulage and loading operations; and for trucks to transport roundwood standing on a forestry road to the sawmill.

Sawing required articulated boom loaders, front loaders, and forklifts to stack, move and load round wood and sawn wood in the sawmill yard. These types of vehicles consumed diesel, while gasoline-powered chainsaws were used to cut round wood.

Squirrel cage motors mechanically coupled to band saws and toothed circular saws assisted in debarking, sawing, sanitation, sizing and boarding operations.

### Significant energy use

The use of energy sources in the six statistical units resulted in a total final consumption (TFC) of 854.30 toe (35.77 TJ) over two years. Figure 1 shows the SEUs for each statistical unit.

The predominant energy source in the six statistical units was diesel. The consumption of this fuel in ORHDV was substantial when compared to other energy uses, representing around three-quarters (74.9 %) of TFC. The use of gasoline in LDV&PICEM and electricity in machinery accounted for 14.2 % and 10.7 %, respectively, while less than 1 % of the energy came from additive lubricants used in two-stroke gasoline engine PICEM.

Similarly, Donahue et al. (2021) demonstrated that diesel usage also recorded the highest energy consumption in sawmills in the state of Oregon. Diesel and natural gas together represented 93.9 % of the fossil fuels used. In the sawmill industry of Arizona, Colorado, and New Mexico, Loeffler et al. (2016) found that 61 % of the energy used came from diesel, 35 % from electricity, and 3 % from gasoline. The rest came from propane and wood residues.

Studies show a variety of results. Berg and Lindholm (2005) indicated that diesel was the major source of energy used in forestry operations in Sweden, although

## Resultados y discusión

### Forma y aplicaciones de la energía

El aprovechamiento de los recursos forestales maderables en las seis unidades estadísticas requirió energía en forma de combustible fósil, eléctrica y térmica. El uso de energías renovables fue nulo. El Cuadro 2 muestra con detalle las formas y tipos de energía por actividad (clase de la CIU).

La maquinaria forestal consumió combustibles fósiles. El combustóleo número dos (diésel) se empleó en todos los tipos de vehículos para servicio pesado todo terreno (VPSPTT). La gasolina se utilizó en vehículos para servicio ligero y máquinas de combustión interna portátiles (VPSLyMCIP). Los lubricantes aditivos (aceites sintéticos con una proporción de 250 mL de aceite por cada 12.5 L de gasolina) se usaron en máquinas de combustión interna portátiles (MCIP) con motor de cuatro y dos tiempos. El uso de gas licuado de petróleo, gas natural y propano no se observó en los procesos de las unidades estadísticas.

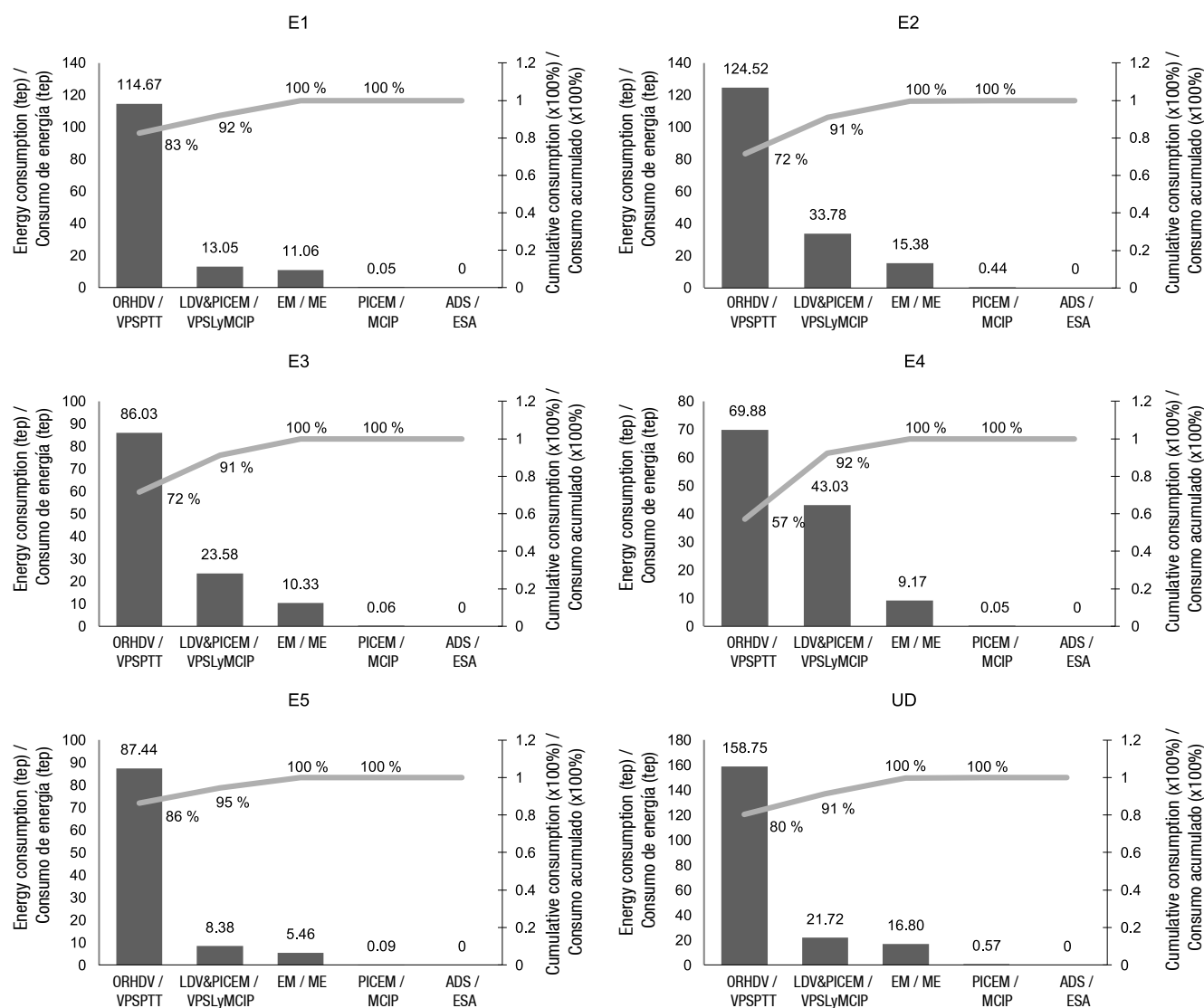
La energía eléctrica comprada se utilizó en todas las clases de máquinas eléctricas y la energía térmica en estufas de secado artificial (ESA). La aplicación de energía térmica para generar vapor se identificó en instalaciones para el secado artificial de madera; sin embargo, no hubo evidencia de que las instalaciones estuvieran en operación.

