

Evaluación de la oferta de biomasa residual agrícola con potencial de uso como fuente de energía renovable en el área de influencia del páramo de Santurbán en los municipios de Tona, Silos y Pamplona

Leidy Sofia Monroy Sarmiento

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela Ciencias Agropecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Agronomía

2025

Evaluación de la oferta de biomasa residual agrícola con potencial de uso como fuente de energía renovable en el área de influencia del páramo de Santurbán en los municipios de Tona, Silos y Pamplona

Leidy Sofia Monroy Sarmiento

Trabajo de grado para optar por el título de Agrónoma

Directora

Mabel Lucero Prada Soto

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela Ciencias Agropecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Agronomía

2025

Dedicatoria

Dedico este logro a mi hijo, Andrés Santiago, quien ha sido mi inspiración y el motor detrás de cada uno de mis esfuerzos; muestra de ello es la culminación de este trabajo y de lo que se puede lograr con amor, perseverancia y propósito. Gracias por ser parte de mi vida; deseo con todo mi corazón ser también una fuente de inspiración para la tuya.

¡Te amo, este logro también te pertenece!

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por acompañarme y guiarme durante este proceso. A mi hijo, por ser el motor de cada uno de mis logros. A mi pareja, Martin, por su apoyo incondicional. A mi directora de trabajo de grado, Mabel Lucero Prada Soto, por su orientación y dedicación. A la universidad, Nacional Abierta y a Distancia, por brindarme los espacios y herramientas necesarias para el desarrollo de mi carrera y de este trabajo.

Resumen

Los páramos, ecosistemas cruciales por su biodiversidad y aporte hídrico a las comunidades, enfrentan riesgos que amenazan su equilibrio y afectan a quienes dependen de ellos debido a la sobreexplotación provocada por el uso de combustibles fósiles y la tala de árboles para obtener energía calorífica. El objetivo de esta investigación fue evaluar la oferta de biomasa residual agrícola con potencial para ser utilizada como fuente de energía renovable, proveniente de cultivos ubicados en zonas de páramo de los municipios de Tona (Santander), Silos y Pamplona (Norte de Santander). Para ello, se empleó un enfoque mixto que combinó el análisis de fuentes secundarias, utilizando datos del Sistema de Información de Planificación Agropecuaria Rural (SIPRA) para la selección de cultivos, con información primaria recolectada a través de encuestas aplicadas a productores locales, en el marco del proyecto “Desarrollo de una herramienta metodológica computacional y tecnologías de energías renovables para la transición energética en zonas de alta montaña en condiciones de post-pandemia”, enfocadas en el manejo y aprovechamiento de residuos de cosecha. Adicionalmente, se revisaron fuentes bibliográficas especializadas para recopilar información secundaria sobre las características fisicoquímicas de los residuos agrícolas evaluados. Los resultados mostraron que cultivos como la papa y la cebolla en rama generan un porcentaje significativo de biomasa residual con potencial energético aprovechable. Se concluye que estos residuos podrían ser una alternativa viable para la generación de energía térmica en fincas de la zona, contribuyendo así a reducir el impacto ambiental y el fortalecimiento de prácticas productivas sostenibles.

Palabras clave: Biomasa residual agrícola, energía renovable, páramo de Santurbán, potencial energético, aprovechamiento sostenible.

Abstract

The moorlands, crucial ecosystems for their biodiversity and water contribution to communities, face risks that threaten their equilibrium and affect those who depend on them due to overexploitation caused by the use of fossil fuels and the felling of trees for heat energy. The objective of this research was to evaluate the supply of agricultural residual biomass with potential for use as a renewable energy source, originating from crops located in páramos areas of the municipalities of Tona (Santander), Silos, and Pamplona (Norte de Santander). To this end, a mixed approach was employed that combined the analysis of secondary sources, using data from the Rural Agricultural Planning Information System (SIPRA) for crop selection, with primary information collected through surveys administered to local producers, within the framework of the project "Development of a computational methodological tool and renewable energy technologies for the energy transition in high-mountain areas under post-pandemic conditions," focusing on the management and utilization of crop residues. Additionally, specialized bibliographic sources were reviewed to gather secondary information on the physicochemical characteristics of the agricultural residues evaluated. The results showed that crops such as potato and onion on branch generate a significant percentage of residual biomass with usable energy potential. The conclusion is that these residues could be a viable alternative for generating thermal energy on farms in the area, thus contributing to reducing environmental impact and strengthening sustainable production practices.

