

Inventario de biomasas y capacidades para el aprovechamiento para la generación de energía



Elaborado por:
Nicolás Javier Gil Zapata
Andrés Felipe Ospina
William Alexander Ojeda Muñoz
Joselyn Pérez Duque
William Royeiro Villamuez

Apoya:



Opera:



El corazón
que impulsa
a Colombia

Lidera:



Resumen ejecutivo

1 Introducción

El proyecto ejecutado se enmarca en la estrategia nacional de innovación de Ecopetrol para la creación y operación del Centro de Innovación Econova Valle, una iniciativa con foco en bioenergía orientada a fomentar la ciencia, la tecnología y el emprendimiento a nivel nacional e internacional. En el contexto de este acuerdo de cooperación, se planteó la necesidad de realizar un estudio sectorial para identificar las dinámicas de oferta, demanda, potencialidades, sinergia e innovación en la cadena de valor de la bioenergía en el departamento del Valle del Cauca. Dado que el departamento cuenta con una marcada vocación agroindustrial, el aprovechamiento de su biomasa residual representa una oportunidad estratégica clave para diversificar la matriz energética regional, mitigar el déficit de energía en el territorio y responder a la búsqueda continua de nuevas fuentes de generación sostenible.

Para la ejecución de este diagnóstico técnico y territorial, se requirió la vinculación de Cenicaña como aliado técnico, dada su reconocida trayectoria nacional en investigación e innovación, generación de conocimiento sobre biomasa y profundo entendimiento del sector agroindustrial de la región. El estudio consolida un análisis globalizado de los recursos bioenergéticos y la infraestructura del departamento, evaluando la disponibilidad física de los residuos en sus 42 municipios, así como las capacidades tecnológicas e institucionales activas en la zona. Finalmente, mediante la integración de variables de oferta, demanda y madurez tecnológica, el informe provee un esquema estratégico de priorización que jerarquiza los sectores y territorios con mayor aptitud, constituyendo un instrumento analítico fundamental para orientar la toma de decisiones y el despliegue de futuros proyectos de bioenergía en el Valle del Cauca.

2 Objetivos del proyecto

2.1 Objetivo general

Aunar esfuerzos técnicos, administrativos, financieros y humanos para identificar las capacidades de producción y transformación de la biomasa en el Valle del Cauca, cuantificar su potencial energético, realizar su georreferenciación y establecer la

priorización de los sectores con mayor viabilidad de aprovechamiento, como insumo para el diseño de estrategias que promuevan el uso sostenible de recursos y contribuyan al fortalecimiento de la competitividad regional.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la oferta y demanda energética del Valle del Cauca.
- Identificar y cuantificar la biomasa residual disponible.
- Evaluar las capacidades tecnológicas y logísticas para su transformación.
- Estimar el potencial energético total y por tipo de biomasa.
- Georreferenciar los actores y recursos bioenergéticos.
- Priorizar sectores productivos con mayor viabilidad técnica y energética.

3 Metodología

La metodología del estudio se desarrolló de manera secuencial para identificar, cuantificar, caracterizar y priorizar las oportunidades de aprovechamiento energético de biomasa en el Valle del Cauca. Inicialmente se construyó una línea base energética del departamento mediante el análisis de la oferta y demanda de energía, identificando las principales fuentes energéticas utilizadas, los patrones de consumo por sector económico, la infraestructura energética disponible y las tendencias de precios y consumo. Para ello se recopilaron datos provenientes de fuentes oficiales como UPME, XM, Ministerio de Minas y Energía y DANE, los cuales fueron normalizados a unidades energéticas comparables (TJ) para facilitar su análisis e integración.

Posteriormente se desarrolló el inventario de biomasa residual del departamento, mediante la identificación de los principales residuos generados por los sectores agrícola, pecuario, forestal, industrial y urbano. A partir de información secundaria proveniente de entidades oficiales, gremios y publicaciones científicas, se estimaron los volúmenes de biomasa generados en cada municipio mediante la aplicación de factores de generación de residuos asociados a las actividades productivas.

De forma complementaria, se realizó un análisis del estado actual de aprovechamiento de estas biomasa, identificando usos energéticos y no energéticos, al igual que se estudiaron las cadenas productivas y de abastecimiento de biomasa representativas de cada sector con el fin de comprender la dinámica de generación, manejo, transporte y disposición de los residuos.

Una vez identificada la oferta de biomasa, se evaluaron las capacidades existentes en el Valle del Cauca para su transformación energética. Esta etapa incluyó la revisión de tecnologías de pretratamiento, procesamiento y conversión aplicables a las biomásas identificadas, así como la evaluación de su nivel de madurez tecnológica y grado de implementación. Paralelamente, se realizó un mapeo de actores estratégicos, incluyendo empresas proveedoras de tecnología, universidades, centros de investigación, laboratorios especializados y plantas de transformación existentes en el departamento. Como resultado, se consolidó un portafolio de tecnologías y capacidades regionales para la valorización energética de biomasa.

Posteriormente se estimó el potencial energético de las biomásas identificadas. Para ello, los volúmenes disponibles de biomasa fueron convertidos en energía teórica mediante la aplicación del Poder Calorífico Superior (PCS) en base seca, reportado en literatura por cada biomasa, para determinar el contenido energético intrínseco de cada material. Se determinó la energía potencial útil mediante la incorporación de eficiencias representativas para tecnologías de digestión anaerobia, combustión y gasificación dependiendo de las características de la biomasa que designan su aptitud para ser aprovechada energéticamente por vías termoquímicas o bioquímicas. Los resultados fueron consolidados por biomasa, municipio, sector productivo y tipo de energético generado, permitiendo identificar las principales fuentes de contribución al potencial bioenergético departamental.

Con la información obtenida se desarrolló un proceso de georreferenciación orientado a representar espacialmente la distribución de las biomásas residuales y el potencial energético asociado. A través de mapas temáticos se visualizaron las zonas con mayor disponibilidad de biomasa y los municipios con mayores potenciales energéticos.

Finalmente, se llevó a cabo un proceso de priorización de sectores productivos y territorios para el aprovechamiento energético de biomasa. Para ello se definieron criterios de evaluación asociados a la viabilidad técnica, la disponibilidad de biomasa y las condiciones territoriales, los cuales fueron ponderados mediante consulta a expertos pertenecientes a los sectores energético, académico y productivo. Los criterios ponderados fueron integrados en una matriz multicriterio que incorporó información sobre potencial energético, disponibilidad de biomasa, concentración territorial e infraestructura energética. Mediante la aplicación del método TOPSIS se obtuvo un ranking de priorización que permitió identificar las combinaciones de

biomasa, tecnología y municipio con mayores condiciones para el desarrollo de proyectos de bioenergía en el Valle del Cauca.

4 Resultados

4.1 Balance energético departamental

En este capítulo se presenta el análisis la oferta/demanda de energía en el departamento, la identificación de la infraestructura energética departamental y el análisis de precios de los principales energéticos consumidos en el Valle del Cauca. Para ello se estructuró una taxonomía bajo estándares de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Balance Energético Colombiano (BECO) clasificando los energéticos por origen y nivel de transformación, asociando y compilando series históricas de bases de datos oficiales (XM, SUI, UPME, SICOM, DANE, entre otras) y estandarizando las unidades físicas a equivalencias energéticas en Terajulios (TJ). Para la caracterización y análisis de la demanda, la metodología contempló la segmentación del consumo por sectores económicos (Industrial, transporte, residencial y comercial) y fuentes energéticas, calculando indicadores de intensidad específica e identificando patrones históricos.

El análisis de infraestructura se realizó mediante un levantamiento geoespacial de los tres sistemas energéticos relevantes en el departamento:

- Para el sistema eléctrico, se segmentó la topología de la red de manera jerárquica por niveles de tensión (500kV, 230kV y 115 kV), identificando nodos críticos de vulnerabilidad. También se caracterizó la capacidad de generación de las plantas hidráulicas, térmicas, solar fotovoltaica, auto/cogeneración del departamento.
- Para el gas natural y los combustibles líquidos, la metodología caracterizó las rutas de transporte (gasoductos de TGI y poliductos operados por CENIT), evaluando las capacidades nominales, diámetros, operación por "baches" (lotes secuenciales de refinados) e inventariando puntos de entrega mayoristas (City Gates, plantas de abasto y estaciones de rebombeo).

El análisis de precios consistió en convertir todas las diversas estructuras tarifarias a una unidad estandarizada: \$COP/TJ , permitiendo comparar el comportamiento de cada uno de los energéticos en series históricas en el periodo enero 2020 – diciembre 2024.

Finalmente, se acoplaron las proyecciones de precios energéticos para el periodo 2026-2050 a partir de la adopción y regionalización de la base de datos oficial de "Proyecciones de Precios de Energéticos 2024-2050" desarrollada por la UPME (versión 2025)

4.1.1 Demanda energética departamental

Este estudio determinó que la demanda energética promedio del Valle del Cauca para el periodo 2021-2023 se situó en **181,192 Terajulios (TJ) por año**. De acuerdo con los datos del Balance Energético Colombiano (BECO) de la UPME, esta cifra representa aproximadamente el 12% del consumo total del país, el cual registró un promedio de **1,508,283 Terajulios (TJ)** por año durante ese mismo periodo.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la matriz energética del Valle del Cauca frente al promedio nacional, impulsada por su perfil agroindustrial. Aunque la región es un nodo logístico clave que conecta con Buenaventura, el peso de la gasolina (18% vs. 21%) y el ACPM (17% vs. 21%) es porcentualmente inferior al de Colombia debido a un "efecto de dilución" dado a que la base manufacturera es tan masiva que reduce la participación relativa del transporte. Un reflejo de esta fortaleza industrial es el bagazo de caña, que emplea un sobresaliente 17% de la matriz regional frente al 5% nacional, concentrada en los ingenios y se destina a procesos fabriles internos y a la cogeneración de energía eléctrica para autoconsumo y venta de excedentes a la red eléctrica nacional.

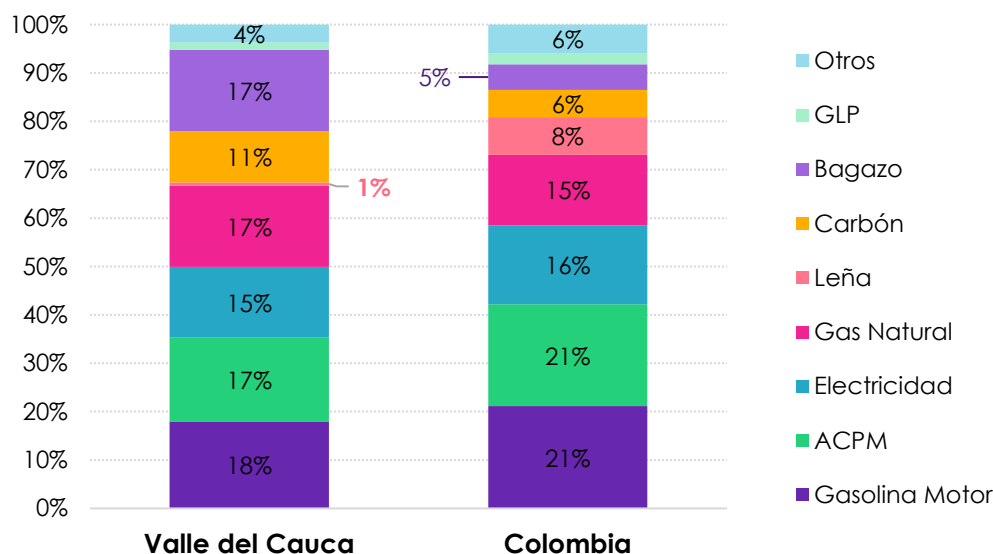


Figura 1 Matriz energética Valle del Cauca vs Colombia (año: 2023)

También se destaca un bajo uso de leña en el Valle del Cauca 1% frente al 8% nacional; una de las razones está asociada a una mayor cobertura municipal de la red de suministro de gas natural y uso del GLP, siendo relegado el uso de leña en zonas rurales. El gas natural registra un 17% departamental frente al 15% nacional, impulsados por el uso a nivel residencial y comercial, así como por el uso de plantas termoeléctricas (Termovalle y Termoemcali) para el respaldo eléctrico en periodos de sequía. Finalmente, la mayor presencia de carbón (11% vs. 6%), justificada por la alta demanda térmica de industrias como papel y cartón, ratifica que el departamento posee sistema altamente industrializado.

El análisis sectorial del Valle del Cauca (ver Tabla 1) muestra que la demanda está concentrada en un 82.5% en sus sectores productivos y logísticos. El Sector Industrial lidera con el 47.2%, impulsado por un clúster manufacturero y agroindustrial que utiliza bagazo de caña, carbón, electricidad y gas natural. En 2023, el sector industrial registró una sustitución térmica importante cuando el consumo de carbón (usado principalmente en papel y cartón) cayó un 62.2% frente al aumento de electricidad y gas natural que se emplearían como sustituto. Por su parte, el Sector Transporte representa el 35.3% de la demanda, reflejando el rol del departamento como corredor logístico hacia el Puerto de Buenaventura, así como una alta dinámica de transporte intermunicipal, de vehículos a gasolina y de carga de materias primas industriales. Finalmente, los sectores Residencial (10%), Comercial (4.1%) y Otros (3.3%) completan la matriz regional con un consumo orientado principalmente al uso de servicios públicos.

Tabla 1 Consumo final energético por sectores para el Valle del Cauca. Elaboración propia con base en datos

Sector (TJ)	2021	2022	2023
Transporte	59,041	65,726	66,533
Industria	86,724	101,487	69,928
Residencial	18,650	18,660	17,019
Comercial	7,215	7,232	7,666
Otros	6,055	6,153	5,887
Total	177,683	199,258	167,034

4.1.2 Oferta energética interna departamental

Los hallazgos presentan una oferta energética regional promedio de 50,794 TJ/año en el periodo 2021-2023, la cual se encuentra fuertemente marcada por el aprovechamiento del bagazo de caña el cual es el energético principal, representando aproximadamente el 67% de la oferta primaria, seguido por la generación hidráulica con un 17%, el bioetanol con un 8% y la cogeneración con un 3%, mientras que la energía solar aún mantiene una participación reducida del 0.3%.

La oferta de energía eléctrica local en el Valle del Cauca mantiene una tendencia al alza, aumentando de un promedio cercano a los 2,800 GWh/año (10,800 TJ) entre 2020 y 2021 a 3,280 GWh (11,800 TJ) en 2023, hasta alcanzar los 3,699 GWh (13,312 TJ) en 2024. Para respaldar esta producción, la capacidad instalada proyectada a 2025 está liderada por la energía hidráulica con 641.3 MW; esta es la principal fuente del departamento, pero es altamente vulnerable a la variabilidad climática como el Fenómeno de El Niño. En segundo lugar, se ubica la generación térmica con 466.0 MW, representada por las termoeléctricas Termovalle y Termoemcali, las cuales cumplen un rol estratégico de respaldo que se activa únicamente ante sequías o caídas hídricas, quedando condicionadas a la disponibilidad y precios del gas natural y el ACPM.

Por otra parte, la cogeneración de los ingenios aporta una capacidad instalada de 370 MW a partir del bagazo de caña, con una capacidad de entrega de excedentes de 89.5 MW, lo que conlleva a una producción cercana a los 1,800 GWh anuales. La mayor

parte de este recurso se destina al autoconsumo fabril de los ingenios, de modo que solo se inyectan al Sistema Interconectado Nacional (SIN) sus excedentes, mediante los cuales las 9 plantas ubicadas estrictamente en el departamento aportan entre 780 y 850 GWh/año a la oferta eléctrica local. Finalmente, la energía solar fotovoltaica, con una capacidad de 158.2 MW, se consolida como la tecnología con el crecimiento más acelerado de la región, multiplicando su capacidad aproximadamente 2.5 veces entre 2022 y 2025 gracias al desarrollo de nuevos proyectos y sistemas de autogeneración industrial.

4.1.3 Balance energético departamental

El Valle del Cauca presenta un déficit de energía estimado en 131,288 TJ anuales, derivado de la brecha entre una demanda superior a los 181,192 TJ/año y una oferta interna limitada a solo 50,794 TJ/año. Esta condición obliga al departamento a actuar como un importador neto de sus recursos energéticos. En el sector eléctrico, a pesar de contar con una matriz local diversificada, la producción propia no logra cubrir el consumo interno, registrando un déficit promedio de **3,730 GWh anuales (13,430 TJ/año)**; esto fuerza la importación de cerca del 50% de la electricidad desde el Sistema Interconectado Nacional (SIN) proveniente de otros departamentos.

En cuanto a los combustibles, la dependencia externa es drástica en los sectores térmicos y de movilidad. La región presenta una dependencia total (100%) de gas natural debido a la ausencia de producción local, debiendo abastecer a su clúster industrial, residencial y termoeléctrico mediante el gasoducto troncal Mariquita-Cali con recurso proveniente de los Llanos Orientales. Una dinámica similar ocurre con el carbón mineral, donde la extracción interna apenas cubre el 2% de la exigencia térmica regional (liderada por el sector de papel y cartón), obligando a traer el 98% restante de otros departamentos. Finalmente, para sostener el transporte, el departamento importa masivamente gasolina y ACPM a través del poliducto de CENIT desde Barrancabermeja/Cartagena. En conjunto, el 89% de la energía importada a la región es de fuentes no renovable, principalmente en forma de derivados del petróleo, gas natural y carbón. La Figura 2 presenta el diagrama sankey que refleja el balance energético del Valle del Cauca para 2023.

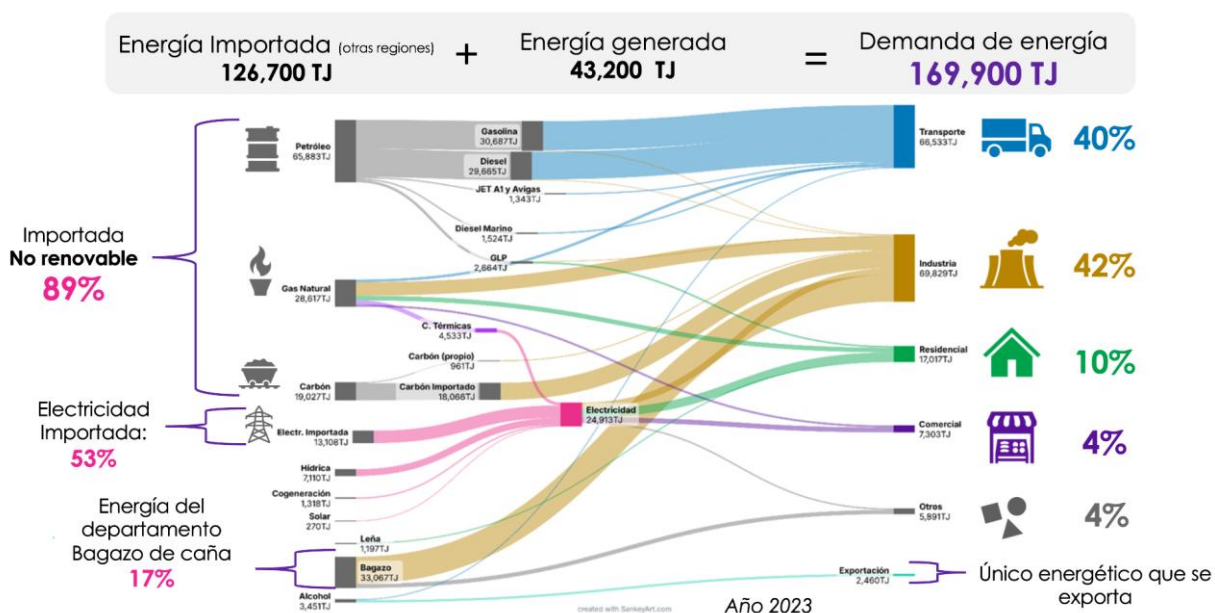


Figura 2 Diagrama de Sankey del Balance Energético del Valle del Cauca (2023). Elaboración propia

4.1.4 Identificación de infraestructura energética departamental

La infraestructura energética del Valle del Cauca se articula en tres sistemas principales: eléctrico, gasoductos y poliductos.

4.1.4.1 Caracterización de la Infraestructura eléctrica regional

El departamento opera con una alta dependencia de importaciones del Sistema Interconectado Nacional (SIN), soportada por una infraestructura jerarquizada, cuya capacidad instalada corresponde a 13 plantas hidráulicas (641 MW), 12 plantas térmicas (555 MW), donde 2 de estas actúan principalmente como respaldo, y una creciente participación de 29 plantas solares (158 MW). Las puertas de entrada del recurso externo corresponden a los nodos del Sistema de Transmisión Nacional (STN) a 500/230 kV, donde destaca la Subestación La Virginia en Risaralda para regular los flujos desde el norte del país y la Subestación San Marcos en Yumbo como el punto de interconexión. Esta energía se inyecta a la Red de Transmisión Regional (STR) a 230 kV, configurada como un gran anillo de alta tensión que rodea los principales centros de consumo (Cali y Yumbo) y permite un flujo bidireccional mediante nodos como Yumbo, Alférez, Juanchito y Pance.