La generación de energía en el sitio a partir de recursos energéticos renovables autóctonos (solar, eólica, hidráulica o biomasa forestal) tampoco se observó en las actividades forestales.

En la extracción de madera se observó el empleo de motosierras con motor de gasolina para el derribo y troceo del árbol. Este tipo de maquinaria también se utilizó en actividades de servicio de apoyo a la silvicultura (poda y trituración de ramas y puntas del árbol en el área de corta). Las camionetas de caja abierta con motor de gasolina se emplearon en recorridos de monte y actividades de gestión forestal. Por otra parte, el combustóleo número dos (diésel) se requirió en excavadoras y retroexcavadoras para las operaciones de construcción o rehabilitación de caminos forestales de saca; arrastradores y grúas para las operaciones de arrastre y carga; y en camiones para el transporte a planta y transporte libre a bordo en brecha.

En el aserrado de madera se requirió de cargadores con pluma articulada, cargadores frontales y montacargas para apilar, mover y cargar la madera en rollo y madera aserrada en el patio de los aserraderos. Este tipo de vehículos consumió diésel, mientras que las





**Figure 1. Energy consumption (toe: tons of oil equivalent) per type of machinery and vehicles in six sawmills in Pueblo Nuevo, Durango. ORHDV: off-road heavy-duty vehicles, LDV&PICEM: light-duty vehicles and portable internal combustion machines, PICEM: portable internal combustion machines, EM: electric machines, ADS: artificial drying stoves**

**Figura 1. Consumo de energía (tep: toneladas equivalentes de petróleo) por tipo de maquinaria y vehículos en seis aserraderos de Pueblo Nuevo, Durango. VPSPTT: vehículos para servicios pesado todo terreno, VPSLyMCIP: vehículos para servicio ligero y máquinas de combustión interna portátiles, MCIP: máquinas de combustión interna portátiles, ME: máquinas eléctricas, ESA: estufas de secado artificial.**

gasoline and electricity were also used substantially. On the other hand, in Malaysia, Ratnasingam et al. (2017) note that 63 % electric energy was used for sawing and cutting timber, while diesel (36 %) was used in round wood transportation.

In Canadian sawmills, Meil et al. (2009) reported that diesel dominated for logging and transportation with 30 % of TFC, while in the sawmilling process, bioenergy use accounted for 51 % followed by purchased electricity (24 %) and natural gas (17 %). Gasoline and liquid propane gas accounted for less than 1 % of TFC.

motosierras con motor de gasolina se utilizaron para recortar madera en rollo en patio.

Los motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla acoplados mecánicamente a sierras cintas y sierras circulares dentadas asistieron operaciones de descortezado, aserrado, saneamiento, dimensionado y tableado de madera.

#### Uso significativo de la energía

El uso de las fuentes de energía en las seis unidades estadísticas provocó un consumo final total (CFT) de

At eight sawmills in California, Morgan et al. (2019) used wood and bark residues for energy production, which accounted for 87.6 % of the TFC, while 1.2 % of the electrical energy came from renewable sources; at sawmills in Montana, 77.3 % of the TFC corresponded to bioenergy and fossil fuels such as diesel, gasoline and natural gas participated with only 3.8 %, 0.1 % and 5.6 %, respectively. In sawmills in Norway, Olsson (2020) found that 5 % of TFC was diesel, 16 % electricity and 79 % biomass.

According to Wan et al. (2012), some Finnish sawmills have invested in bioenergy production for diversifying their business and increasing added value at the company level. The use of bioenergy in the studied companies could represent an opportunity to use clean and renewable energy sources while contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions. Sawmill residues could be used in bioenergy microgeneration and cogeneration plants, primarily in the form of wood chips (Dudziec et al., 2023).

This study revealed that most of ORHDVs, LDVs and PICEM were used for logging stage. Therefore, logging can be categorized as a Significant Energy-Using (SEU) Unit in the timber forestry production process. Fow sawing, machines classified as squirrel cage motors used up to 98 % of the electrical energy, so they can also be considered as SEUs in this stage of the process.