Keywords: Agricultural residual biomass, renewable energy, Santurbán moorland, energy potential, sustainable use.

Contenido

Introducción	12
Justificación	14
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
Marco Teórico	17
Biomasa Residual Agrícola	17
Energía a partir de Biomasa	17
Potencial Energético + Valores frente a la Biomasa Agrícola	17
Poder Calorífico Inferior (PCI)	18
Factor Residuo (FR)	18
Humedad (M)	18
Contenido de Cenizas (Cz)	19
Contenido de Material Volátil (MV)	19
Contenido de Carbono Fijo (FC)	19
Materia Seca	19
Estado del Arte	21
Metodología	26
Diseño Metodológico	26

Fuentes de Información.....	26
<i>Fuentes Secundarias</i>	26
<i>Fuentes Primarias</i>	27
Etapas Metodológicas.....	28
<i>Selección de Cultivos</i>	28
<i>Determinación de la Biomasa Residual</i>	29
<i>Caracterización de la Biomasa Residual Agrícola</i>	29
Limitaciones Metodológicas.....	31
Resultados.....	32
Selección de Cultivos.....	32
<i>Municipio de Tona</i>	32
<i>Municipio de Silos</i>	33
<i>Municipio de Pamplona</i>	34
Determinación de la Biomasa Residual.....	35
<i>Municipio de Tona</i>	36
<i>Municipio de Silos</i>	38
Caracterización de la Biomasa Residual Agrícola.....	41
Análisis.....	46
Identificación de Cultivos con Mayor Potencial Energético.....	46
Cuantificación y Aprovechamiento de Residuos.....	47

Propiedades Fisicoquímicas de la Biomasa Residual Agrícola.....	48
Conclusiones.....	50
Recomendaciones	52
Referencias bibliográficas.....	53
Apéndices.....	60
Apéndice A <i>Encuesta aplicada</i>	60

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 – Revisión sistemática	30
Figura 2. Producción Agrícola (t) en Tona tomada del SIPRA.....	33
Figura 3. Producción Agrícola (t) en Silos tomada del SIPRA	34
Figura 4. Producción Agrícola (t) en Pamplona tomada del SIPRA	35
Figura 5. Actividades productivas en Tona.....	36
Figura 6. Producción agrícola en Tona	37
Figura 7. Residuos de cosecha no cuantificados y acopiados en Tona	37
Figura 8. Forma de aprovechamiento del residuo de cosecha en Tona	38
Figura 9. Actividades productivas en Silos.....	39
Figura 10. Producción agrícola en Silos	39
Figura 11. Residuos de cosecha no cuantificados y acopiados en Silos	40
Figura 12. Forma de aprovechamiento del residuo de cosecha en Silos	40
Figura 13. Promedio características recopiladas de variedades o biomasa residual agrícola.....	43

Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen de las características de la biomasa residual agrícola según tipo de residuo recopiladas de diferentes autores.	41
Tabla 2 Resumen de las características de la biomasa residual agrícola en general o según variedades específicas recopiladas de diferentes autores.....	42
Tabla 3 Resumen comparativo entre municipio y cultivo.....	45

Introducción

La búsqueda de alternativas energéticas sostenibles es crucial en un mundo cada vez más impactado por el cambio climático y la degradación ambiental. Según Baca-G. (2014), ecosistemas vulnerables como los páramos enfrentan una presión considerable debido al uso de combustibles fósiles y la quema de leña extraída mediante tala para generación de energía, práctica que, aunque ha disminuido con la llegada del gas, aún persiste para consumo y venta local. Por lo tanto, las energías renovables surgen como una alternativa viable, ya que se obtienen de recursos naturales capaces de regenerarse constantemente, presentando una tasa de recuperación superior a la de su extracción (Urbano et al., 2023).