Aguas abajo, la Red de Subtransmisión a 115 kV conecta el sistema nacional con la distribución local a través de tres clústeres operativos especializados. El primero es el

Corredor Agroindustrial en el centro y norte del departamento, caracterizado por la capacidad bidireccional de nodos como Tuluá, Buga, Zarzal y La Paila para recibir la cogeneración de los ingenios azucareros, contando además con la subestación Cartago como frontera de redundancia con el Eje Cafetero. El segundo es el Anillo de Carga Industrial y Térmica (Yumbo-Cali), que registra la mayor densidad eléctrica del departamento al alimentar subestaciones fabriles críticas (Acopi, Arroyohondo) y conectar directamente el respaldo térmico de Termovalle y Termoemcali para sostener el voltaje urbano. Finalmente, el Nodo Pacífico abastece a Buenaventura mediante la subestación Pailón y evacúa la energía de Bajo Anchicayá.

4.1.4.2 Transporte de gas natural

El servicio de transporte de gas natural en Colombia se presta a través del Sistema Nacional de Transporte (SNT), una red integrada de gasoductos que conecta los principales campos de producción con los centros de consumo industrial, térmico, comercial y residencial del país. Esta red se extiende desde el campo de Ballenas, en el departamento de La Guajira, hasta el suroccidente colombiano, incluyendo el Valle del Cauca; y desde los Llanos Orientales, particularmente el campo de Cusiana, hacia los departamentos del Huila, Tolima y el centro del país, atravesando múltiples departamentos de la región andina.

El transporte de gas natural es operado principalmente por dos grandes empresas, Promigas, que atiende principalmente la zona norte y la Costa Caribe colombiana y Transportadora de Gas Internacional (TGI), que opera la red de transporte del interior del país.

La infraestructura operada por TGI se constituye por el eje estructural del transporte de gas natural en el interior del país, con aproximadamente 4,000 km de longitud, donde, el gasoducto de entrada de gas natural al Valle del Cauca es el troncal, cuyo ingreso se da por la línea Mariquita- Cali (342 km, 20 pulgadas), con una capacidad de 168 MPCD.

Su distribución se da a partir del Distrito VIII (Buga) con 37 puntos de salida. Se destacan dos ramales: el Occidental, que alimenta las térmicas Termoemcali y Termovalle en Yumbo, y el Suroriental, que atraviesa el clúster azucarero hasta Jamundí. Específicamente, en el Valle del Cauca se cuenta con los siguientes operadores:

TransOccidente, que transporta gas desde Yumbo a Cali, y Gases de Occidente, que opera 140 estaciones de regulación y medición para el mercado final.

4.1.4.3 Transporte de combustibles líquidos

En Colombia, el transporte de los principales combustibles líquidos refinados se realiza a través de la red nacional de poliductos operada por CENIT Transporte y Logística de Hidrocarburos, empresa filial del grupo Ecopetrol.

El transporte en los poliductos se realiza mediante operación por baches, esquema en el cual distintos productos refinados se movilizan secuencialmente dentro de la misma tubería. Cada lote es programado hidráulicamente considerando las propiedades físicoquímicas del combustible como densidad, viscosidad y compatibilidad con otros productos con el fin de minimizar la mezcla en las interfases y optimizar la eficiencia operativa del sistema.

Su abastecimiento para el Valle del Cauca se da por la zona oeste mediante los corredores Medellín-Cartago y Salgar-Cartago, donde Cartago funciona como nodo estratégico que redistribuye hacia Yumbo y Buenaventura.

Adicionalmente, aunque el Valle cuenta con el Propanoducto Salgar-Cartago-Yumbo, también existe una fuerte logística terrestre para el GLP importado por el puerto de Buenaventura, el cual se transporta en cisternas directamente hacia las plantas de envasado.

4.1.5 Análisis de precios de los energéticos

El análisis de precios de los energéticos en el Valle del Cauca está fuertemente condicionado por el marco normativo, el cual divide el mercado en dos grandes grupos:

- **Mercado Regulado:** Segmento donde las tarifas de energía son definidas por la metodología establecida por la CREG, aplicable principalmente a usuarios residenciales y pequeños consumidores.
- **Mercado No Regulado:** Segmento conformado por grandes consumidores que negocian libremente las condiciones y precios de suministro con generadores o comercializadores de energía.

Se consolidó una base de datos para comparar los precios relativos de los principales energéticos en el Valle del Cauca a partir de fuentes oficiales (SUI, SICOM y UPME). Para

ello, se recopilaban precios promedio indicativos a usuario final mediante criterios específicos: en electricidad se calculó el promedio ponderado de usuarios regulados y no regulados; en gas natural se emplearon valores facturados y el costo unitario según el periodo; en GLP se utilizó el promedio ponderado de venta minorista; y en gasolina y ACPM se tomaron los precios de venta al público en estaciones de servicio. La evolución de los precios muestra una tendencia general creciente para la mayoría de los energéticos analizados, particularmente a partir del período 2021–2022, aunque con episodios intermedios de estabilidad o ajustes asociados a condiciones específicas del mercado (Ver Figura 3).

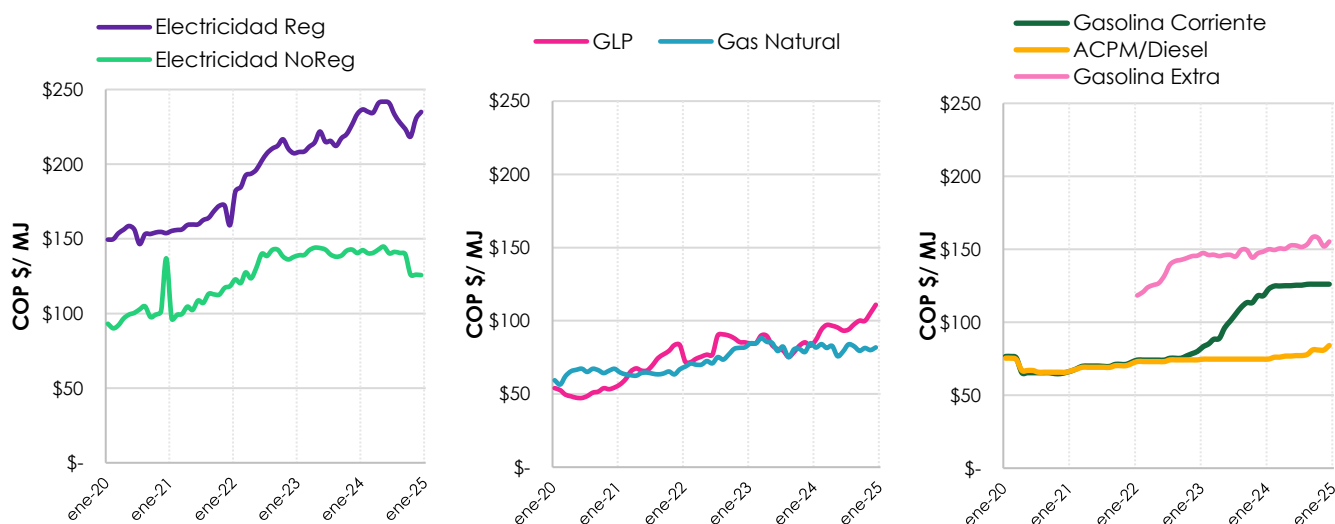


Figura 3 Histórico de precio de venta promedio de energéticos al usuario final

4.1.5.1.1 Energía eléctrica

La electricidad se consolida como el energético más costoso al ser comparado en términos homogéneos (\$/TJ) con combustibles como el gas natural, el GLP y el ACPM. Esta condición responde a su naturaleza como energético secundario, lo que implica que su estructura de costos absorbe e incorpora de manera acumulativa el precio de los recursos primarios, los procesos de conversión y las tecnologías que participan a lo largo de toda la cadena de generación.

Esta dependencia estructural se acentúa de manera crítica ante la vulnerabilidad climática del sistema de generación. Durante periodos de sequía prolongada o ante la presencia del Fenómeno de El Niño, la pérdida de los aportes hídricos obliga al parque generador a incrementar sustancialmente el despacho de plantas termoeléctricas que operan con insumos de alto costo, principalmente gas natural y combustibles líquidos.

Esta dinámica presiona fuertemente las tarifas al alza y explica la marcada trayectoria creciente y los picos de volatilidad registrados entre los años 2022 y 2024. La brecha entre la energía regulada y no regulada se debe a que el usuario no regulado obtiene precios distintos y a menudo más eficientes gracias a su capacidad de compra mayorista, lo cual le permite negociar contratos directos, aislarse parcialmente de la volatilidad del mercado y prescindir de varios de los costos operativos y de distribución que encarecen la factura del usuario común.

4.1.5.1.2 Gas natural y Gas Licuado del Petróleo (GLP)

El gas natural y el Gas Licuado de Petróleo (GLP) se ubican en rangos de precios intermedios (\$70 - \$90 COP/MJ) y relativamente cercanos entre sí, lo que los convierte en competidores directos; el gas natural negociado a largo plazo es una opción eficiente y barata para un gran consumidor industrial que esté conectado a la red de gasoductos. Por el contrario, el GLP, aunque es más costoso por su logística, sigue siendo altamente competitivo en zonas donde no hay cobertura de gasoductos, o en aplicaciones que requieren almacenamiento descentralizado e independiente. La problemática del gas natural en el Valle del Cauca se concentra en el agotamiento de las reservas nacionales, lo que forzará una transición hacia la importación de gas natural licuado (GNL).

4.1.5.1.3 Gasolina Corriente, Extra y ACPM (Diesel)

El análisis de los precios de los combustibles líquidos en el Valle del Cauca evidencia una transformación asociada al desmonte progresivo de la intervención estatal y la alineación con los mercados internacionales. Históricamente, el Fondo de Estabilización de Precios de los Combustibles (FEPC) mantuvo precios artificialmente bajos, generando una brecha significativa entre la gasolina corriente y la extra, así como una alta competitividad del ACPM frente a las gasolinas. Sin embargo, el retiro de estos subsidios a la gasolina corriente a partir de 2023 provocó un acelerado incremento que forzó la convergencia de precios con la categoría extra. Esta dinámica de precios finales al público en las estaciones de servicio incorpora, además, los costos logísticos de las mezclas ambientales obligatorias de biocombustibles, como el alcohol carburante (etanol) y el biodiésel, junto con cargas impositivas específicas como el impuesto al carbono y los márgenes de pérdidas por evaporación.

Por otra parte, el mercado presenta barreras críticas al evaluar los costos de abastecimiento para el sector industrial y de generación. El precio minorista regulado del ACPM no constituye una referencia real para los “Grandes Consumidores” (aquellos que demandan

más de 20.000 galones mensuales y tienen infraestructura propia) quienes están excluidos de los beneficios del FEPC y deben negociar sus contratos bajo libertad vigilada directamente vinculados a la paridad de importación.

4.2 Inventario de biomosas residuales

Este capítulo presenta el levantamiento técnico y la cuantificación del inventario de biomosas residuales en el departamento del Valle del Cauca. La base metodológica del análisis se fundamentó en la revisión, conciliación y estandarización de información proveniente de múltiples fuentes y bases de datos oficiales, tales como la UPRA, el DANE, la Superintendencia de Servicios Públicos, Cenicaña y reportes gremiales (Fenavi, Fedegán, entre otros). Para asegurar la trazabilidad y comparabilidad de los registros, los datos productivos fueron estandarizados en unidades de masa en base seca, y se consolidaron series históricas correspondientes al último quinquenio (2020- 2024), lo que permitió analizar la evolución temporal de la disponibilidad de las biomosas. Asimismo, el cálculo paramétrico del volumen residual se sustentó en la aplicación de Factores de Residuo (FR), cuyos indicadores fueron definidos utilizando la mediana estadística de la literatura técnica, garantizando métricas robustas y mitigando la desviación por valores extremos. La metodología seguida por cada sector fue:

- **Sector Agrícola y Forestal:** Se implementó una segmentación enfocada en los cultivos y especies silvícolas de mayor representatividad volumétrica del departamento. Se calcularon los indicadores de oferta de biomasa residual multiplicando las series históricas de producción por los Factores de Residuos (FR) específicos de cada subproducto lignocelulósico, integrando un levantamiento geoespacial para mapear la concentración de biomasa a escala municipal. En el ámbito forestal, los volúmenes maderables se estimaron descontando las cuotas de productos no maderables y cruzando las métricas de movilización de las categorías Eucalipto y Pino (principales cultivos silvícolas del departamento) de los Planes de Manejo Forestal.
- **Sector Pecuario:** La oferta se segmentó por tipo de especie (bovina, porcina, avícola) y por su etapa específica en el ciclo productivo. El análisis cuantificó la biomasa cruzando el censo poblacional de animales con los factores de generación de excretas por cabeza al año, modelando a su vez la topología de la generación a lo largo de los municipios productivos.

- **Sector Urbano:** Se evaluaron flujos residuales continuos divididos en dos subsistemas. Para los residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU), se estimaron indicadores de generación per cápita y se caracterizó la infraestructura espacial mediante el mapeo de estaciones de transferencia, celdas de contingencia y rellenos sanitarios, detallando sus capacidades operativas y los caudales nominales de biogás captado. Para el caso de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), el cálculo numérico de lodos se estandarizó empleando volúmenes de consumo de agua por suscriptor, el factor de retorno del estándar RAS-2000, cargas contaminantes por habitante y la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos determinada por la tecnología de cada planta.
- **Sector Industrial:** El levantamiento empleó una taxonomía fundamentada en la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) para aislar las ramas manufactureras generadoras de residuos orgánicos. El abordaje económico del sector implicó una estandarización mediante el cálculo de percentiles de ingresos operacionales, obtenidos al acoplar la base de datos externa EMIS Next, restringiendo la muestra estrictamente a empresas de tamaño grande. Las variables de generación se infirieron de forma indirecta basándose en capacidades instaladas de producción, cuotas de participación del mercado e informes de sostenibilidad.

4.2.1 Identificación y cuantificación de biomasa residual por municipio

El inventario de biomasa residual del departamento arrojó un promedio de 8,050,074 ($\pm 242,201$) toneladas al año en base seca para el periodo 2020-2024, evidenciando una importante disponibilidad de recursos con potencial de aprovechamiento energético. Para el año 2024, la cifra asciende a 7,974,717 toneladas en base seca. La distribución de esta oferta muestra un aporte importante de los sectores industrial y agrícola, los cuales en conjunto concentran cerca del 80% del total generado. En particular, el sector industrial aporta el 39.56% de la biomasa residual, seguido por el sector agrícola con el 38.30%. Por su parte, los residuos provenientes de las actividades pecuarias representan el 18.19%, mientras que los sectores urbano y forestal contribuyen con el 3.80 % y el 0.14%, respectivamente.

*Tabla 2 Cantidad de biomasa generada en el Valle del Cauca por sector (t BS/año)**

Sector	Cantidad de biomasa residual (t)
Industrial	3,155,242
Agrícola	3,054,446
Pecuario	1,450,894
Urbano	303,037
Forestal	11,098
Total	7,974,717

*t BS/año se refiere a la cantidad expresada en toneladas de biomasa al año en base seca

Dentro de este contexto, el municipio de Palmira se consolida como el principal generador de biomasa residual del departamento, debido principalmente a la alta presencia de actividades asociadas a la agroindustria de la caña de azúcar. En este municipio, aproximadamente el 88% de la biomasa generada corresponde a residuos de origen agrícola e industrial derivados de esta cadena productiva, lo que lo posiciona como un territorio estratégico para el desarrollo de proyectos de valorización energética.

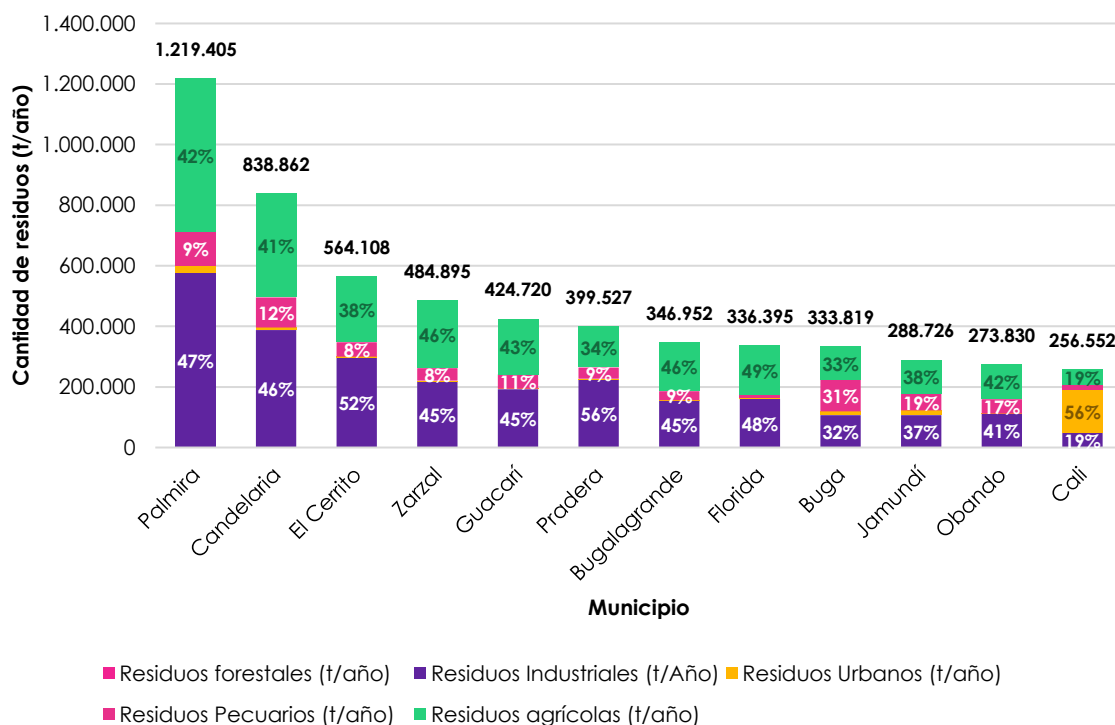


Figura 4 Producción total de Biomásas por municipio en el año 2024

No obstante, la generación de biomasa en el Valle del Cauca no se encuentra concentrada exclusivamente en Palmira ni responde a una única tipología de residuo. Por el contrario, existe una distribución territorial diferenciada según las actividades económicas predominantes de cada municipio. Mientras que en Palmira sobresalen los residuos agrícolas e industriales asociados a la caña de azúcar, en Buga adquieren mayor relevancia los residuos de origen pecuario y, en Cali, los residuos sólidos urbanos (RSOU) constituyen una de las principales fuentes de biomasa.

4.2.1.1 Sector agrícola

El sector agrícola es uno de los principales generadores de biomasa residual en el Valle del Cauca, aportando el 38.3% del inventario total identificado. Aunque el departamento cuenta con una amplia variedad de cultivos, la producción se concentra principalmente en la caña de azúcar, el plátano, la caña panelera, la naranja y la piña, que en conjunto representan cerca del 96% de la producción agrícola departamental.

La caña de azúcar es el cultivo predominante, con una producción cercana a 18 millones de toneladas anuales, lo que genera aproximadamente 2.8 millones de

toneladas de residuos agrícolas de cosecha (RAC) en base seca. Estos residuos, compuestos principalmente por hojas secas, hojas verdes y cogollos, constituyen una de las fuentes más importantes de biomasa residual disponible en el departamento.



Figura 5 Biomosas residuales del sector agrícola

En la Figura 5 se representan las biomosas obtenidas por cada cultivo agrícola. En términos de disponibilidad, los residuos agrícolas de cosecha (RAC) se concentran principalmente en los municipios ubicados a lo largo del corredor del río Cauca, destacándose Palmira y Candelaria, que en conjunto generan cerca de 850 mil toneladas anuales en base seca. En el caso del plátano, la producción se localiza principalmente en Sevilla y Trujillo, mientras que los residuos de caña panelera se concentran entre Candelaria y Obando.

La mayor parte de los residuos agrícolas generados en el departamento permanecen en el lugar de producción después de la cosecha. En los cultivos de caña de azúcar y caña panelera, la totalidad de los residuos se deja en campo donde actúan como cobertura orgánica donde contribuye a la conservación de la humedad, aporte de material orgánico y nutrientes al suelo; por otro lado, en el cultivo de plátano más del 90 % de la biomasa residual, compuesta principalmente por pseudotallo y hojas, permanece en las fincas productoras. Entre 2020 y 2024, la producción de plátano registró un crecimiento del 40 %, generando en promedio 137 mil toneladas anuales de

biomasa residual en base seca. Sevilla concentra la mayor disponibilidad de estos residuos, con aproximadamente 36 mil toneladas al año. Debido a su elevado contenido de humedad (75–90 %), esta biomasa presenta mayores oportunidades para aplicaciones como la producción de biofertilizantes y compost. En Colombia, su uso se extiende además al empaque tradicional de alimentos como el tamal, donde actúa como un embalaje natural que aporta un aroma y sabor únicos durante la cocción.