Since electric motors consumed a large fraction of the electrical energy, energy conservation and energy efficiency strategies would have to be targeted at these SEUs to achieve improved energy performance. Saidur et al. (2009) reported that the use of efficient electric motors can reduce the cost of operation and maintenance. Moreover, replacing inefficient motors with high-efficiency models can significantly decrease emissions.

Among the factors observed that could hinder the implementation of energy-saving and efficient energy use strategies are deep-rooted tendencies to continue using obsolete or standard efficiency technologies; lack of knowledge about efficient technologies; absence of regulatory schemes and government obligations, as well as high costs of high efficiency technologies.

### **Total final energy consumption disaggregation levels**

In terms of energy application (the most disaggregated level), the highest diesel consumption in ORHDV occurred in unit SP, with around 6.6 TJ (Table 3), approximately double the consumption in E3 and E5, while the lowest diesel consumption was observed in E4 (2.93 TJ). Both E4 and E2 had the highest gasoline

854.30 tep (35.77 TJ) durante dos años. La Figura 1 muestra los USEn de cada unidad estadística.

La fuente de energía predominante en las seis unidades estadísticas fue el diésel. El consumo de este combustible en VPSPTT fue sustancial al compararlo con los otros usos de energía, ya que representó alrededor de tres cuartos (74.9 %) del CFT. El uso de gasolina en VPSLyMCIP y energía eléctrica en máquinas correspondió al 14.2 % y 10.7 %, respectivamente, mientras que menos del 1 % de la energía provino de lubricantes aditivos empleados en MCIP con motor de gasolina de dos tiempos.

De forma análoga, Donahue et al. (2021) demostraron que el uso de diésel también registró el mayor consumo de energía en aserraderos del estado de Oregón. El diésel y el gas natural representaron en conjunto 93.9 % de los combustibles fósiles utilizados. En la industria del aserrío de Arizona, Colorado y Nuevo México, Loeffler et al. (2016) encontraron que 61 % de la energía empleada provino del diésel, 35 % de la electricidad y 3 % de la gasolina. El resto procedió del propano y residuos de madera.

Los estudios muestran diversos resultados. Berg y Lindholm (2005) indicaron que el diésel fue la mayor fuente de energía utilizada en operaciones forestales en Suecia, aunque la gasolina y la electricidad también se utilizaron de manera sustancial. Por otra parte, en Malasia, Ratnasingam et al. (2017) señalan que 63 % de energía eléctrica se utilizó para el aserrado y corte de la madera, mientras que el diésel (36 %) se usó en el transporte de madera en rollo.

En aserraderos de Canadá, Meil et al. (2009) señalaron que el diésel dominó en actividades de extracción y transporte con 30 % del CFT, mientras que, en el proceso de aserrado, el uso de bioenergía representó 51 % seguido por la electricidad comprada (24 %) y gas natural (17 %). La gasolina y gas propano líquido representaron menos del 1 % del CFT.

En ocho aserraderos en California, Morgan et al. (2019) utilizaron residuos de madera y corteza para la producción de energía, los cuales representaron 87.6 % del CFT, mientras que 1.2 % de la energía eléctrica provino de fuentes renovables; en aserraderos de Montana, 77.3 % del CFT correspondió a bioenergía y los combustibles fósiles como el diésel, la gasolina y el gas natural participaron únicamente con 3.8 %, 0.1 % y 5.6 %, respectivamente. En aserraderos de Noruega, Olsson (2020) encontró que 5 % del CFT correspondió a diésel, 16 % a electricidad y 79 % a biomasa.

De acuerdo con Wan et al. (2012), algunos aserraderos finlandeses han invertido en la producción de bioenergía para la diversificación de su negocio y aumento del valor

**Table 3. Disaggregation of total final energy consumption (TFC) in six sawmills in Pueblo Nuevo, Durango.****Cuadro 3. Desagregación del consumo final total (CFT) de energía en seis aserraderos de Pueblo Nuevo, Durango.**

Statistical unit/ Unidad estadística	ORHDV (TJ)/ VPSPTT (TJ)	LDV&PICEM (TJ)/ VPSLyMCIP (TJ)	PICEM (TJ)/ MCIP (TJ)	EM (TJ)/ ME (TJ)	ADS (TJ)/ ESA (TJ)	Logging (TJ)/ Extracción de madera (TJ)	Sawing (TJ)/ Aserrado de madera (TJ)	TFC* (TJ)/ CFT* (TJ)
E1	4.8011	0.4631	0.0019	0.5464	N/A/ND	4.30	1.52	5.81
E2	5.2136	1.4144	0.0184	0.6441	N/A/ND	5.74	1.55	7.29
E3	3.6017	0.4325	0.0027	0.9872	N/A/ND	3.57	1.46	5.02
E4	2.9255	1.8014	0.0020	0.3841	N/A/ND	4.03	1.08	5.11
E5	3.6609	0.2287	0.0036	0.3509	N/A/ND	3.33	0.91	4.24
SP/UD	6.6464	0.7034	0.0241	0.9093	N/A/ND	3.84	4.44	8.28
TFC/CFT	26.85	5.04	0.05	3.82		24.81	10.95	35.77

\*TFC may not match due to rounding. ORHDV: off-road heavy-duty vehicles, LDV&PICEM: light-duty vehicles and portable internal combustion machines, PICEM: portable internal combustion machines, EM = electric machines, ADS = artificial drying stoves. N/A: not available, SP: sole proprietorship.