En el Páramo de Santurbán, que abarca los municipios de Tona, Silos y Pamplona, surge una oportunidad de aprovechamiento energético a partir de la biomasa residual agrícola. Estos recursos biomásicos se generan de los residuos producidos durante las temporadas de cosecha, constituyendo una de las principales fuentes renovables con alto potencial energético (Huaytalla, 2019). Sin embargo, su utilización y la implementación de tecnologías adecuadas se ven limitadas por la falta de información sobre su cantidad y calidad.

Para aprovechar esta energía de manera efectiva, Pérez-Rodríguez et al. (2022) señalan que es fundamental cuantificar y caracterizar los recursos disponibles, dado que la evaluación del potencial energético de la biomasa constituye el primer paso hacia un desarrollo eficiente. Por lo tanto, en esta investigación se evaluó la oferta de biomasa residual agrícola con potencial para ser empleada como fuente de energía renovable en los municipios de Tona, Silos y Pamplona, centrándose en los cultivos de las zonas más altas y frías que generan la mayor cantidad de residuos.

La investigación inició con el análisis de información secundaria, obtenida del Sistema de Información de Planificación Agropecuaria Rural (SIPRA), que permitió seleccionar los cultivos más relevantes en la zona. Posteriormente, a partir de los datos recopilados de las encuestas realizadas a la población local durante las etapas previas al proyecto, se cuantificó los residuos de cosecha de estos cultivos, detallando su manejo y las formas en que pueden ser aprovechados, complementando esta información de caracterización con consultas en diversas bases de datos científicas de la universidad. Finalmente, los resultados de este estudio proporcionaron una fuente de datos en la que, para cada cultivo identificado, se estableció su producción en toneladas y se determinó la cantidad y características de la biomasa residual agrícola disponible para su aprovechamiento energético, sirviendo como base para eventuales aplicaciones energéticas en el aprovechamiento de este recurso.

Justificación

De acuerdo con el Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) et al. (2009), el uso de combustibles fósiles como el gas y de leña para la cocción de alimentos y la calefacción en zonas de páramo genera un impacto ambiental considerable, en tanto la extracción continua y descontrolada de madera excede la capacidad de regeneración de estos ecosistemas. Esta situación evidencia la necesidad de investigar fuentes de energía alternativas que favorezcan la conservación de estos ecosistemas. En este escenario, la biomasa agrícola procedente de residuos de cultivos en el Páramo de Santurbán se perfila como una prometedora fuente de bioenergía.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la biomasa residual agrícola con potencial energético en cultivos de páramo en los municipios de Tona (Santander), Silos y Pamplona (Norte de Santander). Para ello, se identificaron los cultivos con mayor producción en la zona y se determinó la cantidad de biomasa residual de cosecha generada y disponible, y se analizaron características fisicoquímicas clave para su aprovechamiento energético. A su vez, se buscó apoyar la transición hacia prácticas energéticas más sostenibles, ofreciendo una alternativa más limpia que mejore la calidad de vida de los habitantes, reduzca la presión sobre los recursos forestales y disminuya las emisiones de gases contaminantes.

Esta investigación contribuirá a la preservación del páramo de Santurbán promoviendo su sostenibilidad ambiental y fortaleciendo sus servicios ecosistémicos, esenciales tanto a nivel regional como global. Además, promoverá nuevas formas de aprovechar los recursos naturales mediante el uso de biomasa de residuos agrícolas como fuente de energía. Sus beneficios incluyen la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, la gestión eficiente de residuos y la conservación de los recursos naturales al evitar la quema de leña y combustibles

fósiles. Asimismo, establecerá un precedente valioso para futuras investigaciones y proyectos en regiones con desafíos similares, abriendo el camino a nuevas alternativas energéticas que beneficiarían tanto al medio ambiente como a las comunidades.

Por estas razones, surge la necesidad de responder al siguiente interrogante que orienta esta investigación:

¿Qué cultivos predominantes en los municipios de Tona, Silos y Pamplona generan biomasa residual agrícola con características fisicoquímicas adecuadas para ser aprovechada como fuente de energía renovable en el área de influencia del páramo de Santurbán?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la oferta de biomasa residual agrícola generada por los cultivos predominantes en los municipios de Tona (Santander), Silos y Pamplona (Norte de Santander) para su aprovechamiento como fuente de energía renovable en el área de influencia del páramo de Santurbán.

Objetivos Específicos

Identificar los cultivos predominantes en la zona de estudio.