Por su parte, los residuos asociados a la naranja y la piña presentan una dinámica diferente, ya que una proporción importante se genera fuera del campo. En particular, el 73 % de los residuos de naranja se produce directamente en plantas de procesamiento agroindustrial, lo que favorece su concentración y potencial aprovechamiento debido a las menores necesidades de recolección y transporte.

4.2.1.2 Sector pecuario

El sector pecuario aporta el 18.2% del inventario total de biomasa residual en el Valle del Cauca, compuesto principalmente por estiércol bovino, porcinaza, pollinaza y gallinaza. Por lo general, estos residuos presentan un alto contenido de materia orgánica biodegradable y niveles de humedad variables: entre el 12% y 18% para los residuos avícolas, cerca del 70% para el estiércol bovino y más del 85% para el porcino. Esta alta biodegradabilidad los hace idóneos para rutas de transformación bioquímica como la digestión anaerobia. La principal excepción es la pollinaza, cuya composición—influenciada por el sistema de crianza y el material de cama—favorece más bien su aprovechamiento mediante tecnologías termoquímicas.

En promedio para el periodo 2024, el residuo de mayor volumen es el estiércol bovino, con una generación estimada de 532,700 toneladas anuales en base seca, concentrada principalmente en el municipio de Trujillo. Le siguen los residuos del subsector avícola, donde la pollinaza proveniente de aves de engorde alcanza 497,400 toneladas anuales y se concentra principalmente en Candelaria, mientras que la gallinaza de aves de postura genera 299,100 toneladas anuales y tiene una importante presencia en la zona de San Pedro y Buga. Por su parte, el subsector porcícola produjo en promedio 119,700 toneladas anuales de porcinaza en base seca durante los últimos tres años, localizadas principalmente en Palmira y Candelaria debido a la cercanía de estas zonas con las principales fuentes de alimento para los animales.

Específicamente, las biomásas pecuarias presentan características diferenciadas según su origen. El estiércol bovino está compuesto por heces, orina y restos vegetales, mientras que la porcínaza corresponde a una mezcla de excretas y aguas de lavado con alta carga orgánica. En el subsector avícola, la pollinaza incorpora materiales de cama, plumas y restos de alimento, mientras que la gallinaza está conformada principalmente por excretas frescas, lo que la convierte en un material más homogéneo y concentrado.

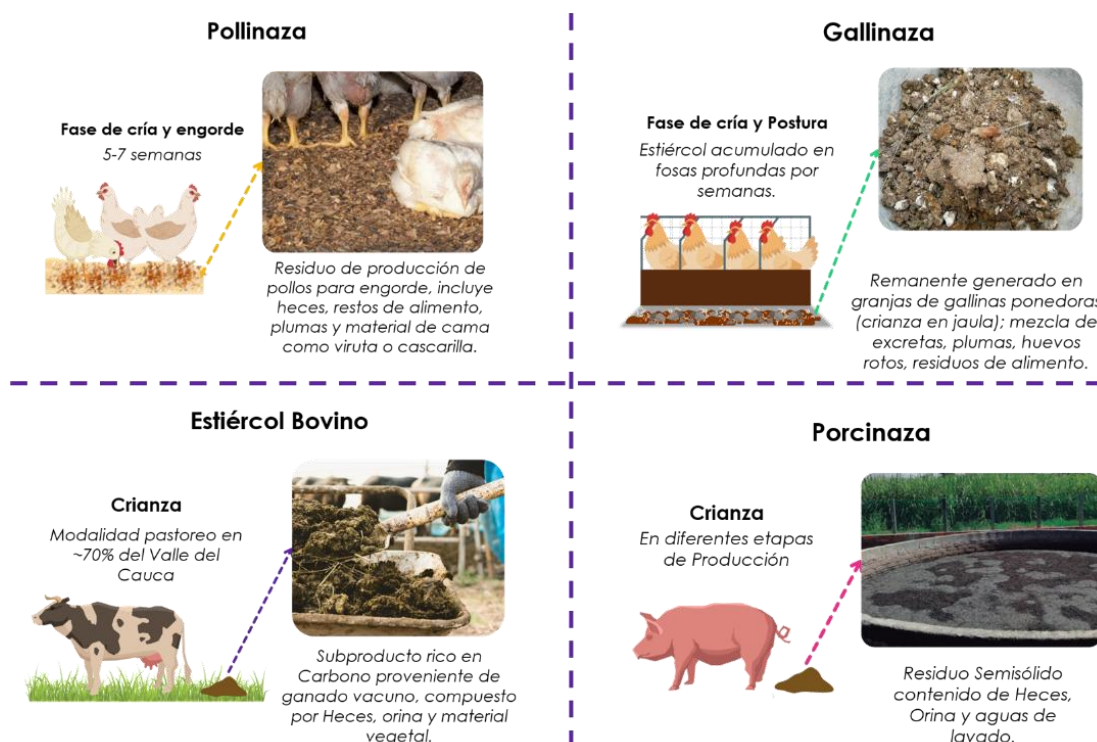


Figura 6 Biomásas residuales pecuarias

4.2.1.3 Sector forestal

El sector forestal aporta aproximadamente 11,000 toneladas anuales de biomasa residual en base seca, equivalentes al 0.14% del inventario departamental. Estos residuos corresponden principalmente a corteza, ramas y hojas generadas durante las actividades de aprovechamiento forestal, de las cuales cerca del 60% permanece en campo después de la cosecha.



Figura 7 Biomosas residuales del sector forestal

La actividad forestal comercial en el Valle del Cauca se basa principalmente en plantaciones de pino y eucalipto destinadas a la industria de pulpa, papel y otros productos maderables. Esta dinámica está liderada mayoritariamente por Smurfit Westrock, compañía que opera dos molinos de papel en Colombia, uno de ellos ubicado en el municipio de Yumbo. La actividad presenta una alta concentración territorial: los municipios de Vijes y La Cumbre concentran el 57% de la producción de pino en el departamento, mientras que Restrepo, Trujillo, Dagua, Ginebra y Sevilla agrupan el 70% de la correspondiente a eucalipto.

Aunque la producción maderera ha mostrado una ligera tendencia a la baja desde 2022, el volumen extraído continúa superando las 200 mil toneladas anuales. El eucalipto lidera la actividad en el departamento con aproximadamente el 70% de este volumen; sin embargo, el pino genera una mayor cantidad de biomasa residual debido a sus dinámicas de cosecha. Asimismo, la composición y la logística de estos residuos varían según la especie: en el pino predominan las ramas, que permanecen principalmente en campo, mientras que en el eucalipto prevalece la corteza, la cual suele concentrarse en las plantas de procesamiento al ser transportada junto con los trozas de madera.

4.2.1.4 Sector industrial

Para el análisis de las biomosas industriales con potencial de aprovechamiento energético, se implementó una taxonomía basada en la Clasificación Industrial

Internacional Uniforme (CIU) y datos de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) del DANE. Este abordaje permitió descartar sectores de naturaleza inorgánica (como la metalurgia, la maquinaria o la confección textil) y priorizar actividades con flujos orgánicos viables para rutas de conversión termoquímica o de digestión anaerobia. Adicionalmente, el dimensionamiento del sector se estandarizó aplicando un filtro económico mediante la plataforma EMIS Next; calculando los percentiles de ingresos operacionales, se restringió la muestra estrictamente a empresas de tamaño 'Grande', garantizando así la cuantificación de biomásas asociadas a procesos de alta escala y continuidad. Como resultado, se priorizaron sectores estratégicos como la producción de azúcar y endulzantes y la elaboración de cerveza.

La biomasa industrial predominante es el bagazo de caña de azúcar, con una generación cercana a 2.76 millones de toneladas anuales en base seca. Este material, clasificado como residuo industrial al generarse directamente en la etapa de extracción del jugo en los molinos, es una fibra rica en celulosa, hemicelulosa y lignina. Al conservar una humedad entre el 45% y el 50%, posee una densidad energética que lo consolida como el combustible principal para los sistemas de cogeneración de los ingenios. En las etapas posteriores de clarificación y filtración del jugo en la fábrica de azúcar se genera la cachaza (189,979 t bs/año), un subproducto semisólido rico en materia orgánica y minerales; mientras que en las unidades de destilería anexas destinadas a la producción de bioetanol se produce la vinaza diluida (154,083 t bs/año), un efluente líquido caracterizado por su alta carga química y materia orgánica disuelta. Adicionalmente, dentro de la cadena de endulzantes, se suman 43,059 t bs/año de bagazo proveniente de la molienda industrial de la caña panelera.

Por otro lado, la generación de residuos en la industria cervecera presenta una marcada concentración geográfica en el municipio de Yumbo, sede de la Cervecería del Valle. La cuantificación volumétrica en esta industria se infirió indirectamente partiendo de su capacidad instalada en hectolitros (HL) y su participación en la producción nacional reportada por el DANE. Debido a que esta planta opera recibiendo malta previamente preparada, no se generan residuos sólidos convencionales de casullo de cebada; por consiguiente, el potencial biomásico se concentra exclusivamente en los lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE) (3,418 t bs/año), los cuales fueron proyectados utilizando un factor de generación técnico de 2.0 kg por cada tonelada de cebada procesada.



Figura 8 biomásas residuales del sector industrial

4.2.1.5 Sector urbano

El sector urbano del Valle del Cauca aporta anualmente 306,300 toneladas de biomasa residual en base seca, lo que representa aproximadamente el 3.8% del inventario total del departamento. Este flujo está conformado principalmente por dos componentes: residuos sólidos urbanos orgánicos (RSUO), con 231,500 t/año, y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con 74,800 t/año. Debido a su alta densidad poblacional y dinamismo económico, Santiago de Cali se consolida como el principal centro generador, concentrando el 45.8% de los RSUO y el 50.8% de los lodos a nivel departamental.

La generación de residuos sólidos urbanos en el Valle del Cauca alcanza una tasa promedio de 0.87 kg por habitante por día, superior al promedio nacional (rango que se ubica entre 0.76-0.82 kg/hab · día en Colombia). Este comportamiento puede estar asociado al alto grado de urbanización del departamento, donde cerca del 87 % de la población reside en áreas urbanas. Asimismo, el Valle del Cauca presenta una de las coberturas más altas del país en los servicios de recolección y transporte de residuos, superando el 90 %, lo que favorece una mayor gestión de los residuos generados. Adicionalmente, se destaca el caso de Yumbo, que registra una generación de 1.64 kg/hab · día, influenciada por la intensa actividad industrial y logística presente en el municipio. En Colombia, los residuos están compuestos principalmente por materia orgánica (52%-66%), donde predominan los desechos de comida. La fracción restante la lideran materiales inorgánicos como el plástico, seguido en menor medida por papel, cartón y textiles.

Por otra parte, la producción de lodos de PTAR en el departamento también está liderada por Cali, municipio que aporta 38,010 toneladas anuales procesadas principalmente en la planta de Cañaveralejo. El volumen restante se distribuye en 31

estaciones de tratamiento primarias y secundarias distribuidas en la región, entre las que destacan las instalaciones de Tuluá, Yumbo, Cartago, Candelaria y Caicedonia.

Bajo los estándares del RAS-2000, se calcula que el 85% del agua consumida retorna a la red de alcantarillado, arrastrando una carga contaminante estimada en 50 gramos de sólidos suspendidos por habitante al día. Las plantas regionales capturan esta biomasa con una eficiencia de remoción mediana del 82.3%.

Estos lodos —que pueden ser clasificados como primarios, secundarios o mixtos— se caracterizan por un elevado contenido de humedad (entre el 92% y el 94%), así como por una alta carga de materia orgánica biodegradable y una concentración importante de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Debido a esta naturaleza extremadamente húmeda y a su riqueza orgánica, la ruta más viable para su gestión es la digestión anaerobia. Esta alternativa tecnológica cumple un doble propósito: permite la valorización energética mediante la producción de biogás y, al mismo tiempo, reduce significativamente el volumen final del residuo para su disposición.



Figura 9 Biomásas residuales del sector urbano

4.2.2. Estado del arte del uso actual de la biomasa residual

Este capítulo expone el estado del arte y el potencial de aprovechamiento de las biomásas residuales que son base de este inventario, enfocado en las rutas de valorización energética y no energética. Para ello, se realizó una revisión de literatura técnica complementada con informes institucionales en la que se identificaron las prácticas predominantes de manejo que se consolidan en el Anexo B. El proceso de revisión comprendió el análisis de 197 artículos de base y referencias especializadas (97 para la ruta de valorización energética y 100 publicaciones científicas destinadas al estudio de la ruta no energética).

La ruta energética se enfoca en la transformación de las biomásas residuales (provenientes de los sectores agrícola, forestal, pecuario, industrial y urbano) en diversos biocombustibles y vectores de energía a través de tecnologías biológicas y termoquímicas. En esta vía, los residuos son sometidos a procesos como la digestión anaerobia y diversas fermentaciones para producir biogás, bioetanol, biobutanol y biohitano. También destaca la generación de hidrógeno verde mediante fermentación oscura y fotofermentación, así como la producción de biodiésel a través de la transesterificación de grasas y semillas. Por otro lado, mediante procesos térmicos como la combustión directa, la pirólisis y la gasificación, la biomasa se convierte en electricidad, syngas, bioaceite (bio-oil), o se densifica para la elaboración de combustibles sólidos como pellets y briquetas.

Por su parte, la ruta no energética está orientada a la recuperación de recursos y la creación de productos de alto valor agregado bajo un modelo de economía circular. En este enfoque, los subproductos se utilizan en aplicaciones alimentarias (como nutrición humana, suplementos dietarios y alimentación animal) y en la extracción de biocompuestos como aceites esenciales, pectinas, antioxidantes y polímeros naturales. Igualmente, la biomasa se transforma en biomateriales y bioplásticos para la elaboración de empaques biodegradables, papel, tableros de construcción, adhesivos y fibras textiles. Finalmente, esta ruta incluye la creación de bioadsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas y la generación de abonos, biochar, compost y biofertilizantes que permiten restaurar la salud y calidad de los suelos agrícola. El registro completo y detallado de las fuentes bibliográficas analizadas se encuentra sistematizado en el Anexo B. Cada una de las referencias documentales ha sido estructurada bajo la siguiente matriz de categorización:

- **Sector:** Clasificación macro del origen del recurso
- **Cultivo / Especie / Subsector:** Segmentación específica que define la fuente biológica o productiva del sustrato.
- **Residuo:** Tipo o fracción específica de biomasa residual analizada.
- **Aprovechamiento:** categorización dentro de la ruta de valorización energética o no energética).
- **Tecnología / Descripción:** Detalle del proceso técnico, parámetros operativos o configuraciones tecnológicas documentadas.
- **Práctica:** Aplicación, uso final o validación del sistema en el contexto evaluado.
- **Referencia:** Fuente bibliográfica o institucional indexada correspondiente.

Todas estas alternativas se consolidaron para distintas rutas de aprovechamiento representadas mediante íconos cuyo significado se muestra a continuación:

Tabla 4-3 Simbología de las rutas de aprovechamiento energético y no energético.
Elaboración propia

Aprovechamiento	Símbolo	Aprovechamiento	Símbolo
Biogás		Biocompuestos	
Hidrógeno verde		Fertilizantes	
Combustión		Alimentación animal	
Syngas		Compostaje	
Bioetanol		Bioadsorbentes	
Bio-oil		Aplicaciones alimentarias	
Biochar		Biochar	
Biodiesel		Biomateriales	
Biobutanol		Papel	
		Bioplástico	

Tabla 4-4 Rutas de aprovechamiento energético de las diferentes biomásas. Elaboración propia con base en fuentes de Anexo B

Sector	Cultivo/Especie/Subsector	Residuo	Aprovechamiento Energético						
Agrícola	Plátano	Cáscara							
		Pseudo-tallo							
		Raquis							
		Hojas							
	Caña	Bagazo							
		RAC							
	Naranja	Cáscara							
		Tejido Interno							
		Semillas							
	Piña	Corona							
Cáscara									
Corazón									
Forestal	Pino/Eucalipto	Ramas							
		Corteza							
		Hojas							
Pecuario	Avícola	Gallinaza							
		Pollinaza							
	Bovino	Estiércol							
		Porcícola	Porcinaza						
Industrial	Cárnica	Plumas y copos							
		Grasas							
		Huesos							
		Sangre							
	Azúcar y Endulzantes	Vinaza							
		Cachaza							
	Lácteos y derivados	Lactosuero							
	Cerveza	Lodos PTE							
	Urbano	Residuos Sólidos	RSU						
			RSOU						
PTAR		Lodos PTAR							

Tabla 4-5 Rutas de aprovechamiento NO energético de las diferentes biomásas. Elaboración propia con base en fuentes de Anexo B

Sector	Cultivo/Especie/Subsector	Residuo	Aprovechamiento No Energético							
Agrícola	Plátano	Cáscara								
		Pseudo-tallo								
		Raquis								
		Hojas								
	Caña	Bagazo								
		RAC								
	Naranja	Cáscara								
		Tejido Interno								
		Semillas								
	Piña	Corona								
Cáscara										
Corazón										
Forestal	Pino/Eucalipto	Ramas								
		Corteza								
		Hojas								
Pecuario	Avícola	Gallinaza								
		Pollinaza								
	Bovino	Estiércol								
		Porcicola	Porcinaza							
Industrial	Cárnica	Plumas y copos								
		Grasas								
		Huesos								
		Sangre								
	Azúcar y Endulzantes	Vinaza								
		Cachaza								
	Lácteos y derivados	Lactosuero								
	Cerveza	Lodos PTE								
Urbano	Residuos Sólidos	RSU								
		RSOU								
	PTAR	Lodos PTAR								

4.2.2 Cadenas productivas, de abastecimiento y actores clave

El estudio analiza el flujo de una biomasa residual representativa por cada sector productivo (agrícola, pecuario, forestal, industrial y urbano) desde su origen hasta su destino final, permitiendo comprender sus dinámicas operativas y logísticas. A partir de revisiones documentales, se unificó la representación de estos sistemas mediante diagramas de flujo que estandarizan las etapas operacionales, mostrando rutas logísticas y centros de acopio.

Aunque este enfoque describe la estructura general de las cadenas de suministro, se incorporan observaciones específicas sobre dinámicas particulares a nivel departamental.

Asimismo, el análisis segmentó los procesos para clasificar de forma uniforme y transversal a los actores clave involucrados en la generación, manejo, transporte, valorización y comercialización de los residuos. De este modo, los grupos de interés (que incluyen asociaciones, gremios, empresas y entidades públicas) se clasificaron en niveles transversales aplicables a todas las cadenas: proveedores, capital humano, industrias y acopio, investigación, y entes reguladores.

4.2.2.1 Sector agrícola – Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC)

El proceso de obtención de los residuos comienza en el eslabón agrícola de la caña de azúcar con la preparación mecánica del suelo, la siembra y la fertilización del cultivo. La cosecha se realiza generalmente cuando la planta alcanza entre los 12.5 y 14 meses de edad —según las condiciones climáticas, la variedad cultivada y el manejo agronómico— y se organiza en función del programa anual de molienda del ingenio. La labor de cosecha se ejecuta mediante dos modalidades: sistemas semi-mecanizados, que combinan el corte manual del tallo a ras de suelo y la recolección con el uso de máquinas alzadoras que cargan de la caña en vagones de transporte; o sistemas mecanizados, los cuales emplean cosechadoras especializadas que ejecutan de forma simultánea el corte, el troceado, la separación de la hoja y la descarga directa del tallo hacia los vagones. Tras la cosecha, los residuos agrícolas de cosecha (RAC), constituidos por hojas verdes, secas y cogollos, permanecen sobre el suelo cumpliendo funciones agronómicas como la conservación de la humedad, la protección como cobertura y el aporte de materia orgánica; para el aprovechamiento de estos residuos, se deben recolectar y transportar al punto de beneficio. Esta recolección puede gestionarse mediante cuatro rutas logísticas: la recolección manual con transporte a puntos de acopio, el enfardado mecanizado para optimizar la densidad del material, la trituration directa en campo con maquinaria especializada, o la cosecha integral, donde el residuo se transporta junto a la caña y se separa en la planta mediante sistemas de ventilación. Finalmente, la biomasa es transportada a la fábrica o centros de acopio, donde se acondiciona mediante triturado y tamizado para homogenizar su tamaño y garantizar su conservación y disponibilidad energética.