\*Los CFT podrían no coincidir debido al redondeo de cifras. VPSPTT: vehículos para servicios pesado todo terreno, VPSLyMCIP: vehículos para servicio ligero y máquinas de combustión interna portátiles, MCIP: máquinas de combustión interna portátiles, ME = máquinas eléctricas, ESA = estufas de secado artificial. ND: no disponible, UD: único dueño.

consumption in LDV&PICEM with around 1.8 and 1.4 TJ, respectively. These values were similar to the combined gasoline consumption in LDV&PICEM of E1, E3, E5, and SP and even higher than the electrical energy consumed in electric machines of these statistical units. E3 and SP had the highest consumption of electrical energy in electric machines, each with around 1 TJ. The remaining statistical units consumed between 0.35 and 0.65 TJ. The use of additive lubricants in PICEM was less than 0.025 TJ in all statistical units.

Regarding the activity (ISIC class), logging required 24.81 TJ (592.67 toe), approximately two-thirds of the final energy use (69 % of TFC). This activity consumed a little over twice the energy compared to sawing (10.95 TJ = 261.63 toe). The unit that consumed the most energy in logging was E2 with 5.74 TJ, which consumed around 2 TJ more than E3, E5, and SP. Most units required between 1 and 1.5 TJ for sawing. In all units, energy consumption for logging was higher than for sawing, except for SP, which recorded the highest TFC with 8.28 TJ, while E5 had the lowest TFC with 4.24 TJ. The aggregated TFC was around 35.77 TJ.

The range of disaggregated data variability and distribution spanned from 0.08 to 0.57 TJ, with an average of 0.25 TJ. The interval  $k > 2$  standard deviations in absolute value comprised approximately 95 % of the observations. Application of Chebyshev's theorem was a conservative estimate.

The TFC varied significantly among statistical units ( $P = 0.0018$ ); in SP, it was significantly higher than in the other units ( $0.35 \pm 0.19$  TJ), while the TFC in E1 ( $0.24 \pm 0.14$  TJ), E2 ( $0.30 \pm 0.16$  TJ), E3 ( $0.21 \pm 0.12$  TJ), E4 ( $0.21 \pm$

añadido a nivel de empresa. El uso de bioenergía en las empresas estudiadas podría representar una oportunidad para utilizar fuentes de energía limpias y renovables y al mismo tiempo contribuir con la mitigación de emisiones de GEI. Los residuos de aserradero podrían utilizarse en plantas de microgeneración de bioenergía y cogeneración, principalmente en forma de astillas (Dudziec et al., 2023).

El presente estudio reveló que la mayoría de los VPSPTT, VPSL y MCIP se utilizaron en la etapa de extracción de madera. Por tanto, la extracción puede ser categorizada como un USEn del proceso productivo forestal maderable. En la etapa de aserrado de madera, las máquinas clasificadas como motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla utilizaron hasta 98 % de la energía eléctrica por lo que también pueden ser considerados como un USEn de dicha etapa del proceso.

Dado que los motores eléctricos consumieron una gran fracción de la energía eléctrica, las estrategias de conservación de energía y eficiencia energética tendrían que ser destinadas a esos USEn para lograr una mejora en el desempeño energético. Saidur et al. (2009) reportaron que el uso de motores eléctricos eficientes puede reducir el costo de operación y mantenimiento. Asimismo, una gran cantidad de emisiones pueden reducirse mediante el reemplazo de motores de alta eficiencia.

Entre los factores observados que podrían impedir la ejecución de estrategias de ahorro y uso eficiente de energía, se encuentran tendencias muy arraigadas al uso continuo de tecnológicas obsoletas o con eficiencia estándar; falta de conocimiento sobre tecnologías eficientes; ausencia de esquemas regulatorios y

0.20 TJ), and E5 ( $0.18 \pm 0.09$  TJ) was statistically similar among them

However, the data behavior at more disaggregated levels was different. The comparison of TFC disaggregation levels is shown in Table 4. Energy consumption in ORHDV, LDV, PICEM, and EM showed significant differences among sawmills ( $P < 0.05$ ). In contrast, during logging, energy consumption showed no significant differences between units, but it did during sawing, where consumption was higher in SP.

It should be emphasized that the energy consumption in each statistical unit depends on several factors such as the number of equipment, the effective operating time and the diversity in electrical and mechanical characteristics (power, performance and efficiency). In addition to these factors, Lijewski et al. (2017) stated that the type of wood (log size, diameter and length), terrain conditions, machine operator skills, environmental conditions, as well as the type of machine used, and its technical condition are also elements of influence in energy consumption Principio del formulario.

Furthermore, it is possible that the decision-making process in social enterprises (E1, E2, E3, E4 and E5) influences TFC when compared to the sole proprietorship (SP). This could be attributed to differences in legal, institutional and operational structures that exist between community forest enterprises and private owners.

Some factors influencing logging may be the surface distribution of the felling areas or the variation in the distances traveled when transporting roundwood standing on a forest road to the sawmill. In the case of sawing, the difference may be the result of two production lines in the SP unit, which would represent a significant additional demand for fossil fuels and electrical energy in the respective machinery.