Determinar la cantidad y características fisicoquímicas de la biomasa residual agrícola generada a partir de los cultivos más predominantes con potencial energético.

Marco Teórico

Biomasa Residual Agrícola

Mejía & Rondón (2013), definen la biomasa residual agrícola como la materia orgánica generada a partir de los desechos producidos durante las actividades agrícolas, tales como la cosecha y el procesamiento de cultivos. A partir de esta definición, se reconoce que estos residuos se clasifican en dos tipos, residuos agrícolas de cosechas (RAC) que incluyen los restos como tallos, hojas y raíces que quedan en el campo tras la recolección, y residuos agrícolas de procesamiento industrial (RAI) que corresponden a los subproductos generados durante la transformación agroindustrial de los cultivos, como cáscaras, bagazo y pulpa (Agudelo, 2014).

Energía a partir de Biomasa

Según Oviedo et al. (2015), la biomasa representa una forma de energía solar capturada y transformada en enlaces químicos mediante el proceso de fotosíntesis. En dicho proceso, las plantas emplean el dióxido de carbono (CO_2) del aire para transformar la luz en sustancias orgánicas mediante reacciones químicas. Así, la energía lumínica del sol se convierte en energía química, que se almacena como materia orgánica y puede ser aprovechada posteriormente a través de la combustión o la conversión térmica (Quintero & Quiroga, 2017).

Potencial Energético + Valores frente a la Biomasa Agrícola.

De acuerdo con Llamuca (2021), el potencial energético se conceptualiza como la capacidad que tiene la biomasa para generar energía y, a nivel de biomasa residual agrícola, este se determina por la cantidad producida por hectárea de cultivo, así como por su poder calorífico, en este caso el de los cultivos de papa, cebolla junca y fresa.

La estimación del potencial energético se basa en primer lugar en cuantificar el volumen de biomasa generada a partir de cada plantación en función de la superficie cultivada y el poder calorífico de esa biomasa residual. Para obtener la biomasa hay que tener en cuenta la superficie de terreno cultivado, el número de plantas que caben en esa superficie y, por último, el peso de las plantas una vez cosechadas o en los procesos de poda (Pérez & López, 2021).

Poder Calorífico Inferior (PCI)

El poder calorífico inferior (PCI) es una variable clave utilizada para estimar la cantidad de energía liberada durante los procesos de combustión de una materia específica, proporcionando una estimación del calor disponible para ser aprovechado (Escalante et al., 2010).

Factor Residuo (FR)

El factor de residuo (FR), denominado también índice de residuo en la literatura, es la relación entre las cantidades de residuos generados y de producto principal obtenido en la cosecha, reflejando la proporción de desechos producidos (Quintero & Quiroga, 2017).

Al igual que el poder calorífico inferior (PCI) y el factor de residuo (FR), otras características como el contenido de humedad (M), las cenizas (A), el material volátil (MV) y el carbono fijo (FC) son elementos clave para evaluar la eficiencia de un residuo agrícola debido a que son componentes que influyen en el potencial energético (Palacios Vallejos et al., 2020).

Humedad (M)

Se refiere a la cantidad de agua presente en una muestra de materia y generalmente, se expresa como la relación entre las masas de agua y de materia seca; el contenido de humedad de la biomasa influye significativamente en su conversión energética (Escalante et al., 2010). Según

López (2021), cuanto más bajo sea el contenido de humedad de la biomasa residual agrícola, mayor será su poder calorífico y, por lo tanto, más eficiente será su proceso de combustión.

Contenido de Cenizas (Cz)

Según Escalante et al., (2010), las cenizas representan la porción de materia sólida no combustible en un material. El poder calorífico de un material disminuye a medida que aumenta su contenido de cenizas; por lo tanto, un alto nivel de cenizas en un residuo biológico puede ser perjudicial para su aprovechamiento energético mediante métodos térmicos, ya que reduce su capacidad calorífica. En consecuencia, una cantidad inferior de contenido de cenizas indica una mayor calidad de la biomasa utilizada.