Los grupos de interés involucrados se clasifican de forma uniforme en niveles específicos. El segmento de productores y proveedores, integrado por ingenios y cultivadores

independientes, empresas de servicios de mecanización (para la adecuación del terreno, siembra, fertilización y riego) y proveedores de agroinsumos, asume la gestión de las unidades productivas y el suministro de la maquinaria especializada para el campo. Por su parte, el capital humano operativo, compuesto por personal del ingenio y operadores técnicos externos, aporta la mano de obra indispensable para la ejecución y supervisión de las labores agrícolas y de manejo del residuo. El eslabón de industrias y acopio, liderado por los ingenios, centraliza la transformación industrial, coordina la logística de abastecimiento y asegura la conservación de la biomasa. En la Figura 10 se presenta el esquema general de generación y manejo de los residuos agrícolas de cosecha. Este incluye tanto las etapas de la cadena productiva de la caña de azúcar como las actividades asociadas a la cadena de abastecimiento del RAC.



Figura 10 Esquema completo de la generación y manejo de RAC. Elaboración propia

A nivel internacional se ha identificado el aprovechamiento de los RAC para diversos usos, siendo Brasil un referente global en el establecimiento de diferentes rutas logísticas para su recolección, transporte y pretratamiento industrial. En este ámbito, en 2020, el proyecto SUCRE (Sugarcane Renewable Electricity) presentó resultados en 12 ingenios en Brasil con capacidades de recolección entre el 50% y el 80% del RAC posterior a la cosecha. Dicha iniciativa estableció los mapas de remoción estratégica del RAC, una herramienta que permite, en función de factores como el tipo de suelo, la radiación solar, la temperatura

media, la precipitación, la pendiente del terreno y la época de la zafra, determinar las zonas óptimas de retiro y las cantidades adecuadas, balanceando así el efecto agronómico de la conservación de residuos frente al beneficio de su aprovechamiento energético.

Dentro de este proyecto se compararon diversas rutas operativas y se exploró ampliamente el enfardado del residuo, modalidad bajo la cual se logra transportar entre 64 y 68 fardos por cada tren de transporte de residuos (equivalentes a 32 toneladas de RAC) a distancias de entre 20 y 25 km desde el punto de recolección en el campo hasta el ingenio. Asimismo, se desarrollaron diferentes configuraciones en fábrica para la recepción, limpieza, picado y transporte del biocombustible hacia las calderas para su transformación energética. Esquemas similares de aprovechamiento se han identificado en otros países de la región, como en Argentina (ingenio Ledesma) y Nicaragua (ingenio Casur) para la cogeneración de energía, y en Perú (ingenio Laredo), donde se utiliza como insumo base para la producción de compostaje.

En Colombia, el sector agroindustrial de la caña de azúcar cosechó en 2024 el 83% de la caña bajo la modalidad de cosecha mecanizada. Este método deja disponibles cerca de 30.4 toneladas de Residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar (RAC) por hectárea, los cuales presentan un 45% de humedad inmediatamente después del corte y, seis días más tarde, alcanzan valores de entre el 10% y el 12% en función de las condiciones ambientales. Actualmente, en el Valle del Cauca, la gran mayoría de estos residuos permanecen en el campo, donde se aprovechan los beneficios agronómicos que ofrecen al suelo.

Hoy en día, solo un ingenio en Colombia ha incorporado tecnología para recolectar, enfardar y transportar estos residuos hacia sus instalaciones, las cuales han sido acondicionadas para limpiarlos y picarlos. Posteriormente, el material se introduce en la caldera como combustible alternativo; esto no solo permite incrementar la cogeneración de energía, sino también contar con un inventario de combustible almacenado que brinda robustez operativa y aporta a un proceso con mayor circularidad a su cadena productiva. Cabe destacar que, entre 2021 y 2024, este ingenio logró duplicar la cantidad de RAC aprovechada bajo esta modalidad.

4.2.2.2 Sector pecuario – Porcinaza

La porcinaza hace referencia al conjunto de excretas generadas durante la producción porcina, conformadas generalmente por una mezcla de heces, orina, agua de lavado y restos de alimento. Este residuo se produce de manera continua durante cada una de las fases productivas del sector porcícola, las cuales abarcan la reproducción, la iniciación (precebo), el levante y el engorde de los animales. Para la recolección de este residuo, se implementan diversos mecanismos en función del sistema de alojamiento: sistemas de fosas inundadas bajo pisos de rejilla, recolección en seco mediante el retiro manual sobre pisos sólidos, o sistemas tecnificados equipados con canales de arrastre hidráulico. Tras su captación, la porcinaza líquida es evacuada a través de redes de conducción hacia sistemas de almacenamiento impermeabilizados, tales como lagunas, tanques o biodigestores, donde se controlan variables operativas y es posible realizar una separación de fases sólido-líquido. Finalmente, el sustrato se destina a procesos de valorización; por un lado, se somete a biodigestión anaerobia para el aprovechamiento energético mediante la generación de biogás, y por otro, se orienta al aprovechamiento agronómico para la producción de fertilizantes (biol, digestato o compost), lo cual exige la ejecución de planes técnicos de biofertilización para prevenir la lixiviación de nutrientes hacia fuentes hídricas.

Los grupos de interés involucrados se clasifican en: el segmento de productores y proveedores, integrado por empresas porcícolas, proveedores de genética e insumos veterinarios, laboratorios y fabricantes de alimentos balanceados, asume la provisión tecnológica y la administración de las instalaciones. Por su parte, el capital humano operativo, compuesto por personal de granja y operadores técnicos especializados (como veterinarios y zootecnistas), aporta la mano de obra indispensable para las labores diarias, la supervisión de la bioseguridad y el diseño de los sistemas de recolección y tratamiento del residuo. El eslabón de las unidades productivas, liderado por las empresas porcícolas, centraliza la producción, coordina la logística de abastecimiento y define las estrategias de manejo de la porcinaza. Adicionalmente, las entidades ambientales y sanitarias ejercen un rol crítico en la regulación normativa de vertimientos y control de emisiones, mientras que los gremios brindan un acompañamiento técnico continuo a lo largo del sistema. En la Figura 11 se presenta el esquema general de generación y manejo de la porcinaza, el cual integra orgánicamente las etapas de la cadena productiva del cerdo con las actividades logísticas de la cadena de abastecimiento de las excretas.

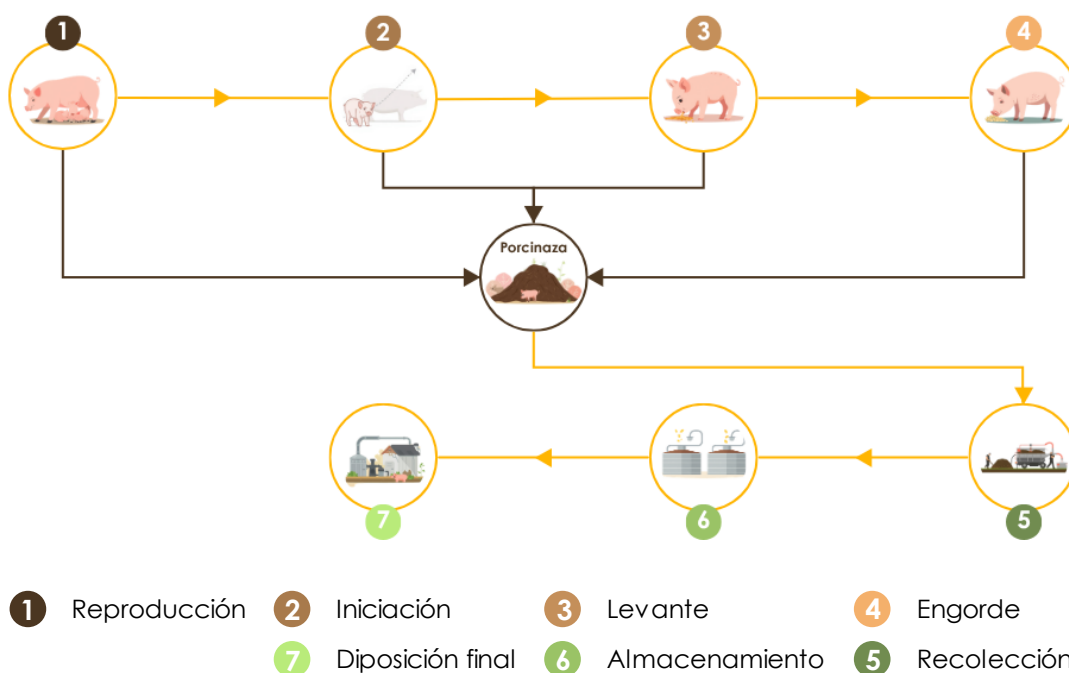


Figura 11 Esquema completo de la generación y manejo de porcinoza. Elaboración propia

Actualmente, en Colombia la práctica de aprovechamiento de la porcinoza mediante digestión anaerobia para obtención de biogás está en crecimiento. Específicamente, organizaciones del gremio como Porkcolombia han invertido esfuerzos en fortalecer el conocimiento entorno al biogás y sus formas de transformación a energía, a través de la construcción de guías de implementación de biodigestores en granjas porcícolas, acompañado de una red de proveedores y jornadas de capacitación. Para este punto, Porkcolombia ha reportado la implementación de 49 nuevos sistemas de biodigestores en granjas porcícolas a nivel nacional para el año 2025, superando su meta de 35 sistemas anuales.

4.2.2.3 Sector forestal – Madera residual de Pino

Los residuos forestales hacen referencia al conjunto de restos orgánicos generados durante las labores silviculturales y de aprovechamiento, conformados generalmente por hojas, ramas finas y corteza. Este residuo se produce durante las etapas de la cadena productiva, las cuales abarcan desde las labores de mantenimiento (como podas y raleos) hasta la fase central de aprovechamiento forestal, que incluye la tala, el desrame y el troceado. Para la recolección de este residuo, se implementan diversos mecanismos: una parte del material se deja en campo para que aporte a la fertilidad del suelo, mientras que otra fracción se agrupa en pilas o cordones para su retiro, ya sea de forma manual o mediante

sistemas mecanizados equipados con maquinaria forestal especializada como skidders, autocargadores o tractores forestales. Tras su recolección, y debido a su alto volumen y baja densidad aparente, la biomasa suele ser acondicionada in situ mediante astilladoras y trituradoras móviles para obtener astillas (chips); posteriormente, es evacuada mediante volquetas o camiones hacia instalaciones de aprovechamiento y centros de acopio, donde se almacena en pilas y puede someterse a procesos de secado natural o artificial. Finalmente, el sustrato se destina a procesos de valorización, buscando optimizar la eficiencia de su logística frente a grandes retos como la alta dispersión espacial y las largas distancias de transporte.

Los grupos de interés involucrados se clasifican en: el segmento de productores y proveedores, integrado por empresas forestales, propietarios de terrenos, empresas de mecanización y proveedores de material vegetal, insumos y maquinaria, asume la provisión de tierras, tecnología y la administración de las plantaciones. Por su parte, el capital humano operativo, compuesto por cuadrillas de trabajadores de campo y operadores técnicos especializados, aporta la mano de obra indispensable para las operaciones forestales diarias, la supervisión de los procesos agronómicos y la ejecución de la recolección, transporte y manejo del residuo. El eslabón de industrias y acopio, liderado por las empresas forestales y, centraliza la transformación industrial, coordina la planificación de la cosecha y define las estrategias logísticas para la recolección y transporte de la biomasa. Su cadena de abastecimiento presenta un bajo nivel de consolidación debido a la alta dispersión y baja densidad energética de los materiales, lo que eleva significativamente los costos de recolección y extracción por las dificultades topográficas.

En la actualidad en el Valle del Cauca, la gestión de los residuos forestales se centra en el aprovechamiento de la corteza. Empresas del sector, como Smurfit Westrock, transportan este material junto con el fuste durante las operaciones de aprovechamiento forestal o, en otros casos, retiran la corteza en campo y la transportan por separado. Por su parte, las ramas y hojas generalmente se dejan en campo después de la cosecha, cumpliendo una acción protectora. En 2022, la compañía realizó una inversión de USD \$100 millones, para

la construcción de una caldera de biomasa en Yumbo, cuya entrada en operación se prevé para el 2026, mediante la cual se aprovecharán diferentes tipos de residuos orgánicos (tales como la corteza de pino y eucalipto provenientes de sus plantaciones forestales comerciales, los residuos de su planta de tratamiento de madera, las cenizas y lodos

generados en su proceso de fabricación de papel, entre otros) para generar energía más limpia.

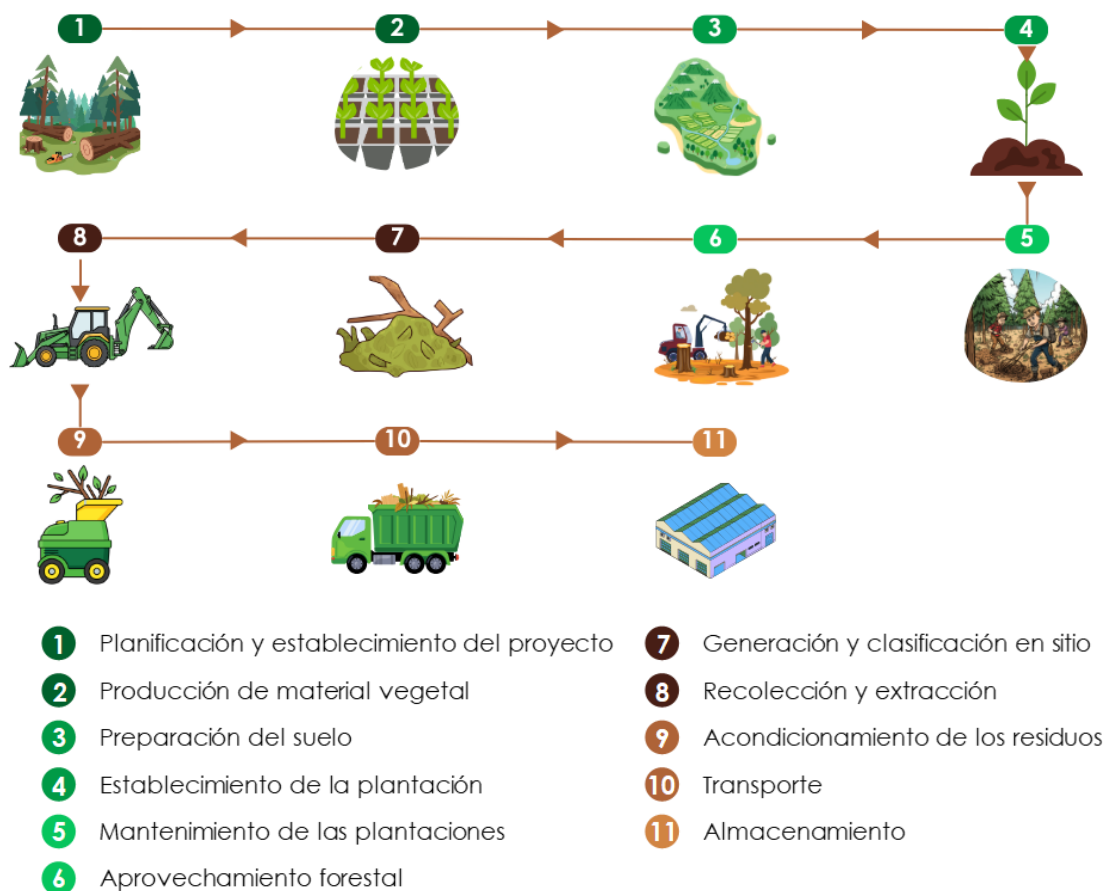
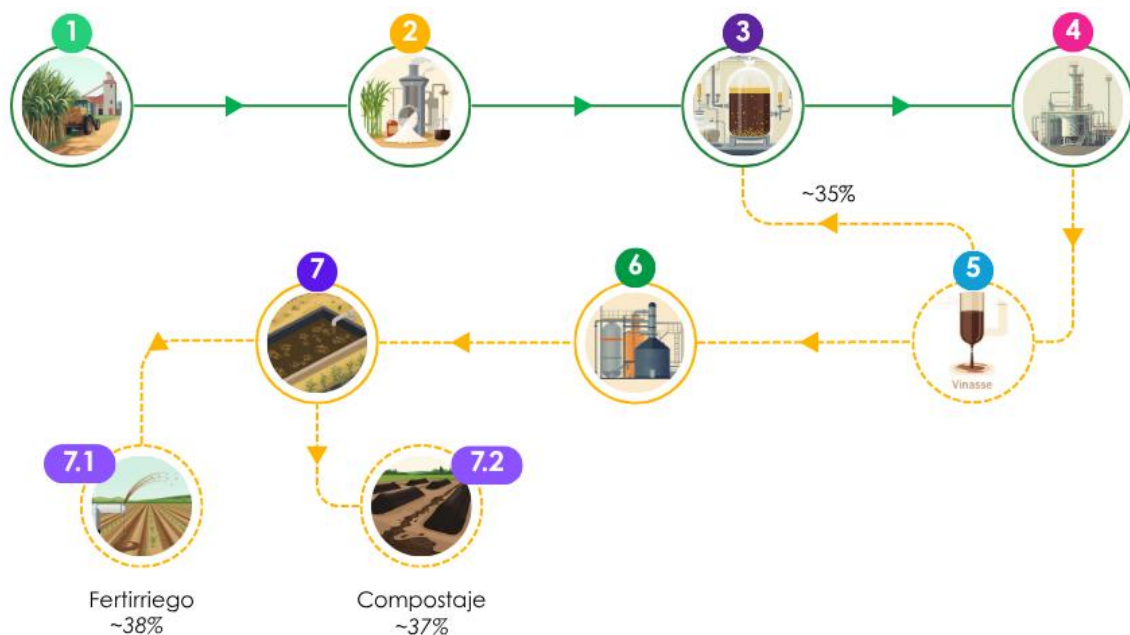


Figura 12 Esquema completo de la generación y manejo de residuos forestales.
Elaboración propia

4.2.2.4 Sector industrial – Vinaza

La vinaza diluida hace referencia al subproducto generado durante la obtención de bioetanol en la agroindustria de la caña de azúcar. Este residuo se produce de manera inherente durante la etapa de destilación del vino, la cual es posterior a la fase de fermentación alcohólica de las mieles provenientes de la planta de azúcar. Para el manejo inicial de este residuo, se implementan mecanismos de reducción volumétrica e integración másica directamente en la fábrica: alrededor del 50% al 60% de la vinaza es recirculada hacia la etapa de fermentación para el aprovechamiento de nutrientes, mientras que la fracción restante se somete a sistemas de evaporación térmica que la concentran. Tras su generación y reducción, la vinaza es evacuada hacia sistemas de almacenamiento, como lagunas recubiertas con geomembranas, donde experimenta

un enfriamiento natural previo a su uso. Finalmente, el sustrato se destina a procesos de valorización; por un lado, se orienta al aprovechamiento agronómico mediante fertirriego, requiriendo una dilución con agua para su aplicación en campo a través de sistemas por gravedad (con flautas o aguillones) o riegos presurizados. Por otro lado, se destina a la estabilización mediante compostaje, mezclándose con otros subproductos azucareros, como cachaza y ceniza, bajo un control riguroso de humedad y balances de masa. Los grupos de interés involucrados se clasifican en: el segmento de proveedores, integrado por distribuidores de insumos químicos, biológicos y fabricantes de tecnología o maquinaria, asume el abastecimiento tecnológico y el mantenimiento de la infraestructura industrial. Por su parte, el capital humano operativo, compuesto por técnicos de proceso azucarero, laboratoristas y operadores logísticos, aporta la mano de obra indispensable para la transformación industrial, la supervisión de calidad y el transporte físico del residuo a los predios. El eslabón de industrias y acopio, liderado por los ingenios azucareros duales (plantas de azúcar con destilería integrada), centraliza la producción, coordina las plantas de compostaje y define las estrategias de manejo de la vinaza. Adicionalmente, las entidades ambientales y gubernamentales (como corporaciones autónomas y ministerios) ejercen un rol en la regulación normativa, emisión de permisos y control de parámetros.



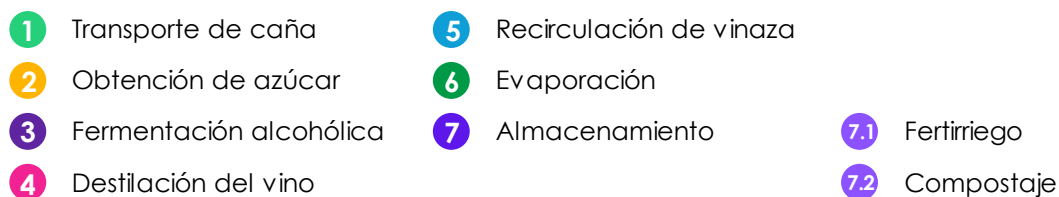


Figura 13 Esquema completo de la generación y manejo de Vinaza. Elaboración propia.

En el sector agroindustrial de la caña de azúcar en Colombia, se le otorgan diferentes usos a la vinaza como parte de las estrategias de economía circular. Por un lado, se aplica directamente en campo como biofertilizante debido a su alto contenido de materia orgánica; esta vinaza suele enriquecerse con nitrógeno, boro y zinc, lo que permite regular y optimizar el balance nutricional de los suelos cultivados, reduciendo de manera significativa la dependencia y aplicación de fertilizantes de síntesis química. Por otro lado, otro uso destacado consiste en emplearla como el componente de hidratación en las plantas de compostaje; esta alternativa evita el uso de agua limpia en el proceso y, al mismo tiempo, aporta nutrientes clave que incrementan la calidad del abono orgánico que posteriormente será reincorporado al cultivo.