The difference in fossil fuel consumption at ORHDV, LDV and PICEM could also be influenced by degrees of preventive maintenance and good or bad practices in equipment operation. Fuel efficiency depends strongly on following the operation and maintenance recommendations provided by the manufacturer. The data plates of the electrical machines revealed that the efficiency of the motors ranged from standard to high electrical efficiency. Furthermore, a significant number of motors had been rewound at least once throughout their lifespan. Additionally, noise and vibration levels in the motors, as well as load misalignment, could also contribute to differences in energy consumption.

Thollander et al. (2007) showed that, through the implementation of energy efficiency programs, energy

obligaciones gubernamentales, así como costos elevados de tecnologías de eficiencia alta.

### Niveles de desagregación del consumo final total de energía

En términos de la aplicación de la energía (nivel más desagregado), el mayor consumo de diésel en VPSPTT ocurrió en la unidad UD con alrededor de 6.6 TJ (Cuadro 3), aproximadamente el doble del consumo que en E3 y E5, mientras que el menor consumo de diésel se observó en E4 (2.93 TJ). Tanto E4 como E2 tuvieron los consumos más altos de gasolina en VPSLyMCIP con alrededor de 1.8 y 1.4 TJ, respectivamente. Estos valores fueron similares al consumo conjunto de gasolina en los VPSLyMCIP de E1, E3, E5 y UD e incluso mayores a la energía eléctrica consumida en máquinas eléctricas de dichas unidades estadísticas. E3 y UD tuvieron el mayor consumo de energía eléctrica en máquinas eléctricas con alrededor de 1 TJ cada una. Las unidades estadísticas restantes consumieron entre 0.35 y 0.65 TJ. El uso de lubricantes aditivos en MCIP fue menor de 0.025 TJ en todas las unidades estadísticas.

Con respecto a la actividad (clase de la CIU), la extracción de madera requirió 24.81 TJ (592.67 tep), aproximadamente dos tercios de la energía de uso final (69 % del CFT). Esta actividad consumió un poco más del doble de la energía que en el aserrado de madera (10.95 TJ = 261.63 tep). La unidad que consumió más energía en la extracción fue E2 con 5.74 TJ, la cual consumió alrededor de 2 TJ más que E3, E5 y UD. La mayoría de las unidades requirieron entre 1 y 1.5 TJ para el aserrado. En todas las unidades, el consumo de energía en la extracción fue mayor que en el de aserrado, con excepción de UD que registró el CFT más alto con 8.28 TJ, mientras que en E5 se observó el menor CFT con 4.24 TJ. El CFT agregado fue del orden de 35.77 TJ.

La variabilidad y distribución de los datos desagregados se encontró en el intervalo 0.08 a 0.57 TJ y la media en 0.25 TJ. El intervalo  $k > 2$  desviaciones estándar en valor absoluto, comprendió aproximadamente el 95 % de las observaciones. La aplicación del teorema de Chebyshev fue una estimación conservadora.

El CFT fue significativamente diferente entre unidades estadísticas ( $P = 0.0018$ ); en UD fue significativamente mayor que en el resto de las unidades ( $0.35 \pm 0.19$  TJ), mientras que el CFT en E1 ( $0.24 \pm 0.14$  TJ), E2 ( $0.30 \pm 0.16$  TJ), E3 ( $0.21 \pm 0.12$  TJ), E4 ( $0.21 \pm 0.20$  TJ) y E5 ( $0.18 \pm 0.09$  TJ) fue estadísticamente similar entre ellas.

No obstante, el comportamiento de los datos en niveles más desagregados fue distinto. La comparación de los niveles de desagregación del CFT se muestra en el Cuadro 4. El consumo de energía en VPSPTT, VPSL, MCIP y ME presentó diferencias significativas

**Table 4. Comparison of the disaggregated levels of total final energy consumption (TFC) among six sawmills in Pueblo Nuevo, Durango**  
**Cuadro 4. Contraste de los niveles de desagregación del consumo final total (CFT) de energía en seis aserraderos de Pueblo Nuevo, Durango.**

Statistical Unit/ Unidad estadística	Average (TJ)/ Media (TJ)	Standard Deviation ( $\pm$ TJ)/ Desviación estándar ( $\pm$ TJ)	Median (TJ)/ Mediana (TJ)	F	P
<b>ORHDV/VPSPTT</b>					
E1	0.2001 ab	0.1242	0.2405	4.25	0.0013
E2	0.2172 ab	0.1281	0.2636		
E3	0.1501 a	0.1169	0.2260		
E4	0.1219 a	0.1379	0.0509		
E5	0.1525 a	0.0847	0.2045		
SP/UD	0.2769 b	0.1908	0.3323		
<b>LDV&amp;PICEM/VPSLyMCIP</b>					
E1	0.0193 a	0.0079	0.0201	10.66	0.0001
E2	0.0589 bc	0.0344	0.0541		
E3	0.0180 a	0.0062	0.0184		
E4	0.0751 c	0.0868	0.0280		
E5	0.0095 a	0.0050	0.0121		
SP/UD	0.0293 ab	0.0182	0.0255		
<b>PICEM/MCIP</b>					
E1	0.0001 a	0.00004	0.0001	41.14	0.0001
E2	0.0008 bc	0.0004	0.0010		
E3	0.0001 a	0.0001	0.0002		
E4	0.0001 c	0.0001	0.0001		
E5	0.0001 a	0.0001	0.0002		
SP/UD	0.0010 ab	0.0006	0.0008		
<b>EM/ME</b>					
E1	0.0228 a	0.0136	0.0216	27.46	0.0001
E2	0.0268 b	0.0091	0.0295		
E3	0.0411 c	0.0136	0.0399		
E4	0.0160 a	0.0099	0.0177		
E5	0.0146 a	0.0074	0.0166		
SP/UD	0.0379 c	0.0057	0.0386		
<b>Logging/Extracción de madera</b>					
E1	0.1790 a	0.1111	0.2103	1.82	0.1133
E2	0.2393 a	0.1361	0.2914		
E3	0.1486 a	0.1213	0.2288		
E4	0.1681 a	0.1722	0.1261		
E5	0.1389 a	0.0819	0.1852		
SP/UD	0.1600 a	0.1382	0.2743		
<b>Sawing/Aserrado de madera</b>					
E1	0.0632 a	0.0320	0.0686	43.98	0.0001
E2	0.0645 a	0.0258	0.0663		
E3	0.0607 a	0.0136	0.0594		
E4	0.0450 a	0.0335	0.0335		
E5	0.0380 a	0.0179	0.0460		
SP/UD	0.1851 b	0.0800	0.1632		