Contenido de Material Volátil (MV)

Escalante et al., (2010), indican que el material volátil está formado por mezclas de carbono, hidrógeno y otros elementos. Por su parte, López (2021), destacan que un mayor contenido de volátiles se expresa en un incremento de la velocidad de combustión, lo que favorece un aprovechamiento energético más eficiente de la biomasa.

Contenido de Carbono Fijo (FC)

El término "carbono fijo" se refiere a la materia combustible presente en la biomasa. Un contenido bajo de carbono fijo resulta ventajoso, ya que el objetivo es minimizar la fracción de residuo sólido (materia no volatilizada) que queda tras analizar el contenido de material volátil (Pérez & López, 2021).

Materia Seca

La materia seca se define como la porción resultante de la biomasa residual agrícola una vez que se ha eliminado el contenido de humedad. Escalante et al., (2010), menciona que la

mayoría de los modelos matemáticos que evalúan el potencial energético de la biomasa se basan en que la energía contenida en su materia es proporcional a su masa seca. Esta afirmación indica que la calidad y cantidad de energía que puede obtenerse de la biomasa residual agrícola depende de la cantidad de materia seca que contenga; cuanto mayor sea la cantidad de materia seca, mayor será la energía disponible para su uso.

Estado del Arte

La evaluación del potencial energético de la biomasa residual agrícola ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones, resaltando sus características fisicoquímicas e importancia en regiones con producción agropecuaria. En este contexto, se han presentado investigaciones relevantes que sirven como referencia para el presente estudio.

El artículo de Jekayinfa et al.,(2020) proporciono una visión integral de las fuentes disponibles de biomasa en Nigeria, incluyendo residuos agrícolas, forestales y desechos orgánicos urbanos, y para ello analiza diversas características, como el factor de residuo, el contenido de cenizas, los compuestos volátiles, el carbono fijo y el poder calorífico inferior de residuos como la cáscara de papa. Aunque este estudio no fue desarrollado en ecosistemas de páramo ni en zonas altoandinas como las presentes en Colombia, sus resultados sirven como referencia útil para el análisis de residuos generados por el cultivo de papa, particularmente en lo que respecta a su aprovechamiento energético.

La investigación de López (2021) titulada “Evaluación de la biomasa residual agrícola de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*) y tomate de árbol (*Solanum betaceum*) como recurso energético renovable en la provincia de Tungurahua”, examina el potencial energético de estos tres cultivos en dicha provincia ecuatoriana. El estudio detalla las características de la biomasa residual generada y su posible uso como fuente de energía renovable, subrayando la relevancia de diversificar y optimizar su aprovechamiento para fomentar el desarrollo sostenible en la región.

El proyecto de investigación de Llamuca (2021) evalúa la biomasa de los desechos agrícolas del cultivo de papa como fuente potencial de energía, analizando tanto la cantidad

como las características fisicoquímicas de estos desechos. Entre los análisis realizados se incluyen el análisis proximal, que contempla factores como contenido de volátiles, humedad y cenizas. Los resultados obtenidos en cuanto al poder calorífico y el porcentaje de biomasa expresan que los residuos agrícolas del cultivo de papa tienen un potencial energético significativo, lo que los posiciona como una fuente viable de energía renovable.

En su trabajo de investigación, Torres (2021) ofreció un análisis detallado sobre el aprovechamiento de la biomasa residual de la papa, un cultivo clave en Boyacá, mediante la estructuración operativa de una planta para su valorización, analizando la caracterización de biomasa residual de variedades como Parda Pastusa, Superior Pastusa, Huila, Tocarreña, Ica y Rubí, identificando sus propiedades fisicoquímicas y destacando la viabilidad de su valorización como una alternativa sostenible para la producción de energía.

El artículo de Oñate & Lemos (2022) aportó información valiosa sobre las propiedades de diferentes variedades de papa nativa cultivadas en la Región del Pantano de Arce (Subachoque, Cundinamarca), incluyendo análisis fisicoquímicos respecto a la cantidad de materia seca, humedad y azúcares reductores; los análisis realizados son fundamentales para evaluar el potencial energético de las variedades estudiadas, permitiendo una mejor comprensión de su viabilidad como recurso energético.

En la tesis de Piarpuezán Enríquez (2023) se explora el proceso de fabricación de briquetas a partir de los tallos de papa, un residuo común en la producción agrícola. El estudio detalla el método de obtención de las briquetas y los análisis realizados para evaluar sus propiedades, tales como el poder calorífico, contenido de compuestos volátiles, humedad y materia seca.