La valorización energética de la vinaza mediante digestión anaeróbica (DA) se ha consolidado como un proceso industrial en los principales países productores de bioetanol. En Brasil, la conversión de este efluente en biogás; Este vector energético es purificado e inyectado a la red de gas o utilizado como sustituto del diésel en las flotas logísticas del sector sucroenergético brasileño (Rogeri, 2024). Por su parte, en India, la implementación de sistemas de codigestión anaeróbica y reactores avanzados responde a políticas regulatorias estrictas orientadas al "vertido cero" (ZLD, por sus siglas en inglés), permitiendo el autoabastecimiento térmico de las destilerías al desplazar combustibles fósiles en las calderas de cogeneración en ese país.

4.2.2.5 Sector urbano – RSOU

Los residuos sólidos urbanos, específicamente en su fracción orgánica (RSOU), comprenden los desechos biodegradables generados continuamente por actividades residenciales, comerciales e institucionales, tales como restos de alimentos y podas. Debido a las bajas tasas de separación en la fuente, este material suele captarse de forma mixta mediante rutas programadas de vehículos compactadores que los evacúan, de manera directa o a través de estaciones de transferencia, hacia rellenos sanitarios impermeabilizados. En estos sitios, los desechos son dispuestos en celdas activas, compactados mecánicamente y

cubiertos diariamente con material inerte. Bajo estas condiciones de confinamiento, la descomposición anaerobia de la materia orgánica genera lixiviados, los cuales son captados por redes de drenaje para su tratamiento especializado, y biogás, el cual se extrae mediante pozos verticales para su quema en antorchas o, idealmente, para su valorización bioenergética en la generación de electricidad, calor o biometano.

La viabilidad operativa y la sostenibilidad de este sistema dependen de una red articulada de grupos de interés que abarca desde los ciudadanos y comercios como generadores iniciales, hasta los proveedores de maquinaria pesada e insumos químicos para la operación. El capital humano operativo, integrado por recicladores de oficio, conductores y técnicos especialistas, aporta la mano de obra indispensable para la limpieza, el transporte y el control de efluentes, mientras que las empresas de aseo y concesionarios centralizan la logística urbana y la disposición final. Toda esta dinámica es regulada por autoridades ambientales y entes de control encargados del licenciamiento y los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), contando además con el soporte de universidades para la investigación tecnológica, una sinergia de actores y etapas que queda estructurada conceptualmente en la Figura 14.

En Colombia, un exponente del aprovechamiento energético en este sector es el proyecto del relleno sanitario Doña Juana, en Bogotá, considerado el complejo de captación y valorización bioenergética más grande e importante de la nación y un referente en América Latina. A través de una infraestructura tecnificada que supera los 70 kilómetros de tuberías instaladas para la extracción del gas; esta central opera de manera continua las 24 horas del día sin depender de variables climáticas, lo que garantiza un suministro eléctrico firme y confiable. Actualmente, el complejo entrega cerca de 3.5 MW de energía limpia al Sistema Interconectado Nacional (SIN); sin embargo, cuenta con una capacidad instalada proyectada para generar hasta 25 MW, cuya entrada en operación comercial está planificada para iniciar en el transcurso de este año 2026. En el Valle del Cauca, se cuentan con 2 rellenos sanitarios que presentan las siguiente características:

Relleno Sanitario Colomba Guabal, ubicado en Yotoco y operado por la empresa Interaseo, destaca como el tercer relleno más grande de Colombia por tamaño y volumen. Con una extensión de 63.4 hectáreas, esta infraestructura recibe un promedio

diario de 2,100 toneladas de desechos provenientes de 20 municipios, siendo la ciudad de Cali el principal aportante con el 70% de dicho volumen; en términos de valorización energética, reporta un notable caudal de biogás tratado del orden de los 15,900 Nm³/h. Por su parte, el Relleno Sanitario CIGE Presidente, situado en San Pedro y bajo la operación de Veolia, funciona como un Centro Inteligente de Gestión Ecológica. Este complejo procesa un promedio diario de 800 toneladas de residuos sólidos recolectados en 21 municipios de la región —entre los que sobresalen Buga, Tuluá y Palmira— y cuenta con una infraestructura logística y técnica diseñada para manejar un caudal de biogás estimado en 3,600 Nm³/h.

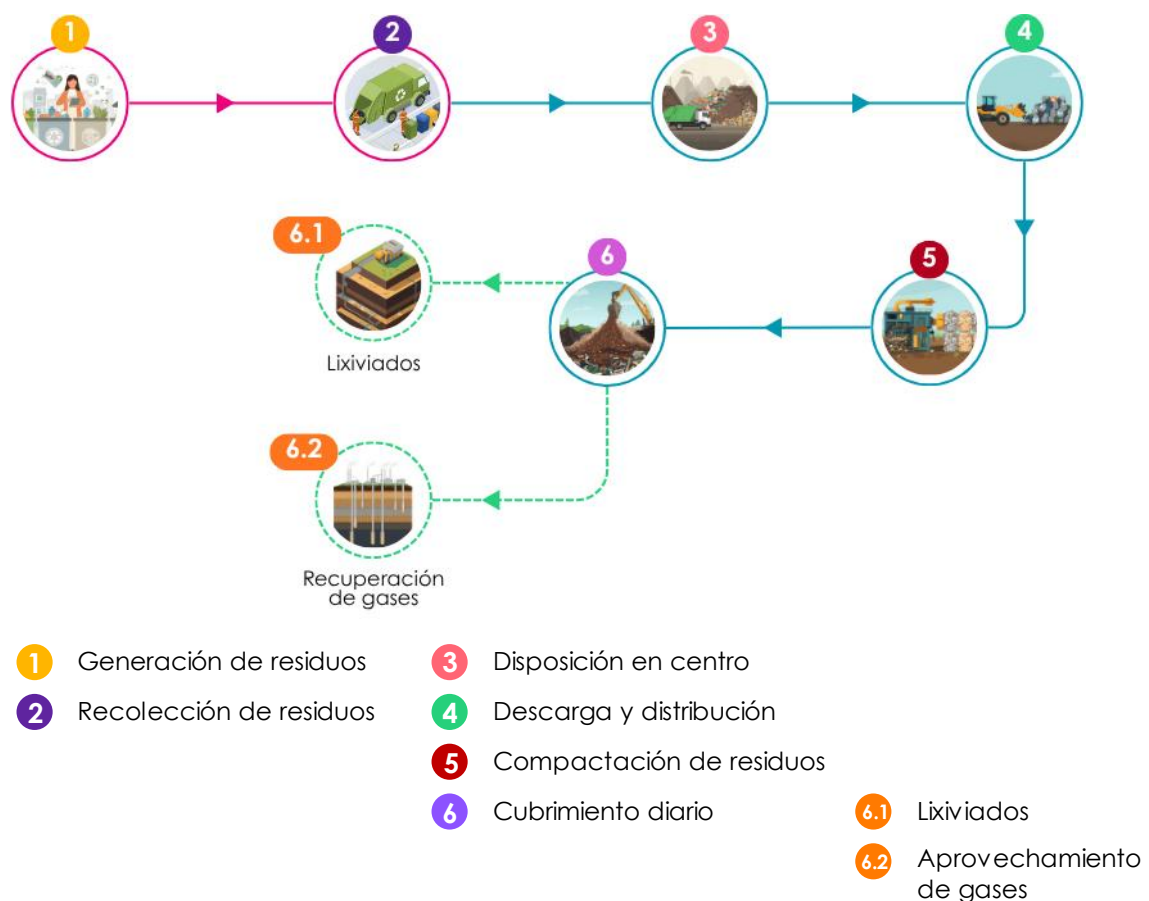


Figura 14 Esquema completo de la generación y manejo de RSU. Elaboración propia.

4.3 Identificación de capacidades para la transformación de biomasa residual

Esta sección presenta un mapeo detallado de los actores que conforman el ecosistema de aprovechamiento de biomasa en el Valle del Cauca, considerando su participación en las etapas de pretratamiento, procesamiento y transformación. Para esto, se realizó una revisión sistemática de fuentes secundarias, incluyendo información proveniente de sitios web institucionales, informes técnicos, publicaciones sectoriales, notas de prensa y otros documentos especializados. Adicionalmente, se complementó la información mediante consultas directas y validaciones realizadas a través de contacto telefónico con actores estratégicos del ecosistema.

La recopilación y análisis de la información se desarrollaron bajo un enfoque de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva (VT e IC), mediante un proceso estructurado de captura, procesamiento y análisis de información científica y tecnológica. Complementariamente, se construyeron fichas técnicas para cada tecnología y se estableció el nivel de madurez tecnológica (TRL) con base en metodologías desarrolladas por la NASA, el Departamento de Energía de EE.UU (DOE) e información técnica de Cenicaña.

En el Valle del Cauca se identificó un ecosistema bioenergético compuesto por 54 actores vinculados al pretratamiento, evidenciando una sólida base en la generación de conocimiento y en la distribución e instalación de equipos industriales. La mayor parte de las capacidades científicas y tecnológicas se concentra en los municipios de Cali y Palmira, donde se ubican 28 laboratorios universitarios especializados en I+D. Entre las instituciones con mayor participación se encuentran Univalle, ICESI, UAO y UNAL Palmira, las cuales trabajan de manera articulada con centros de investigación como Cenicaña, CIPAV, CIAT y Agrosavia. Asimismo, se identificó que el Valle de Cauca, cuenta con un corredor industrial consolidado en la zona de Cali-Palmira-Yumbo-Candelaria-Tuluá, donde se concentran empresas especializadas en calderas, sistemas térmicos y equipos de molienda que habilitan la reconversión energética del sector productivo.

En la Figura 15 se presentan los actores vinculados a la generación de conocimiento, así como a la distribución e instalación de equipos industriales asociados a las tecnologías

de pretratamiento de biomasa. Estos actores se encuentran clasificados según su participación en rutas de conversión bioquímica y termoquímica.

Mapeo de actores pretratamiento para la ruta **bioquímica**



Mapeo de actores pretratamiento para ruta **termoquímica**



Figura 15 Esquema de actores para la preparación y el tratamiento de biomasa en el departamento del Valle del Cauca. Elaboración propia

Adicionalmente, el departamento cuenta con una red consolidada de actores que participan en la generación de conocimiento, el desarrollo y ejecución de proyectos, así como en el procesamiento y transformación de biomasa para la producción de energía aprovechable. Estas capacidades se articulan en torno a tres rutas tecnológicas principales de valorización energética.

En la ruta termoquímica, los nueve ingenios azucareros del Valle del Cauca aprovechan el bagazo como combustible para la cogeneración de energía, cubriendo sus requerimientos energéticos y entregando los excedentes de electricidad a la red pública. De manera similar, empresas como Smurfit Westrock y Nestlé valorizan sus residuos industriales, principalmente residuos forestales y cisco de café, respectivamente, para la generación de energía eléctrica destinada al autoconsumo.

Por su parte, en la ruta bioquímica, compañías como Bavaria y Sucroal aprovechan los efluentes generados en sus operaciones industriales para la producción de biogás mediante procesos de digestión anaerobia. Similarmente, instalaciones de tratamiento y gestión de residuos, como la PTAR Cañaveralejo y el Relleno sanitario de Presidente utilizan los lodos residuales y RSU, respectivamente, para la producción de biogás.

Asimismo, en el Valle del Cauca ha venido emergiendo una “Nueva Frontera” de biorrefinería avanzada, con proyectos en desarrollo de Hidrógeno Verde y SAF, impulsados por ValueSkies, Alesco y la Gobernación del Valle.

La figura presenta los actores vinculados al procesamiento y transformación de biomasa, agrupados según la ruta de valorización energética en la que participan.

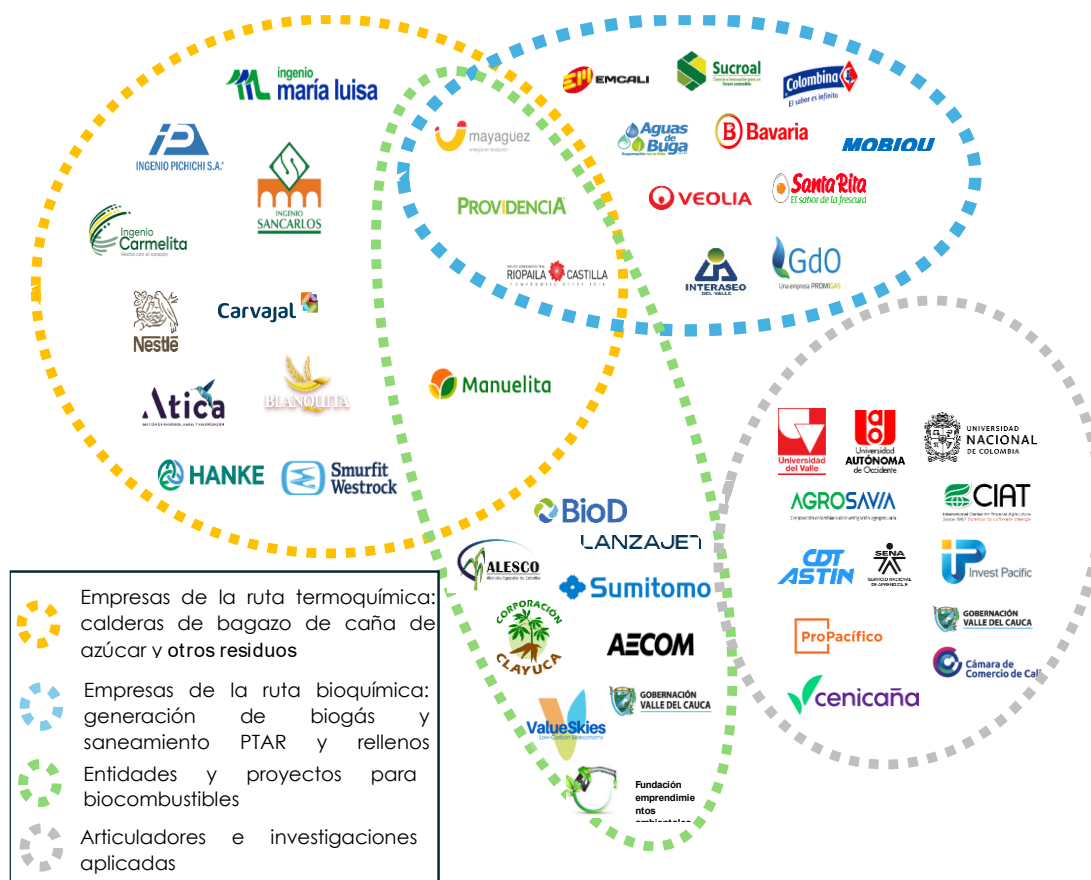


Figura 16 Esquema de actores para el procesamiento y la transformación de biomasa en el departamento del Valle del Cauca. Elaboración propia

Finalmente, para facilitar la articulación del ecosistema, se desarrolló una herramienta digital en formato HTML que consolida la información técnica de los actores identificados. Esta plataforma permite realizar búsquedas y filtrados dinámicos por nombre, tecnología, ciudad y tipo de organización (universidad, empresa, laboratorio, etc.). La herramienta presenta los resultados mediante tarjetas de presentación que incluyen la línea de especialidad del actor y ofrecen acceso a fichas técnicas detalladas y a su ubicación geográfica georreferenciada mediante la integración con Google Maps. En su versión actual, el portafolio permite visualizar las capacidades de actores en pretratamiento y en procesamiento y transformación, Figura 17.



Figura 17 Portafolio de actores en HTML. Elaboración propia

La Figura 18 muestra ejemplos de tarjetas correspondientes a proveedores departamentales de equipos. Estas tarjetas permiten identificar empresas con capacidad comercial y de implementación tecnológica en el Valle del Cauca. Un ejemplo de ello es Ingeniería IMA, ubicada en Palmira, la cual se identifica como proveedor de equipos (molinos) para el pretratamiento de residuos destinados al aprovechamiento mediante rutas bioquímicas.

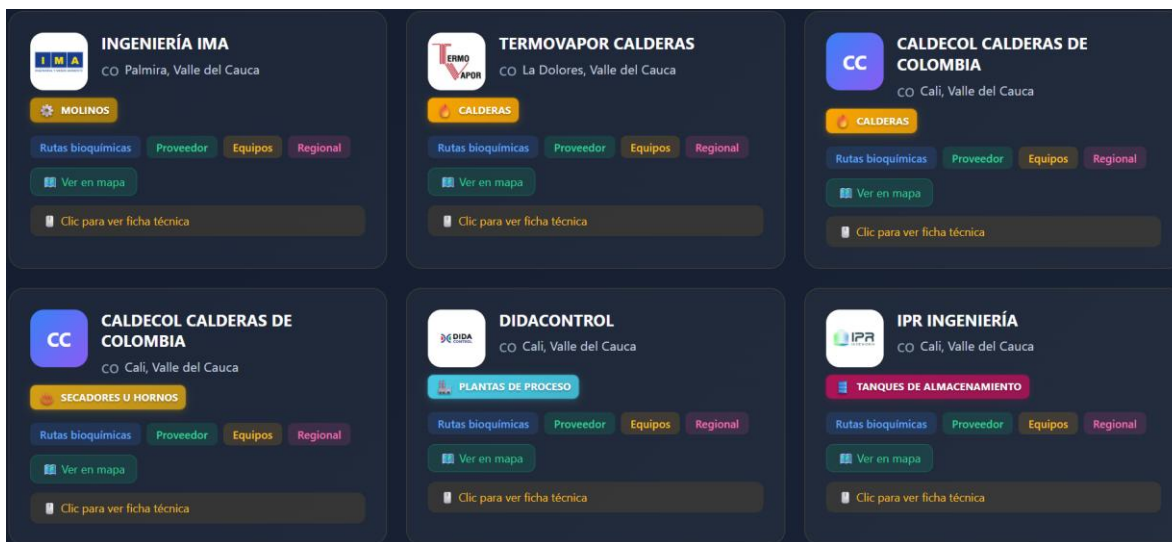


Figura 18 Tarjetas de proveedores de equipos. Elaboración propia

Por otra parte, la Figura 19 muestra la ficha técnica de uno de los proveedores de equipos identificados, la cual incluye información sobre su ubicación, capacidad productiva y portafolio de productos y servicios.

Ingeniería IMA		Portafolio de productos y servicios
Ubicación: Cra 35 # 34 A – 31, Palmira Teléfono: Comercial: (+2) 286 4601, 315 574 6544 Email: ventas@ingenieriama.com.co Portal web: https://www.ingenieriama.com.co/	Capacidad Secador rotativo con sistema infrarrojo F-SECR1-100 fabricado en acero inoxidable AISI 304, con tambor giratorio y sinfín interno para el transporte del producto. Opera con motoreductor trifásico de 1 HP e incorpora un quemador infrarrojo a gas con sistema de nivelación para un secado eficiente. Cuenta con aspersión de agua para humedecer el producto antes del secado.	- Servicios de soldadura, electrónica de equipos y doblado de láminas, entre otros servicios del sector metalmeccánico. Además, brinda diseño y modelado 3D, así como consultoría, diseño y construcción de plantas. - Ofrecen diversos equipos en las líneas de trabajo, entre ellos un molino de martillos fabricado en acero inoxidable, con un rotor horizontal equipado con martillos pivotantes y un tamiz inferior intercambiable, adaptable a las necesidades del cliente. La capacidad de operación varía según el volumen requerido y la línea de proceso.
Datos importantes - Ingeniería Metalmeccánica Alimenticia S.A.S es una empresa con más de 10 años de experiencia en el diseño y fabricación de equipos para la industria alimenticia. - Suministran equipos industriales, componentes y repuestos, junto con soporte técnico especializado, instalación de maquinaria, desarrollo de obras civiles completas, desde la elaboración de planos hasta su ejecución, y servicios integrales de mantenimiento. - Se han enfocado en las líneas avícola, cocción y laboratorio, fruver, lácteos y varios.		
 253		
Fuente: Ingeniería IMA (2021a, 2021b, 2021c).		

Figura 19 Ficha técnica. Elaboración propia

1.1. Cuantificación del potencial de transformación de biomasa en energía

Para este análisis, se seleccionaron las biomásas con potencial de aprovechamiento energético a partir de criterios relacionados con su composición fisicoquímica, incluyendo contenido de humedad, sólidos volátiles y materia orgánica. Como resultado, las biomásas que no cumplen con los requisitos mínimos para su valorización energética (semillas y tejido interno de naranja, corazón de piña y pseudo-tallo de plátano) se orientan hacia alternativas de aprovechamiento no energético. Por su parte, las biomásas restantes se clasifican según su aptitud para procesos de conversión energética por vía termoquímica o por vía bioquímica.