ORHDV: off-road heavy-duty vehicles, LDV&PICEM: light-duty vehicles and portable internal combustion machines, PICEM: portable internal combustion machines, ADS = artificial drying stoves, EM = electric machines. Means with different letters are significantly different according to Tukey's test ( $P < 0.05$ ).

VPSPTT: vehículos para servicios pesado todo terreno, VPSLyMCIP: vehículos para servicio ligero y máquinas de combustión interna portátiles, MCIP: máquinas de combustión interna portátiles, ESA = estufas de secado artificial, ME = máquinas eléctricas. Medias con letra distinta son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

efficiency improvements of between 16 % and 40 % can be achieved in small and medium-sized enterprises, respectively. Improving energy efficiency reduces GHG emissions and promotes sustainable development (Cai et al., 2022).

### Annual Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions

Energy consumption per statistical unit was estimated at 2.98 TJ·yr<sup>-1</sup> (71.19 toe·yr<sup>-1</sup>), of which 2.07 TJ·yr<sup>-1</sup> (49.39 toe·yr<sup>-1</sup>) corresponded to logging and 0.91 TJ·yr<sup>-1</sup> (21.80 toe·yr<sup>-1</sup>) to sawing. The average annual consumption of diesel, gasoline, additive lubricants and electricity was estimated at 2.24 TJ·yr<sup>-1</sup> (53.44 toe), 0.42 TJ·yr<sup>-1</sup> (10.04 toe), 0.004 TJ·yr<sup>-1</sup> (0.10 toe) and 0.32 TJ·yr<sup>-1</sup> (7.61 toe), respectively. The TFC of the six companies was approximately 35.77 TJ (854.30 toe).

The mass of GHG emissions, derived from energy consumption per statistical unit, corresponds to 260.14 tCO<sub>2</sub>e·yr<sup>-1</sup>. Logging was the activity responsible for the release of the largest number of emissions with 164.21 tCO<sub>2</sub>e·yr<sup>-1</sup>. Sawing released 95.94 tCO<sub>2</sub>e·yr<sup>-1</sup>. The main direct emission source was the use of fuel oil number two (diesel) in mobile sources, i.e., SEUs in ORHDV. TFC from the companies released 3 121.71 tCO<sub>2</sub>e over the time series.

### Conclusions

This study estimated the final energy consumption derived from logging and sawing activities in six forestry companies. The disaggregation of data facilitated the identification of significant energy uses; only in logging it was possible to accept the hypothesis that energy consumption was not significantly different. The study demonstrated the urgent need for an effective energy management program to enable savings and efficient use of fossil fuels and electricity, thus leading to reduced costs and greenhouse gas emissions. The use of dendroenergy could present a viable alternative for optimizing energy consumption in sawmills.

### Acknowledgments

The authors would like to thank the anonymous editors and reviewers for their careful reading of our manuscript and their valuable comments and suggestions. We also extend our gratitude to the Science and Technology Council of the state of Durango and the National Technological Institute of Mexico.

entre aserraderos ( $P < 0.05$ ). En contraste, durante la extracción de madera, el consumo energético no mostró diferencia significativa entre unidades, pero sí en el aserrado, donde el consumo fue mayor en UD.

Debe enfatizarse que el consumo energético en cada unidad estadística depende de varios factores como el número de equipamientos, el tiempo efectivo de operación y la diversidad en características eléctricas y mecánicas (potencia, rendimiento y eficiencia). Aunado a estos factores, Lijewski et al. (2017) afirmaron que el tipo de madera (tamaño del tronco, diámetro y longitud), las condiciones del terreno, las habilidades del operador de la máquina, las condiciones ambientales, así como el tipo de máquina utilizada y su condición técnica también son elementos de influencia en el consumo de energía.

Adicionalmente, es posible que el proceso de toma de decisiones en empresas sociales (E1, E2, E3, E4 y E5) influya en el CFT al compararlo con la empresa con único dueño (UD). Esto podría atribuirse a diferencias en las estructuras jurídicas, institucionales y operacionales que existen entre empresas forestales comunitarias y propietarios particulares.

Algunos factores de influencia en la etapa de extracción pueden ser la distribución superficial de las áreas de corta o la variación en las distancias recorridas en el transporte de madera en rollo a planta o libre a bordo en brecha. En el caso del aserrado, es posible que la diferencia se deba a que en la unidad UD existen dos líneas de producción, lo que implicaría una demanda adicional significativa de combustibles fósiles y energía eléctrica en la maquinaria correspondiente.