El trabajo de grado de García Del Rey Martín (2023) se enfoca en la valorización de residuos orgánicos dentro del marco de la economía circular, evaluando características como la humedad, el factor de residuo y el poder calorífico de distintos tipos de desechos orgánicos generados en Tenerife, incluyendo los residuos de papa, y propone estrategias para su aprovechamiento eficiente.

Talero Cabrejo & Salcedo Silva (2020) mencionan que a nivel nacional en Colombia, la cebolla en rama o conocida comúnmente como cebolla larga se produce principalmente en las regiones de Boyacá, Nariño, Santander y Norte de Santander, siendo Boyacá el primer departamento con mayor producción y su mayor área de cultivo se encuentra en la cuenca del Lago de Tota que está circundada en su parte más alta por el complejo de páramos Tota, Mamapacha y Bijagual y que abarca el 86% del territorio, el cual produce cerca de 2.500 hectáreas de cebolla de rama y se encuentra ubicado en los municipios de Sogamoso, Aquitania, Tota y Cúitiva.

En el caso de la región de los Santanderes, según Oviedo et al. (2017), una de las zonas de cultivo de la cebolla en rama es el Páramo de Berlín, que forma parte del macizo montañoso del páramo de Santurbán, donde se cultivan alrededor de 610 hectáreas y es catalogado como una de las especies agrícolas más importantes para la economía y el sustento de más de 670 familias. Por su parte, Cuadros & Sanabria (2018), mencionan que el corregimiento de Berlín se enfoca en el sector primario a través de la actividad económica más activa que es el cultivo de cebolla en rama, siendo el motor que impulsa a sus habitantes a seguir cultivándola, ya que la zona presenta las condiciones necesarias para que el cultivo sea productivo. En este contexto, se presentan a continuación diversas investigaciones que se han realizado sobre las características de la biomasa residual de este cultivo, así como de la papa y la fresa.

Mejía & Rondón (2013) en su trabajo de grado sobre la caracterización fisicoquímica de la biomasa agrícola en Santander, destacan las características y el contenido energético de cultivos como cebolla en rama y papa, ofreciendo datos clave para evaluar su uso como fuente de energía.

En la monografía de grado de Quintero & Quiroga (2017) se analizan características como el factor de residuo y el poder calorífico inferior para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola primaria en el departamento de Cundinamarca, incluyendo cultivos como la papa, papa criolla, cebolla en rama y fresa, también mencionan que cultivos como la fresa tienen un poder calorífico muy bajo y que, para que represente un potencial energético, se necesita un gran volumen de biomasa producida por el proceso de cosecha.

El artículo de Guzmán-Bello et al. (2023), analiza el potencial de los residuos agrícolas en República Dominicana, identificando las principales fuentes de biomasa del país y evaluando características claves de los cultivos de cebolla y papa como el contenido de materia seca y el factor residuo, lo que permite determinar su potencial energético para la generación de energía sostenible.

La información presentada en la tesis de Rodríguez (2023) sobre la evaluación de escenarios de aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola en Santander, proporciona un marco valioso para analizar las características de la biomasa residual agrícola de cultivos como la cebolla en rama y la papa, en el área de influencia del páramo de Santurbán.

En conjunto, estas investigaciones fueron un referente para poder identificar y analizar las características fisicoquímicas específicas de aprovechamiento de biomasa residual agrícola en

los municipios de Tona, Silos y Pamplona, contribuyendo así al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles en la región.

Metodología

La presente metodología fue diseñada con el propósito de responder a la pregunta de investigación que orienta este estudio, la cual busca identificar los cultivos predominantes que generan biomasa residual agrícola con características fisicoquímicas adecuadas para su aprovechamiento como fuente de energía renovable en el área de influencia del páramo de Santurbán.

Este proyecto de investigación se desarrolló a partir de fuentes primarias y secundarias, mediante un enfoque metodológico mixto, integrando elementos cuantitativos y cualitativos con el propósito de obtener una comprensión integral de la disponibilidad, caracterización y aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola con potencial de uso como fuente de energía renovable en los municipios de Tona, Silos y Pamplona, en el área de influencia del páramo de Santurbán.