1.1.1. Determinación de potencial energético teórico

Según lo descrito en el apartado de metodología, el potencial energético teórico se estimó mediante el poder calorífico superior (PCS) de cada biomasa y su cantidad generada anualmente en base seca. Así pues, el análisis del potencial energético teórico de las biomásas residuales del Valle del Cauca permitió estimar una

disponibilidad total de 130,015 TJ, considerando únicamente aquellas biomásas con características adecuadas para su aprovechamiento energético.

Este potencial se concentra principalmente en los sectores agrícola e industrial, que aportan el 38.78% y el 39.48% del total, respectivamente. Por su parte, el sector pecuario contribuye con el 17.46%, mientras que los sectores urbano y forestal presentan participaciones más reducidas, equivalentes al 4.12% y 0.16%. Esta distribución es consistente con los resultados del inventario de biomasa, dado que el potencial energético depende directamente tanto de la disponibilidad de los residuos como de sus propiedades energéticas, especialmente su PCS.

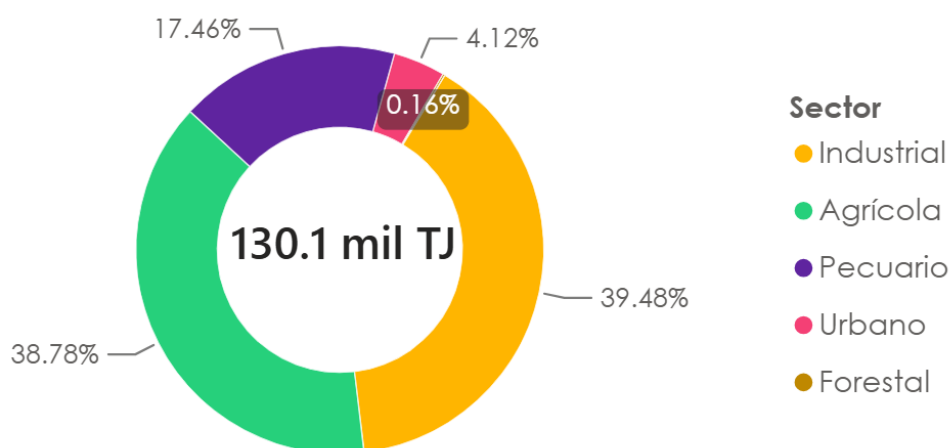


Figura 20 Distribución sectorial de la energía teórica generada a partir de los residuos del Valle del Cauca. Elaboración propia

Los residuos con mayor contribución son el Residuo Agrícola de Cosecha (RAC) con 48,317 TJ y el bagazo de caña con 48,105 TJ, valores con una diferencia promedio de 80.42% con respecto a la siguiente biomasa con mayor potencial energético.

A nivel municipal, Palmira (19,971 TJ) y Candelaria (13,731 TJ) se consolidan como los líderes geográficos en aporte energético teórico, principalmente con residuos agrícolas e industriales, principalmente, por ser municipios donde se desarrollan actividades agrícolas e industriales asociadas a la cadena de la caña de azúcar.

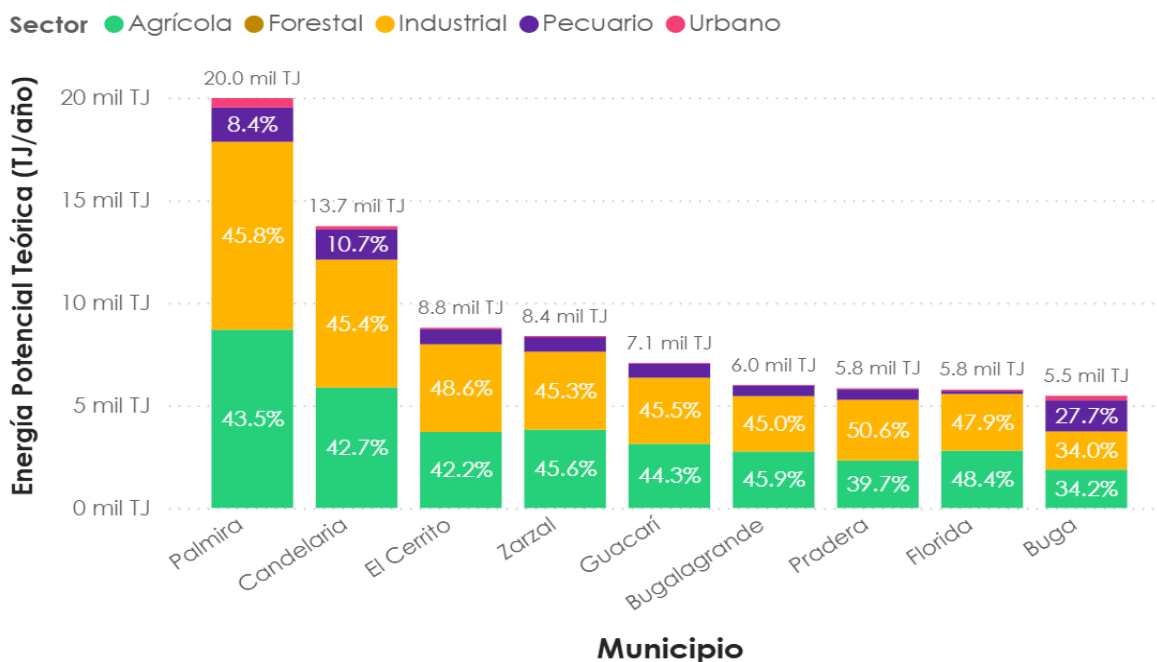


Figura 21 Distribución municipal de la energía potencial teórica del Valle del Cauca. Elaboración propia

1.1.2. Determinación de potencial energético útil

Para estimar el potencial energético útil de las biomásas residuales del Valle del Cauca, se evaluaron tres tecnologías de aprovechamiento representativas de las principales rutas de conversión energética: la digestión anaerobia para la transformación bioquímica, y la combustión y gasificación para la transformación termoquímica. La asignación de las biomásas a cada ruta se realizó con base en sus características fisicoquímicas descritas en la [Tabla 6](#).

Tabla 6 Condiciones de adaptabilidad de Biomásas a tecnologías de conversión. Elaboración propia.

Tecnología	Condiciones	
	Parámetro	Valor
Transformación Bioquímica - Digestión anaerobia	Humedad	>50%
	Relación SV/ST	70-95%
	Relación C:N	10:1 - 45:1
	Humedad	<50%

Transformación	PCS húmedo	>0.00656 TJ/t
Termoquímica –		
Combustión y	Cenizas	<30%
Gasificación	Material volátil	>70%

En primer lugar, para la digestión anaerobia se aplicaron eficiencias de conversión a metano de cada biomasa (PBM), asociada con su contenido de sólidos volátiles, operando teóricamente bajo un reactor CSTR. A partir de ello, se identificó un potencial energético útil de 6,671 TJ/año en forma de metano. Con este volumen energético, se considera que se podría cubrir aproximadamente el 23.2% del déficit actual de gas natural del Valle del Cauca, porcentaje que podría aumentar hasta el 86.8% si el recurso se orienta prioritariamente a los sectores residencial y de transporte.

La mayor contribución a este potencial proviene del sector pecuario, que aporta el 50.81% del total debido a la alta biodegradabilidad de sus residuos. Le sigue el sector urbano (23.42%), industrial (20.03%) y agrícola (5.47%).

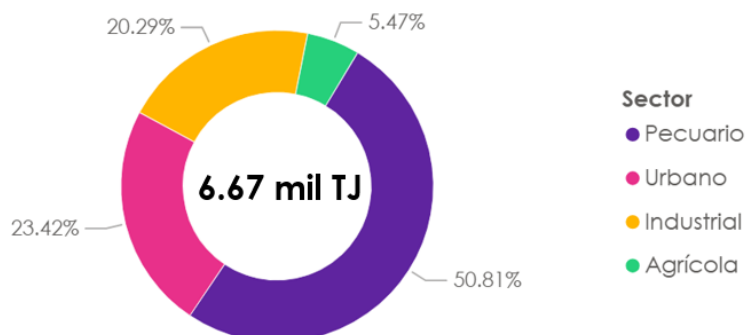


Figura 22 Energía útil potencial - Digestión anaerobia. Elaboración propia

Actualmente, en el Valle del Cauca existen formas de aprovechamiento energético de biomasa mediante la producción de biogás. Entre ellas se destaca la valorización de los lodos generados en la PTAR Cañaveralejo, donde a través de procesos de digestión anaerobia se producen entre 400 y 500 m³/h de biogás utilizado en cogeneración para obtención de 800-900 kW/h [1]. Asimismo, en el relleno sanitario Presidente, en Yotoco, se aprovecha el biogás generado por la degradación de los residuos sólidos dispuestos, alcanzando una producción aproximada de 900 m³/h.

Por su parte, las tecnologías termoquímicas evidenciaron el mayor potencial de aprovechamiento energético entre las alternativas evaluadas. En efecto, el aprovechamiento de las biomásas mediante combustión permitiría generar hasta 19,207 TJ/año de energía eléctrica. No obstante, debido a que una parte importante de la energía producida a partir del bagazo de caña es utilizada para cubrir los requerimientos energéticos de los propios ingenios azucareros, el potencial energético útil disponible para suministro externo se reduce a 16,274 TJ/año. Aun bajo esta condición, la energía efectivamente entregable equivale a cerca del 65.3% de la demanda eléctrica actual del departamento. Este potencial está dominado por el sector agrícola, que aporta el 57.46% del total gracias a la abundancia de residuos lignocelulósicos de baja humedad, seguido por el sector industrial (34.35%), pecuario (7.95%) y forestal (0.25%).

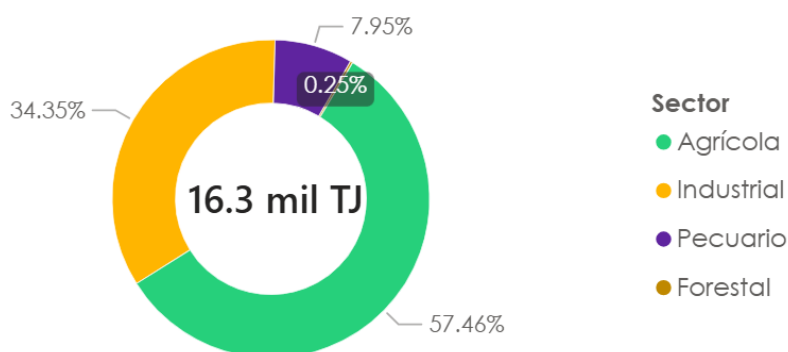


Figura 23 Energía eléctrica útil potencial – Combustión. Elaboración propia

Por otro lado, la gasificación se calculó considerando un gasificador para biomásas con humedad del 20%, requiriendo una etapa previa de secado para obtener un gas sintético denominada Syngas compuesto principalmente por CO, H₂ y CH₄. Esta tecnología mostró un desempeño superior a la combustión directa, alcanzando un potencial energético útil de 21,912 TJ/año, equivalente a un cubrimiento potencial del 87.9 % de la demanda eléctrica departamental. Este resultado posiciona a la gasificación como una tecnología atractiva para el aprovechamiento de biomasa residual en el Valle del Cauca.

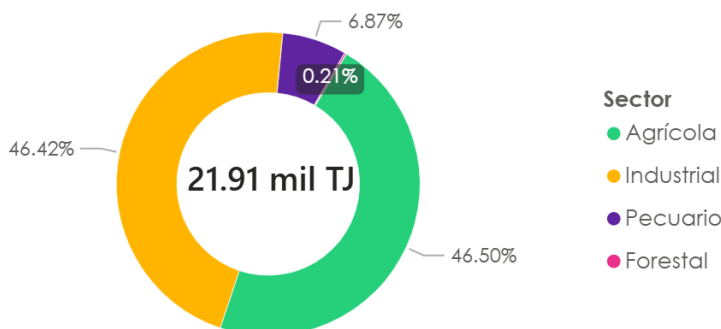


Figura 24 Energía eléctrica útil potencial – Gasificación. Elaboración propia

Adicionalmente, la integración de procesos de gasificación con reacciones de desplazamiento agua-gas (WGS) y reformado con vapor (SMR) permitió estimar un potencial de producción de 37,404 TJ/año a partir del vector energético de hidrógeno, equivalente a aproximadamente 313,282 toneladas anuales de H_2 . Esta cantidad supera ampliamente la demanda nacional actualmente proyectada para este energético.

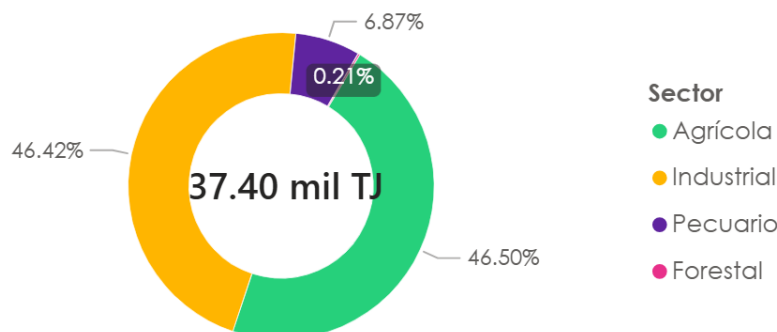


Figura 25 Energía útil potencial - Hidrógeno por gasificación. Elaboración propia

Conjuntamente, estos resultados demuestran que la biomasa residual del departamento constituye un recurso estratégico para contribuir a la seguridad energética departamental; así que, con el fin de identificar oportunidades de cobertura de la demanda energética del Valle del Cauca, fue necesario determinar qué proporción del potencial energético teórico de las biomásas puede convertirse efectivamente en energía útil mediante las diferentes rutas de aprovechamiento.

La brecha observada entre el potencial energético teórico del departamento, estimado en aproximadamente 130,000 TJ/año, y su potencial útil, reducido a cerca de 22,900 TJ/año, representa el ajuste real impuesto por las limitaciones tecnológicas y físico-químicas del inventario. Por un lado, la ruta termoquímica mediante combustión

para generación eléctrica está gobernada por las restricciones de eficiencia del ciclo Rankine convencional, cuyas irreversibilidades térmicas en la caldera y las pérdidas en el condensador limitan la conversión a valores que típicamente oscilan entre el 20% y el 35% de la energía que ingresa al sistema. Por otro lado, la ruta bioquímica por digestión anaerobia se ve afectada por los rendimientos metabólicos de los consorcios microbianos y la fracción de materia orgánica recalcitrante (como la lignina) que no logra transformarse en biometano utilizable. A estas eficiencias de conversión se suman las ineficiencias intrínsecas de las materias primas; la alta humedad de biomásas como lodos de PTAR, vinazas y estiércoles actúa como un sumidero energético masivo, ya que penaliza drásticamente el poder calorífico neto al requerir una gran cantidad de energía solo para evaporar el agua interna. A pesar de la reducción, este potencial se calculó bajo las tecnologías comercialmente maduras y probadas a nivel global. Si bien hoy se investigan otras rutas de aprovechamiento avanzado, este remanente representa el techo energético real.

La [Figura 26](#) evidencia que la distribución sectorial del potencial energético cambia cuando se pasa del potencial teórico al potencial útil. Aunque inicialmente la energía potencial se encuentra distribuida de manera relativamente equilibrada entre los sectores agrícola (39.21%) e industrial (39.89%), esta participación se modifica al considerar las eficiencias reales de conversión energética de las tecnologías seleccionadas. Como resultado, el sector agrícola incrementa su participación hasta el 42.37% del potencial útil, mientras que el sector industrial reduce su aporte al 30.27%.

Esto muestra que la disponibilidad de biomasa no es el único factor que determina el aporte energético de cada sector. La composición de los residuos, su contenido de humedad y la eficiencia de las tecnologías de conversión influyen significativamente en la cantidad de energía que puede recuperarse efectivamente.

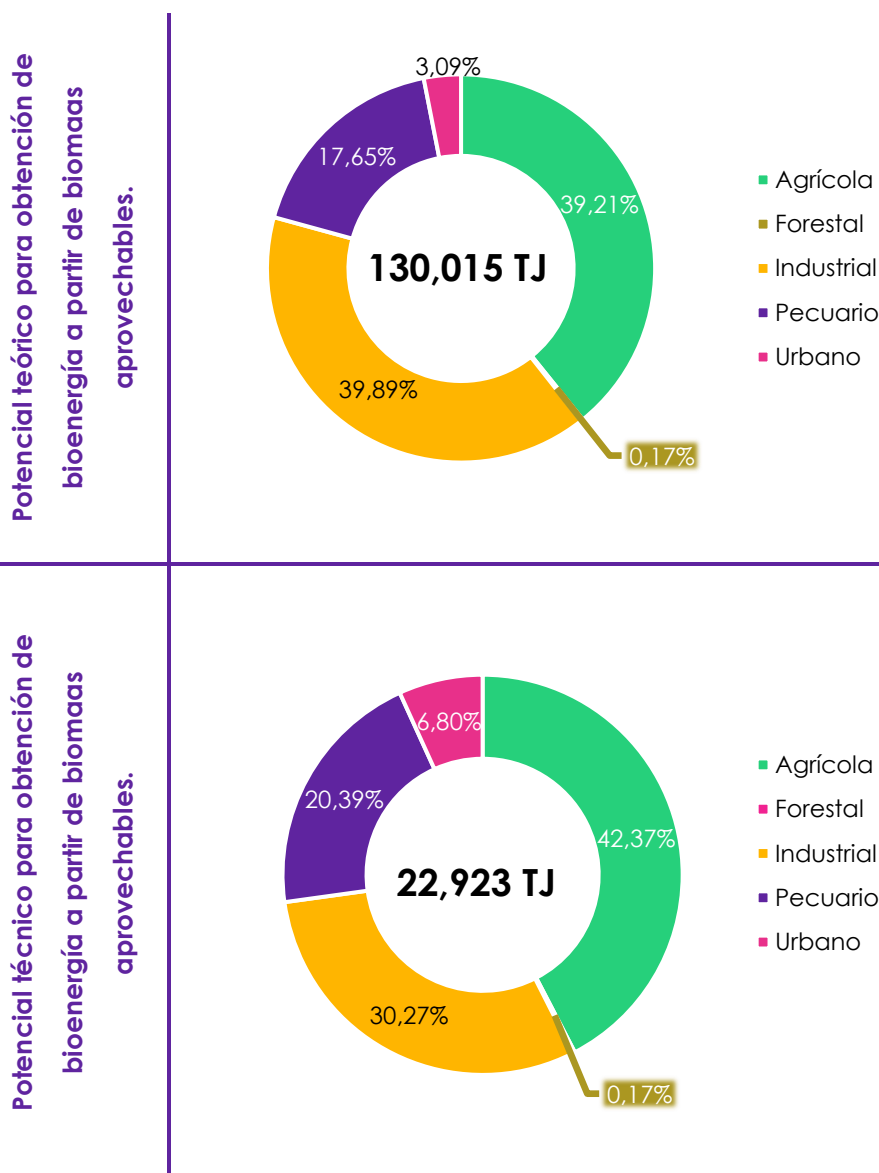
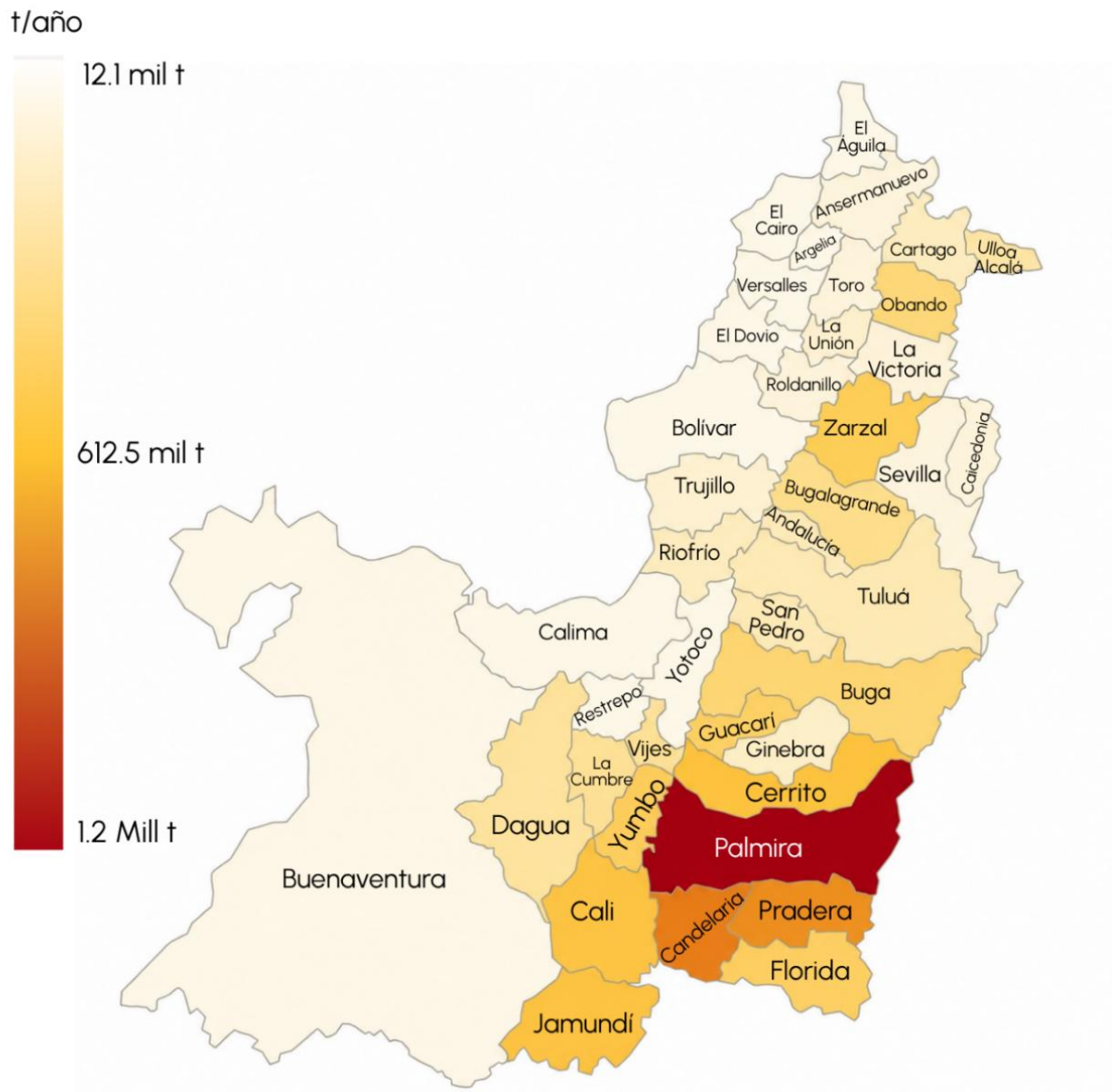