La diferencia en el consumo de combustibles fósiles en VPSPTT, VPSL y MCIP podría estar también influenciada por los grados de mantenimiento preventivo y las buenas o malas prácticas en la operación del equipamiento. Es probable que el rendimiento del combustible dependa en gran medida de que se obedezcan las recomendaciones de operación y mantenimiento proporcionadas por el fabricante. Las placas de datos de las máquinas eléctricas revelaron que la eficiencia de los motores se ubicaba entre una eficiencia eléctrica estándar y alta. Además, un gran número de motores habían sido rebobinados al menos una vez a lo largo de su vida útil. Asimismo, los niveles de ruidos y vibraciones en los motores, así como el desalineamiento de cargas podrían ser también una causa de la diferencia en el consumo de energía.

Thollander et al. (2007) demostraron que, mediante la implementación de programas de eficiencia energética, se puede lograr la mejora del rendimiento energético entre 16 % y 40 % en pequeñas y medianas empresas,

*End of English version*

## Referencias / Referencias

- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (2011). Procedures for commercial building energy audits. Author.
- Berg, S., & Lindholm, L. (2005). Energy use and environmental impacts of forests operations in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 13(1), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.09.015>
- Cai, W., Wang, L., Li, L., Xie, J., Jia, S., Zhang, X., Jiang, Z., & Lai, H. (2022). A review on methods of energy performance improvement towards sustainable manufacturing from perspectives of energy monitoring, evaluation, optimization and benchmarking. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112227. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112227>
- Capehart, L., Turner, C., & Kennedy, J. (2012). *Guide to energy management*. The Fairmont Press.
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (June 2, 2022). Precios de gasolinas y diésel reportados por los permisionarios. <https://www.cre.gob.mx/ConsultaPrecios/GasolinasyDiesel/GasolinasyDiesel.html>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2019). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2018*. [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/442910/Aviso\\_Factor\\_de\\_Emisiones\\_2018.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/442910/Aviso_Factor_de_Emisiones_2018.pdf)
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2018). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2017*. [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/304573/Factor\\_de\\_Emisi\\_n\\_del\\_Sector\\_Elctrico\\_Nacional\\_1.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/304573/Factor_de_Emisi_n_del_Sector_Elctrico_Nacional_1.pdf)
- Di Rienzo, A., Casanoves, F., Balzarini, G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, W. (2019). *InfoStat versión 2019*. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Donahue, T., Morgan, T., & Dillon, T. (2021). Oregon sawmill energy consumption and associated emissions, 2017. <https://www.oregon.gov/odf/forestbenefits/Documents/or-sawmill-energy-consumption-associated-emissions-2017.pdf>
- Dudziec, P., Stachowicz, P., & Stolarski, J. (2023). Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. *Renewable Energy*, 202, 822–833. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.002>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1991). *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. Author. <https://www.fao.org/3/t0269s/T0269S00.htm>
- Hamit-Haggar, M. (2012). Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: A panel cointegration analysis from Canadian industrial sector perspective. *Energy Economics*, 34(1), 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.06.005>
- International Energy Agency (IEA). (2015). Energy efficiency indicators: essentials for policy making. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-essentials-for-policy-making>
- International Energy Agency (IEA). (2016). Energy efficiency indicators: Fundamental on statistics. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-fundamentals-on-statistics>
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *Energy management system – requirements with guidance for use. ISO 50001*. <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- respectivamente. La mejora del rendimiento energético reduce las emisiones de GEI y promueve el desarrollo sostenible (Cai et al., 2022).

### Consumo de energía anual y emisiones de gases de efecto invernadero

El consumo de energía por unidad estadística se estimó en 2.98 TJ·año<sup>-1</sup> (71.19 tep·año<sup>-1</sup>), de los cuales 2.07 TJ·año<sup>-1</sup> (49.39 tep·año<sup>-1</sup>) correspondieron a la extracción de madera y 0.91 TJ·año<sup>-1</sup> (21.80 tep·año<sup>-1</sup>) al aserrado. El consumo medio anual de diésel, gasolina, lubricantes aditivos y electricidad se estimó en 2.24 TJ·año<sup>-1</sup> (53.44 tep), 0.42 TJ·año<sup>-1</sup> (10.04 tep), 0.004 TJ·año<sup>-1</sup> (0.10 tep) y 0.32 TJ·año<sup>-1</sup> (7.61 tep), respectivamente. El CFT de las seis empresas en conjunto fue del orden de 35.77 TJ (854.30 tep).

La masa de emisiones de GEI, derivada del consumo de energía por unidad estadística, corresponde a 260.14 tCO<sub>2</sub>e·año<sup>-1</sup>. La extracción de madera fue la actividad responsable de la liberación de la mayor cantidad de emisiones con 164.21 tCO<sub>2</sub>e·año<sup>-1</sup>. El aserrado de madera liberó 95.94 tCO<sub>2</sub>e·año<sup>-1</sup>. La principal fuente de emisión directa fue el uso de combustible número dos (diésel) en fuentes móviles; es decir, el USEn en VPSPTT. El CFT de las empresas en conjunto liberó 3 121.71 tCO<sub>2</sub>e durante la serie temporal.