Diseño Metodológico

Se tomó la combinación de análisis documental y la recolección de información primaria con el propósito de fortalecer la validez de los resultados mediante la triangulación de fuentes, siendo un diseño no experimental de tipo descriptivo.

Fuentes de Información

Fuentes Secundarias

Se tomó información técnica y científica a partir del El Sistema Integrado de Información para la Planificación Rural agropecuaria (SIPRA), para identificar los cultivos predominantes en la zona de estudio y su nivel de producción entre los años 2017 y 2021. Los datos obtenidos fueron tratados estadísticamente mediante su sistematización en Excel.

Literatura académica especializada, como artículos científicos indexados, tesis de grado y estudios técnicos publicados en los años 2010 al 2023. Las bases de datos utilizadas fueron: Science Direct, Redalyc, Scielo, Google Scholar y Dialnet. Se establecieron criterios de búsqueda mediante palabras clave relacionadas con la problemática, los objetivos de la investigación y los cultivos principales identificados, enfocándose en el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola, el potencial energético, el poder calorífico inferior, el factor residuo-producto, el contenido de humedad, así como la caracterización fisicoquímica y el análisis proximal, que incluye cenizas, material volátil y carbono fijo. Se encontraron 51 artículos, de los cuales se seleccionaron 13.

Los criterios de inclusión que fueron aplicados son: la actualidad con preferencia de fuentes de menos de 5 años de antigüedad. La pertinencia temática, con la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola, y la confiabilidad con el uso de autores con respaldo institucional.

Durante el proceso de selección de los artículos, se aplicaron criterios de exclusión con el propósito de garantizar la pertinencia y calidad de los estudios analizados. Se descartaron artículos duplicados, así como aquellos que no abordaban directamente el tema de investigación o carecían de datos técnicos relevantes sobre caracterización de la biomasa residual. También se excluyeron publicaciones sin acceso al texto completo y documentos que no cumplieran con el carácter científico requerido.

Fuentes Primarias

Se utilizaron los datos obtenidos a partir de encuestas estructuradas que fueron realizadas previamente en el año 2022 a 28 productores agrícolas de los municipios de Tona y Silos, en el

marco del proyecto “*Desarrollo de una herramienta metodológica computacional y tecnologías de energías renovables para la transición energética en zonas de alta montaña en condiciones de post-pandemia*”. Es importante destacar que los datos obtenidos a través de las encuestas no fueron recolectados directamente por el autor de este trabajo, sino que corresponden al proceso de sistematización realizado durante el desarrollo del proyecto mencionado y al tratarse de información sensible se contó con el debido consentimiento informado para su uso. La distribución fue equitativa, con 14 encuestas por municipio. Pamplona no fue incluido en la aplicación de encuestas, lo cual se reconoce como una limitación del estudio.

La encuesta fue estructurada con preguntas abiertas y cerradas, como se muestra en el Apéndice A, abordando información referente a prácticas productivas, cantidad y tipo de residuos generados, destino y forma de manejo de los residuos de cosecha (biomasa residual).

El análisis estadístico de la información obtenida se llevó a cabo mediante la digitalización de los formularios recolectados y su sistematización en una hoja de cálculo de Excel. Posteriormente, se aplicó un análisis descriptivo de frecuencias absolutas y relativas, con el propósito de calcular los porcentajes correspondientes a cada categoría de respuesta.

Etapas Metodológicas

Las etapas metodológicas incluirán la selección de cultivos, determinación de la biomasa residual y la caracterización de la biomasa residual agrícola.

Selección de Cultivos

Se determinaron los cultivos predominantes a partir de la información secundaria recopilada a través del Sistema Integrado de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA) entre 2017 y 2021 en los municipios de Tona (Santander), Silos y

Pamplona (Norte de Santander), con énfasis en aquellos de mayor producción anual y ubicados en las zonas de mayor altitud propias del ecosistema de páramo de la zona de estudio (2.800 m.s.n.m.).