Figura 26 Conversión real de potencial energético teórico a útil

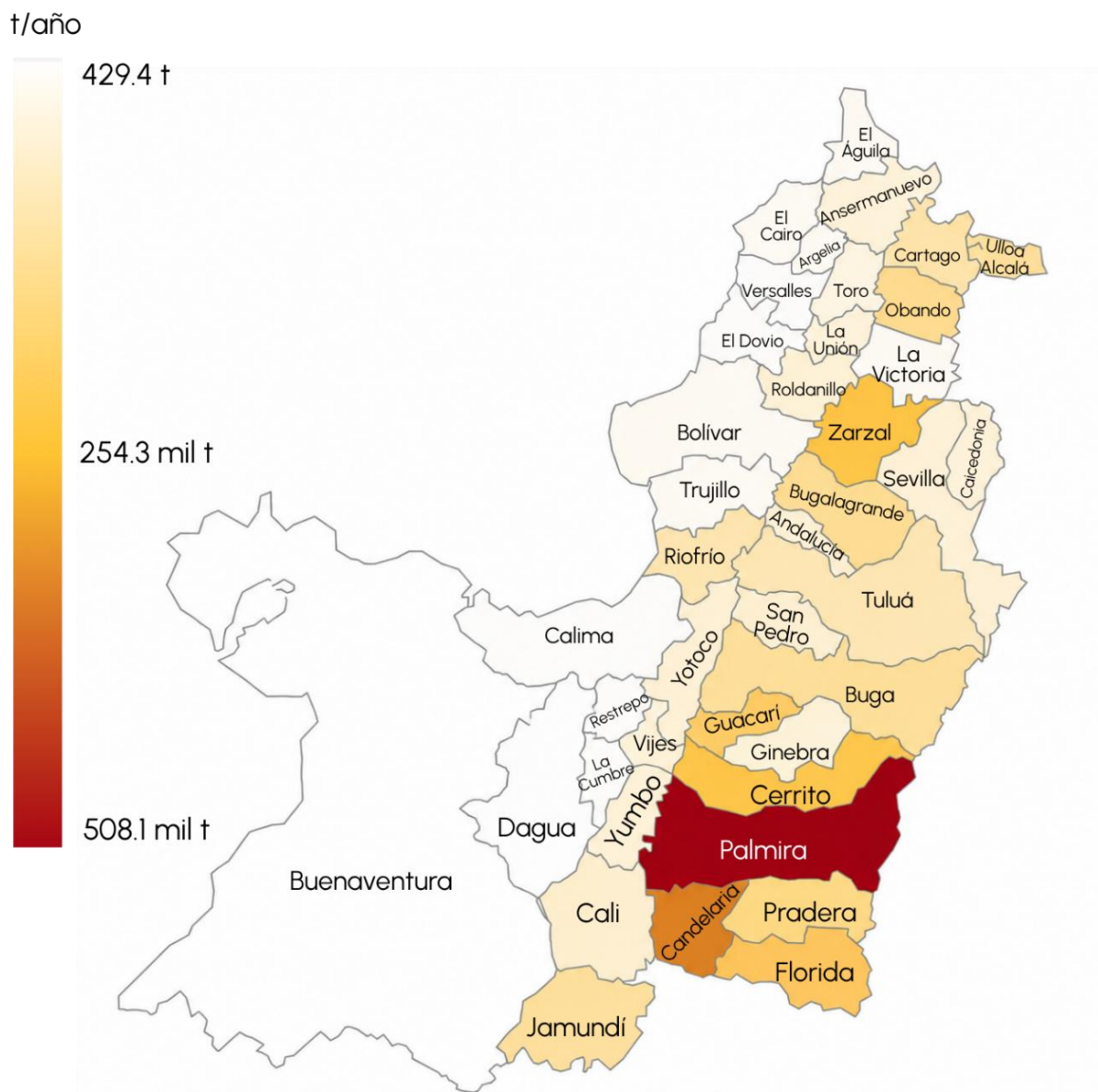
5 Georreferenciación del ecosistema de biomasa del Valle del Cauca

5.1.1 Biomasa residual municipal en el Valle del Cauca



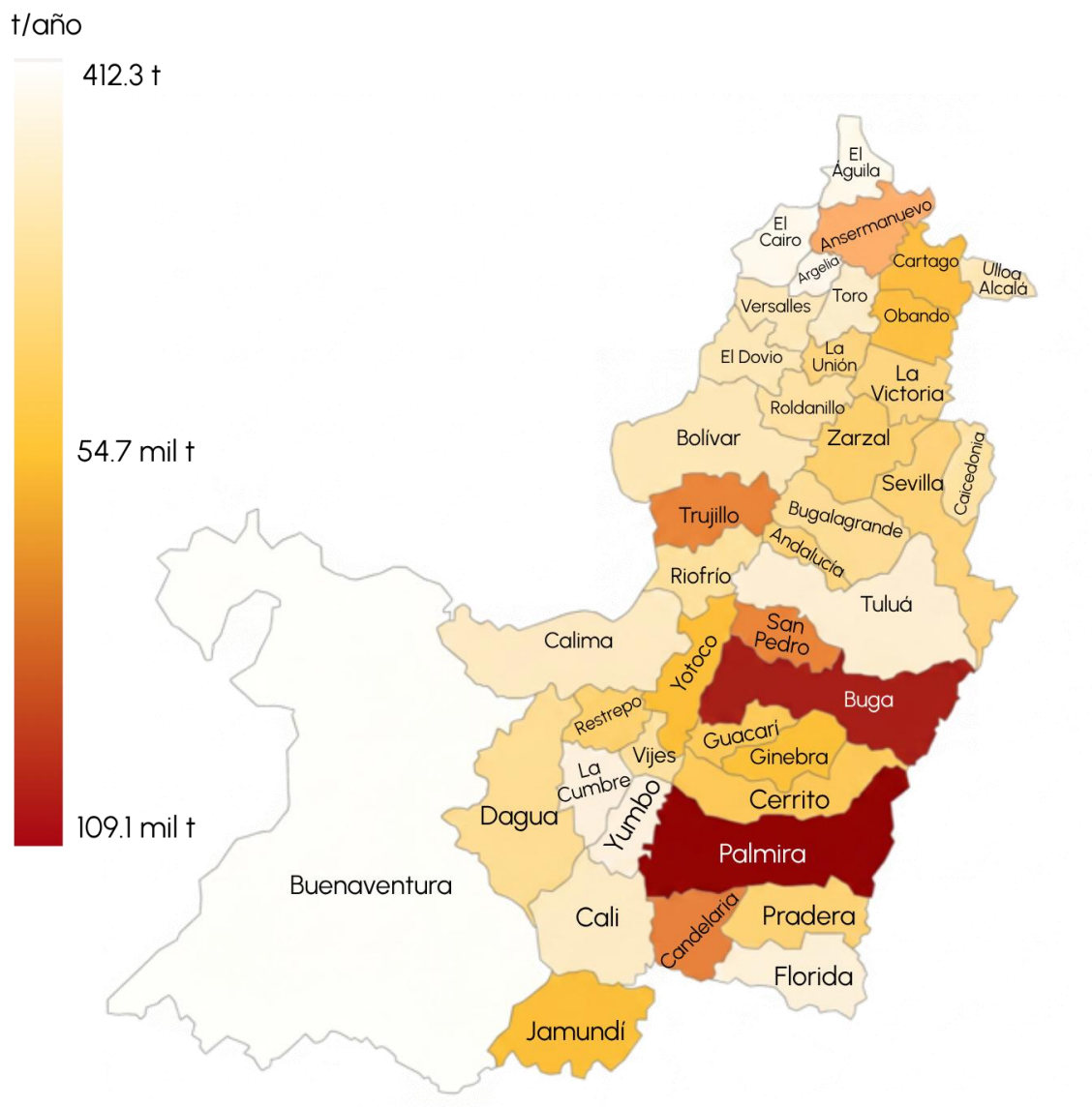
Mapa 1 Georreferenciación del total de biomosas generado en base seca en el Valle del Cauca.
Elaboración propia

5.1.2 Biomasa residual Sector Agrícola en el Valle del Cauca



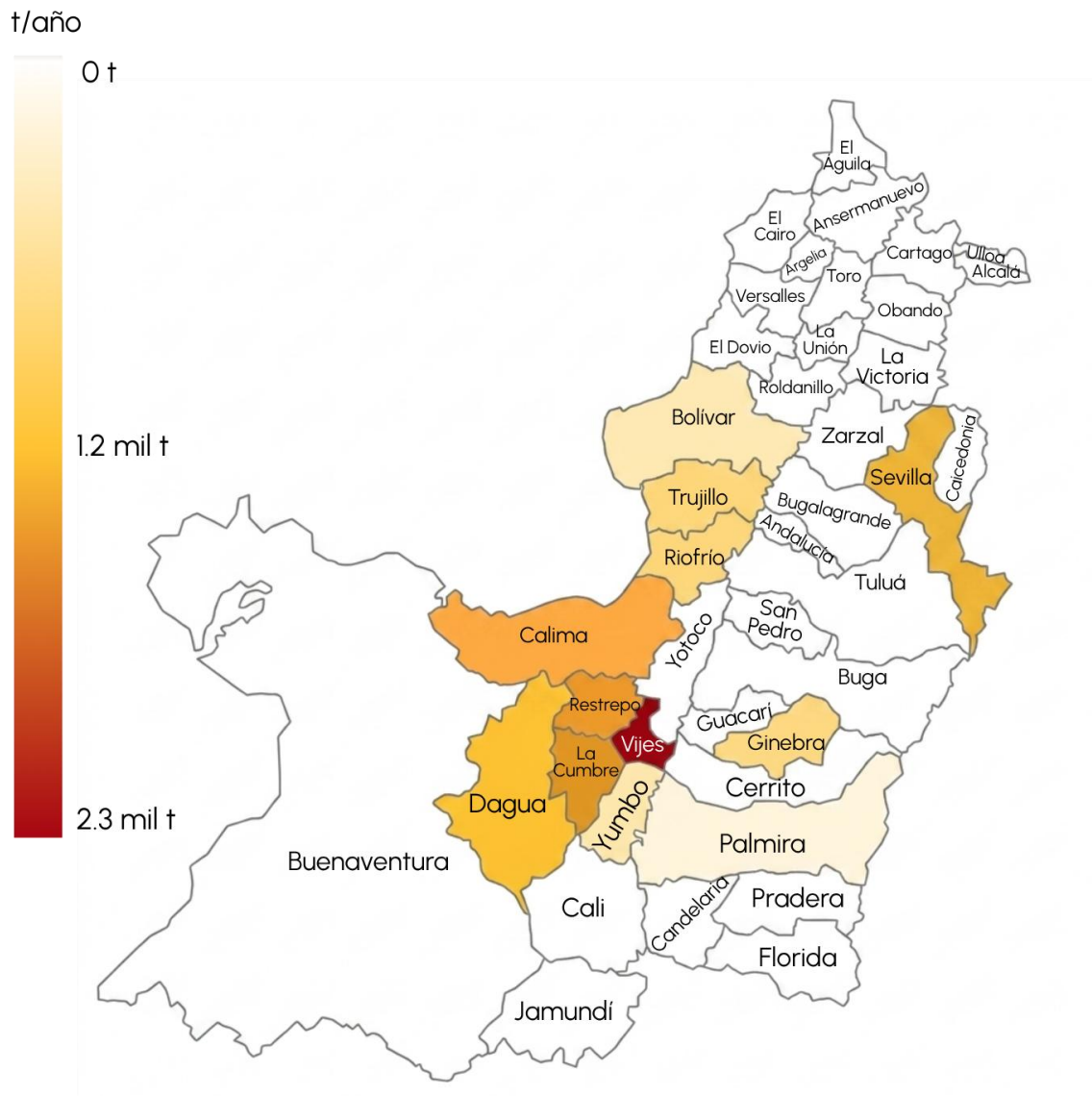
Mapa 2 Georreferenciación de biomásas agrícolas generadas en el Valle del Cauca. Elaboración propia

5.1.3 Biomasa residual Sector Pecuario en el Valle del Cauca



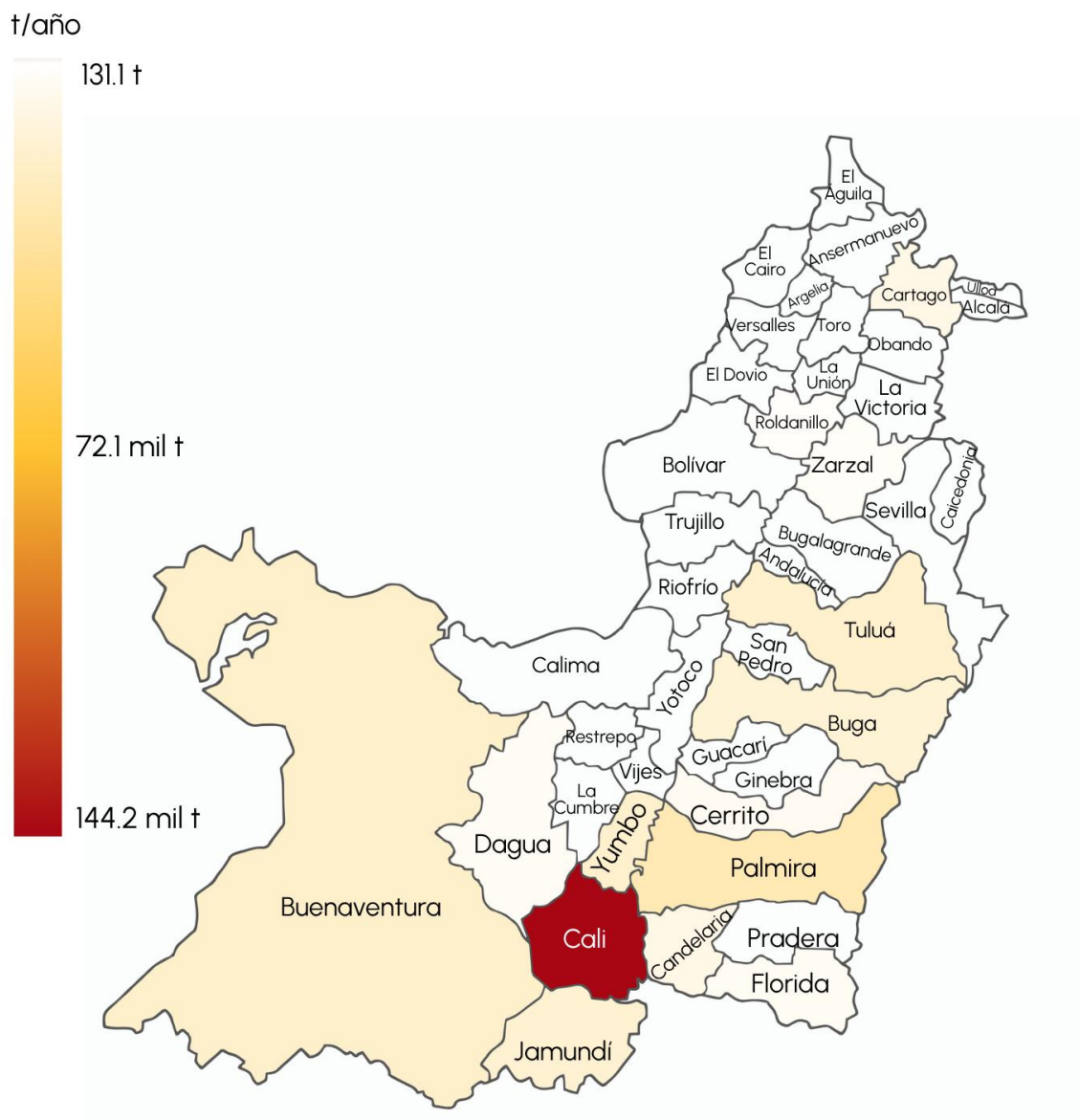
Mapa 3 Georreferenciación de biomasa pecuaria generada en el Valle del Cauca. Elaboración propia

5.1.4 Biomasa residual Sector Forestal en el Valle del Cauca



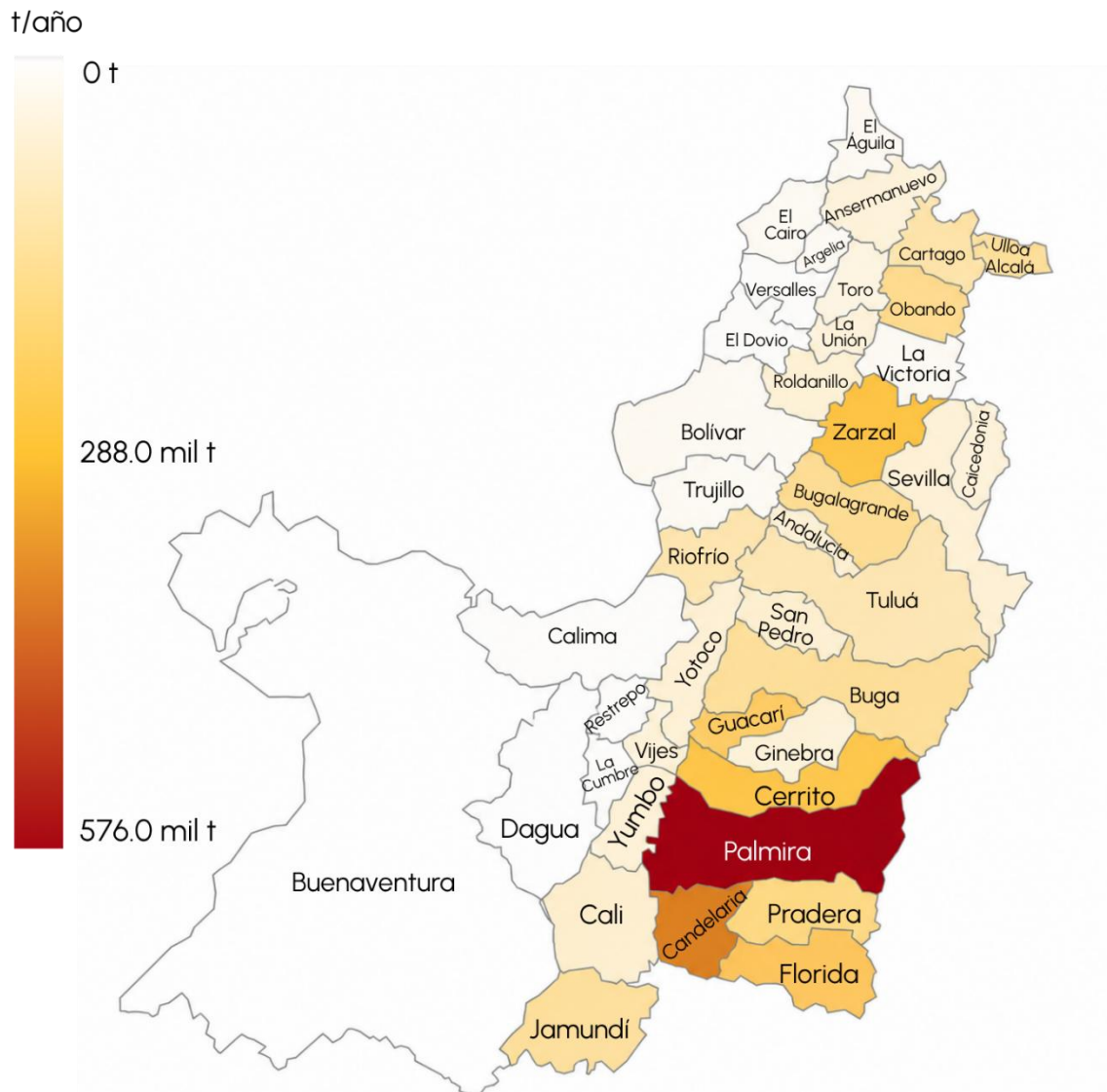
Mapa 4 Georreferenciación de biomasa forestal generadas en el Valle del Cauca. . Elaboración propia