### Conclusiones

En este estudio se estimó el consumo final de energía derivado de las actividades de extracción y aserrado de madera en seis empresas forestales. La desagregación de datos facilitó la identificación de los usos significativos de la energía; solo en la actividad de extracción de madera fue posible aceptar la hipótesis de que el consumo de energía no fue significativamente diferente. El estudio demostró que es apremiante un programa de gestión efectiva de la energía que posibilite el ahorro y uso eficiente de combustibles fósiles y energía eléctrica y, por consiguiente, la reducción en los costos y en las emisiones de GEI. El uso de dendroenergía podría representar una alternativa viable para la optimización del consumo de energía en los aserraderos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a los editores y revisores anónimos por la lectura cuidadosa de nuestro manuscrito y sus valiosos comentarios y sugerencias. Al Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Durango y al Tecnológico Nacional de México.

*Fin de la versión en español*

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. In H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.). IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer (Eds.). Author. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Lee, H., & Birol, F. (2020). *Energy is at the heart of the solution to the climate change*. <https://www.ipcc.ch/2020/07/31/energy-climatechallenge/>
- Lijewski, P., Merksiz, J., Fuć, P., Ziólkowski, A., Rymaniak, Ł., & Kusiak, W. (2017). Fuel consumption and exhaust emissions in the process of mechanized timber extraction and transport. *European Journal of Forest Research*, 136(1), 153–160. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-1015-2>
- Loeffler, D., Anderson, N., Morgan, T. D., & Sorenson, C. B. (2016). On-site energy consumption and selected emissions at softwood sawmills in the Southwestern United States. *Forest Products Society*, 66(5/6), 326–337. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-15-00060>
- McKinsey & Company. (2022). Global energy perspective 2022 report. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf>
- Meil, J., Bushi, L., Garrahan, P., Aston, R., Gingras, A., & Elustondo, D. (2009). *Status of energy use in the Canadian wood products sector*. Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC). <https://library.fpinnovations.ca/en/viewer?file=%2fmedia%2fWP%2f2780.pdf#phrase=false&pagemode=bookmarks>
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Cengage Learning.
- Meza, P., Trujillo, M., Burciaga, A., De la Cruz, R., & Nájera, J. (2021). Carbon footprint estimate in the primary wood processing industry in El Salto, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 127–142. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.060>
- Morgan, T., Donahue, T., Rosenberg, M., & Christensen, G. (2019). Energy use and emissions by the California Sawmill Sector, 2016. [https://bof.fire.ca.gov/media/9689/ca-sawmill-energy-report\\_final\\_20\\_9-16-19\\_v1\\_ada.pdf](https://bof.fire.ca.gov/media/9689/ca-sawmill-energy-report_final_20_9-16-19_v1_ada.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2009). Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas (CIU) revisión 4. [https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm\\_4rev4s.pdf](https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4s.pdf)
- Navarrete, F., & Labelle, F. (2023). Gestión energética y desarrollo organizacional sostenible en las pequeñas medianas empresas de Jalisco. *Trascender, Contabilidad y Gestión*, 8(22), 2–18. <https://doi.org/10.36791/tcg.v8i22.194>
- Olsson, M. (2020). *Energy management in the Norwegian sawmill industry*. [https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/eceee\\_Industrial\\_Summer\\_Study/2020/3-energy-management/energy-management-in-the-norwegian-sawmill-industry/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2020/3-energy-management/energy-management-in-the-norwegian-sawmill-industry/)
- Pro Floresta S. C. (2008). *Estudio regional forestal UMAFOR 1008 Pueblo Nuevo Durango*. [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/1134ERF\\_UMAFOR1008.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/1134ERF_UMAFOR1008.pdf)
- Ratnasingam, J., Ramasamy, G., Ioras, F., & Parasuraman, N. (2017). Assessment of the carbon footprint of rubberwood sawmilling in peninsular Malaysia: Challenging the green label of the material. *BioResources*, 12(2), 3490–3503. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3490-3503>
- Reyes, A., Quiñones, P., Meza, P., Nájera, J., & Díaz, B. (2022). Aplicación de la función de la producción como indicador de desempeño energético en una empresa forestal. *Academia Journals*, 14(4), 414–419. <https://www.academiajournals.com/puboaxaca2022>
- Saidur, R., Rahim, N. A., Masjuki, H. H., Mekhilef, S., Ping, H. W., & Jamaluddin, M. F. (2009). End-use energy analysis in the Malaysian industrial sector. *Energy*, 34(2), 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.11.004>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). Anuario estadístico de la producción forestal 2018. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Secretaría de Energía (SENER). (2021). Balance nacional de energía 2020. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE\\_NACIONAL\\_ENERGIA\\_0403.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf)
- Thollander, P., Danestig, M., & Rohdin, P. (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. *Energy Policy*, 35(11), 5774–5783. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.013>
- Wan, M., Lähäinen, K., Toppinen, A., & Toivio, M. (2012). Opportunities and challenges in the emerging bioenergy business: The case of the Finnish sawmill industry. *International Journal of Forest Engineering*, 23(2), 89–101. <https://doi.org/10.1080/14942119.2012.10739965>
- World Business Council Sustainable Development & World Resources Institute (2005). *A corporate accounting and reporting standard*. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>
- Xing, X., Cong, Y., Wang, Y., & Wang, X. (2023). The impact of COVID-19 and war in Ukraine on energy prices of oil and natural gas. *Sustainability*, 15(19), 14208. <https://doi.org/10.3390/su151914208>