5.1.5 Biomasa residual Sector Urbano en el Valle del Cauca



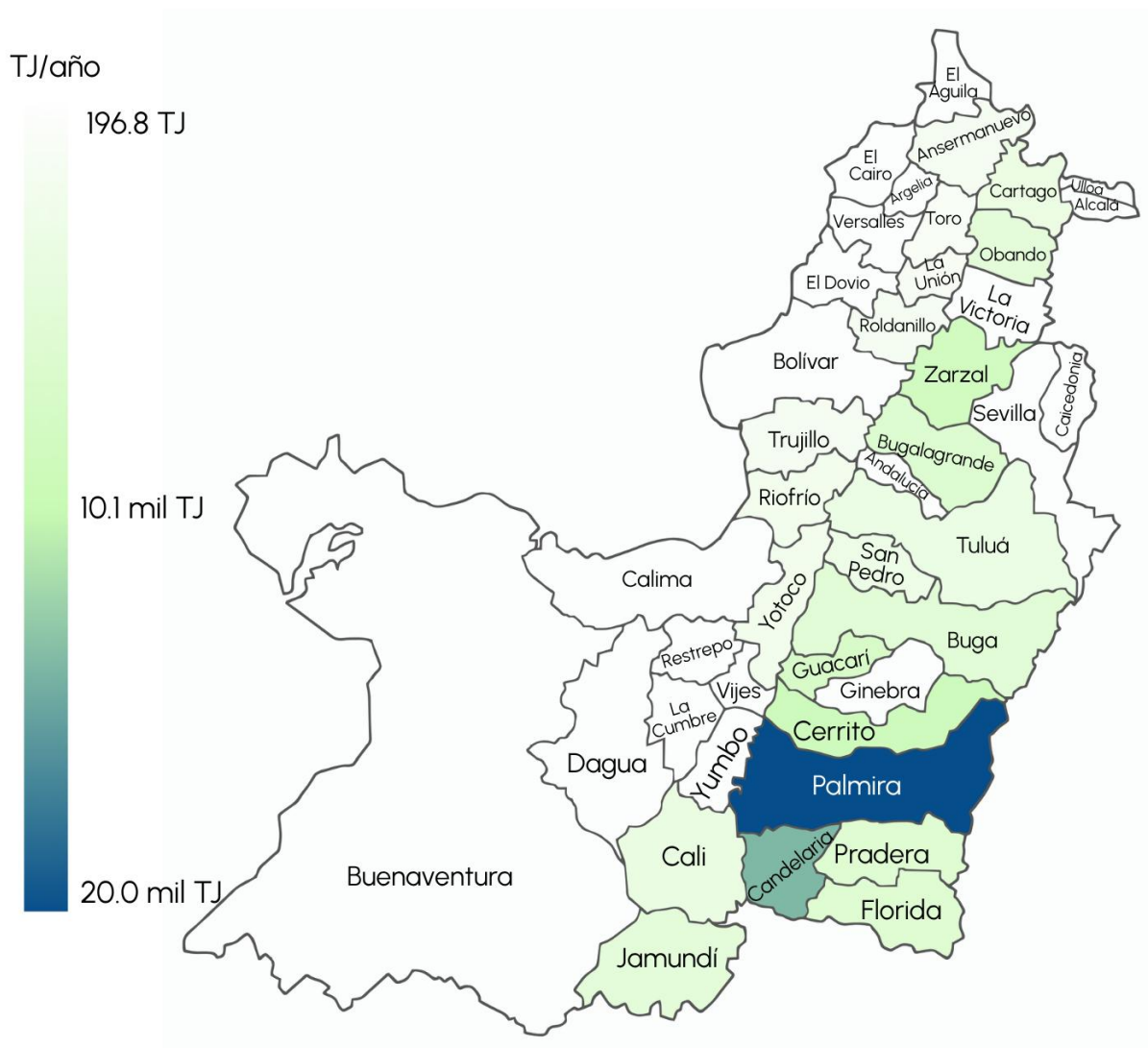
Mapa 5 Georreferenciación de biomosas urbanas generadas en el Valle del Cauca. Elaboración propia

5.1.6 Biomasa residual Sector Industrial en el Valle del Cauca



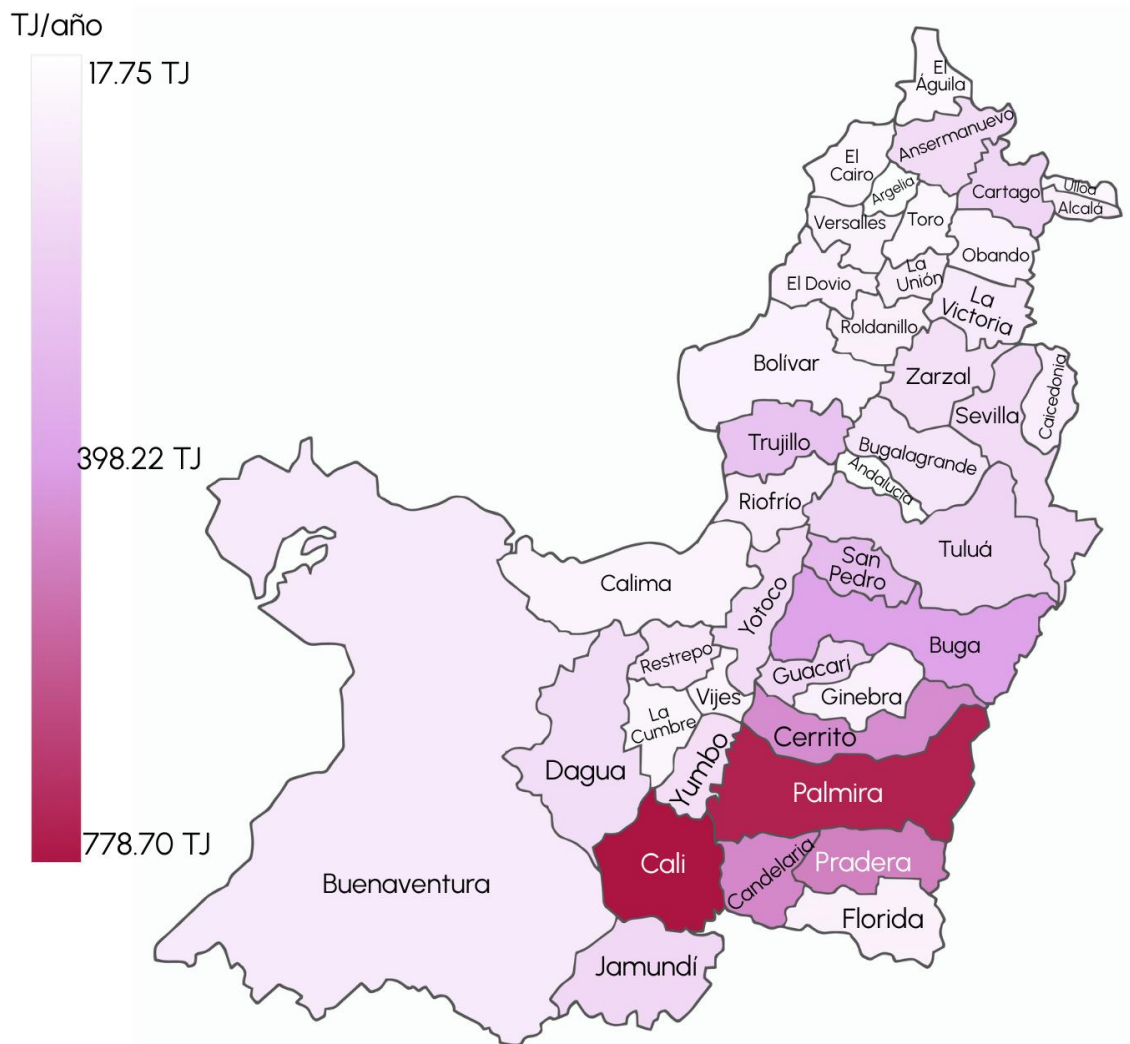
Mapa 6 Georreferenciación de biomásas industriales generadas en el Valle del Cauca. Elaboración propia

5.1.7 Potencial energético teórico departamental



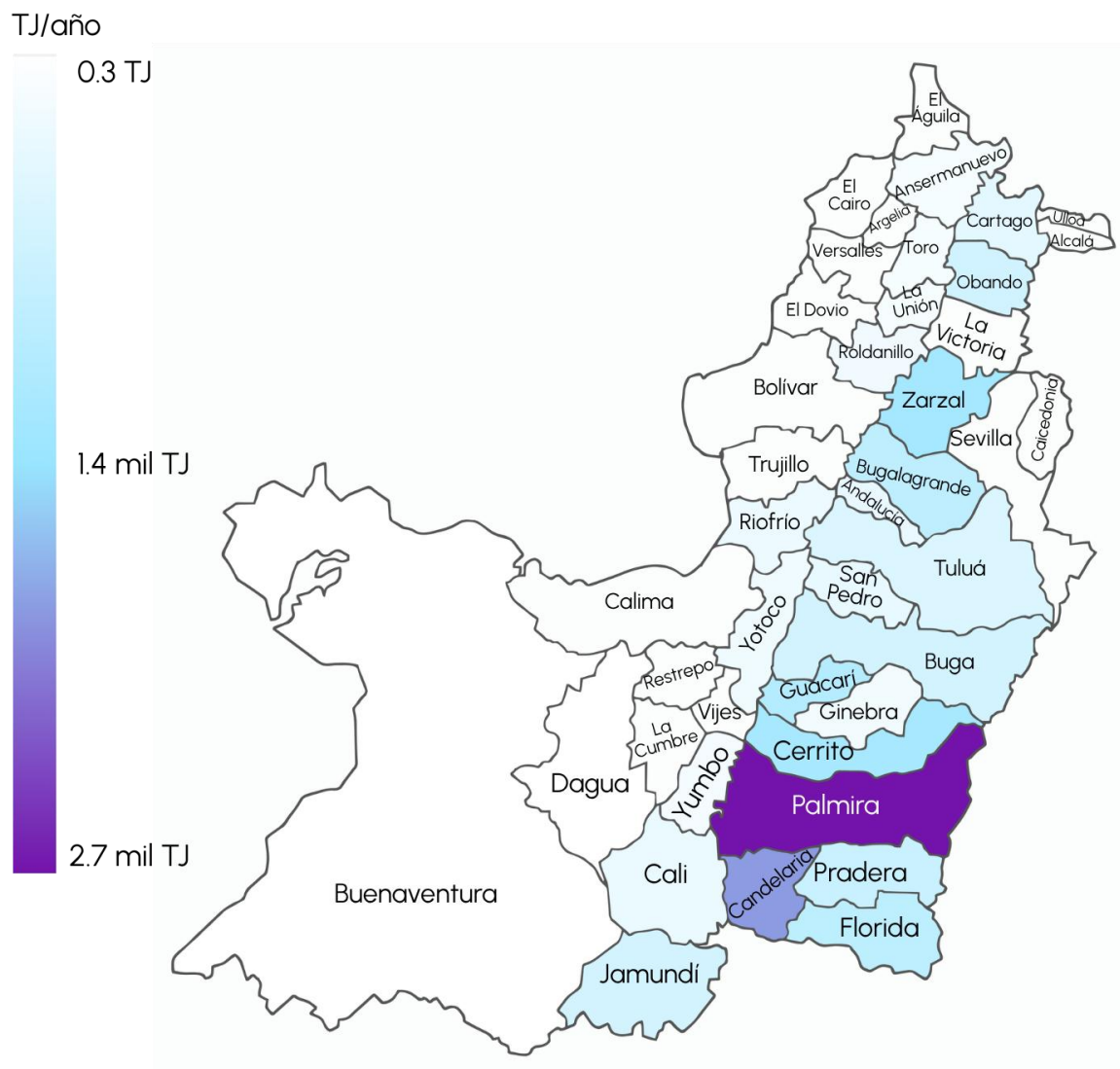
Mapa 7 Georreferenciación del potencial energético teórico del Valle del Cauca. Elaboración propia

5.1.8 Potencial energético útil – Digestión Anaerobia



Mapa 8 Georreferenciación del potencial energético útil por la tecnología de digestión anaerobia.
Elaboración propia

5.1.9 Potencial energético útil – Combustión



Mapa 9 Georreferenciación del potencial energético útil por la tecnología de combustión. Elaboración propia

6 Priorización de sectores productivos para el aprovechamiento energético de biomasa

En este capítulo se presenta la priorización de las alternativas de aprovechamiento energético de biomasa residual en el Valle del Cauca, integrando criterios técnicos, disponibilidad del recurso y condiciones territoriales. Para este análisis se aplicó la metodología de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), mediante la cual se estructuró un modelo multicriterio basado en la evaluación de expertos pertenecientes a los sectores energético, agroindustrial, académico y tecnológico. Los criterios y subcriterios considerados se presentan en la 8.

La metodología seguida por los expertos en la priorización se basó en imponer un puntaje de preferencia desde el 1 hasta el 9 comparando pares de criterios, definiendo 1 como igual importancia y 9 como importancia extrema. Los resultados de la consulta a expertos de esta evaluación evidencian que el criterio con mayor relevancia corresponde a la viabilidad técnica, con una ponderación de 61.89 % (ver Tabla 7), indicando que la selección de alternativas depende principalmente de la capacidad real de transformación energética de las biomasas. Dentro de este criterio, los expertos resaltaron la importancia del potencial energético útil obtenido mediante las tecnologías de conversión, considerando las eficiencias del proceso, seguido por las características fisicoquímicas de la biomasa, especialmente su contenido de humedad y materia aprovechable.

El segundo criterio de mayor importancia corresponde a la disponibilidad de la biomasa, con una ponderación de 31.52%, debido a que la existencia de un recurso energético teórico no garantiza su aprovechamiento si no cuenta con una generación suficiente, continua y concentrada en el territorio. Finalmente, las condiciones territoriales para la implementación representan el 6.59%, asociadas principalmente a la cercanía con infraestructura energética, capacidad de conexión y facilidad de integración de los proyectos al sistema energético departamental.

De manera específica, los subcriterios con mayor peso global fueron la energía útil obtenida mediante las tecnologías de conversión (29.26%), la humedad de la biomasa (23.32%) y la cantidad de biomasa generada anualmente (22.24%). Estos resultados reflejan que la priorización no depende únicamente de la cantidad disponible de biomasa, sino de la

capacidad efectiva de convertirla en energía aprovechable bajo condiciones técnicas y operativas reales.

Tabla 7 Ponderación de criterios posterior a evaluación de expertos. Elaboración propia

	Criterio 1				Criterio 2			Criterio 3		
	61.89%				31.52%			6.59%		
	Sub1.1.	Sub1.2.	Sub1.3.	Sub1.4.	Sub2.1.	Sub2.2.	Sub2.3.	Sub3.1.	Sub3.2.	Sub3.3.
POND	7.08%	29.26%	23.32%	2.23%	22.24%	7.50%	1.79%	5.10%	1.13%	0.36%

DTabla 8 Criterios y subcriterios de priorización. Elaboración propia

Criterio		Descripción
Criterio 1: Viabilidad técnica		Comprende el grado de desarrollo, aplicabilidad técnica y condiciones operativas requeridas para aprovechar energéticamente biomasa residual (ej: digestión anaerobia, combustión...)
Sub 1.1	Energía teórica estimada por poder calorífico superior (PCS)	Indica la máxima energía potencial teórica contenida en la biomasa.
Sub 1.2	Energía útil tomando en cuenta eficiencias de conversión energética	Máxima energía útil obtenida por la tecnología, ligada a limitaciones de la fracción del contenido orgánico de la biomasa que puede transformarse y rendimiento del equipo utilizado.
Sub 1.3	Humedad de la biomasa	Característica fisicoquímica de la biomasa que describe la cantidad de agua contenida en su estructura. Influye directamente en la eficiencia de conversión a energía, la selección de la tecnología y la necesidad de pretratamientos.
Sub 1.4	Materia orgánica aprovechable	SV presentes en la biomasa que se convierten a energía útil
Criterio 2: Disponibilidad de la biomasa		Evalúa la cantidad, distribución y disponibilidad real de la biomasa en el territorio.
Sub 2.1	Toneladas de biomasa generadas	Cantidad total de biomasa generada anualmente.
Sub 2.2	Densidad territorial de biomasa (t/km ²)	Nivel de concentración espacial de la biomasa. Densidad total de la biomasa (t) por km ² (o número de municipios).
Sub 2.3	Dispersión de la biomasa (inverso de la densidad)	Se refiere a que tan dispersa esta la biomasa, es el inverso de la densidad cuando la densidad es alta la dispersión es baja.
Criterio 3: Condiciones territoriales para la implementación		Evalúa el impacto potencial del aprovechamiento de la biomasa en el balance energético del territorio.
Sub 3.1	Distancia a infraestructura energética	Define la existencia de infraestructura de distribución de energía ya instalada en los puntos de generación de biomasa.

Sub 3.2 Impacto en el déficit energético regional

Se refiere al porcentaje de cubrimiento de la demanda energética actual del departamento, a través del potencial energético proveniente de biomasa residual.

Sub 3.3 Densidad de actores en el municipio (Accesibilidad a proveedores y tecnología local)

Facilidad de acceso a tecnología utilizada en el proceso a nivel local, eliminando la necesidad de importación de proveedores.

A nivel territorial, los resultados evidencian una concentración del potencial bioenergético principalmente en la zona centro y sur del Valle Geográfico del río Cauca, donde se concentra gran parte de la actividad agroindustrial del departamento y, en consecuencia, una generación continua de residuos con potencial energético. Dentro de la priorización realizada, el municipio de Palmira obtuvo la mayor valoración, ubicándose en los primeros lugares del análisis multicriterio.

La alternativa con mayor puntuación corresponde al aprovechamiento de los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) mediante combustión, con un coeficiente de cercanía de 0.90, seguida por el aprovechamiento del bagazo de caña en procesos industriales, con un coeficiente de 0.67. Estos resultados están asociados a la elevada disponibilidad de biomasa, el alto potencial energético útil obtenido mediante las tecnologías de conversión y la presencia de infraestructura productiva y energética desarrollada alrededor del sector azucarero.

La priorización obtenida es consistente con los resultados presentados en las secciones 5.1.9 y 4.3, donde se identificó que Palmira concentra uno de los mayores potenciales de energía útil del departamento. Esta relación se explica porque dentro del modelo AHP el criterio con mayor ponderación corresponde a la viabilidad técnica (61.89 %), que incorpora variables como la energía útil obtenida, la eficiencia de conversión y las características de la biomasa. Por lo tanto, los municipios con mayores volúmenes de biomasa aprovechable y mejores condiciones técnicas de transformación tienden a alcanzar las mayores posiciones dentro de la jerarquización.

Otros municipios con alto potencial energético fueron Candelaria, Florida, El Cerrito, Guacarí y Zarzal, donde se identificó una combinación favorable entre disponibilidad de biomasa e infraestructura productiva. Adicionalmente, mediante la ruta de digestión anaerobia se identificó el potencial estratégico de los residuos sólidos urbanos (RSOU) en Cali, con un coeficiente de priorización de 0.32, así como el aprovechamiento de gallinaza en municipios con alta actividad pecuaria como San Pedro y Buga.

Los RSOU representan una alternativa relevante para la producción de biometano debido a su generación continua, concentración en puntos específicos de disposición y alto contenido de materia orgánica biodegradable. Estas características reducen las barreras logísticas asociadas al transporte de biomasa y favorecen la implementación de sistemas de digestión anaerobia a escala regional.

En conclusión, la priorización evidencia que las mayores oportunidades de aprovechamiento energético en el Valle del Cauca se encuentran asociadas al sector sucroenergético, debido a la disponibilidad permanente de bagazo y RAC, así como a la infraestructura existente para su transformación. Sin embargo, alternativas como la digestión anaerobia de residuos urbanos y pecuarios complementan la estrategia regional al diversificar las fuentes de energía renovable y ampliar las posibilidades de producción de biometano para sectores con alta dependencia de gas natural.