Determinación de la Biomasa Residual

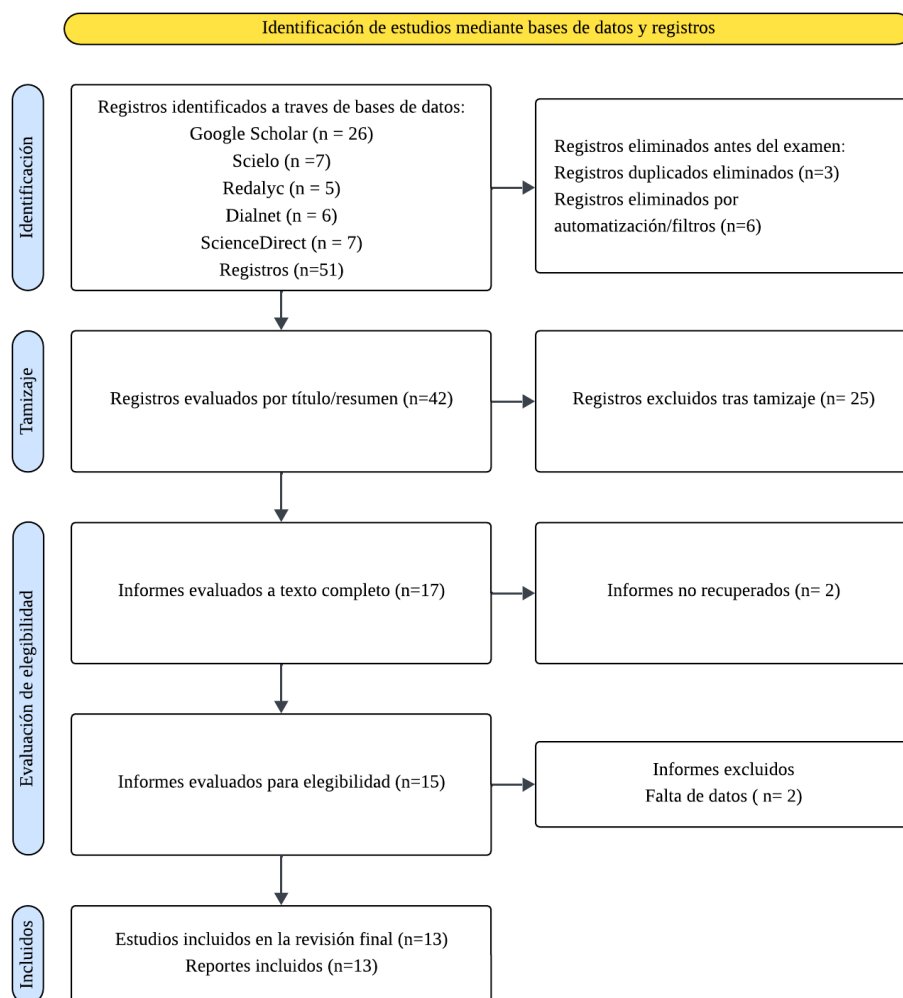
Se estimó la biomasa residual disponible con base en las encuestas realizadas previamente a este proyecto y la información documentada en literatura especializada. Se estimaron porcentajes de cuantificación y aprovechamiento de acuerdo con el municipio y el cultivo.

Caracterización de la Biomasa Residual Agrícola

Se realizó una revisión sistemática de la literatura especializada (Figura 1), con énfasis en las propiedades fisicoquímicas para la evaluación energética de la biomasa residual agrícola, como lo son: el potencial energético, el poder calorífico inferior, el factor residuo-producto, el contenido de humedad, las cenizas, la materia volátil y el carbono fijo.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020 – Revisión sistemática



Fuente. Autoría propia

La información se recopiló y fue sintetizada y comparada en tablas con fuentes consultadas de cultivos comunes (especialmente para papa y cebolla en rama). Para los datos con rangos variados se consideraron valores promedios para análisis comparativo.

Limitaciones Metodológicas

Dentro de la metodología se presentaron limitaciones como la ausencia de datos primarios para el municipio de Pamplona, debido a que no se realizó recolección directa de encuestas en esta zona, por lo tanto, su análisis se sustentó únicamente en información secundaria. También, algunas características fisicoquímicas de la biomasa no están disponibles para todos los cultivos y variedades.

Resultados

Los resultados obtenidos se derivan del análisis de información secundaria, proveniente del Sistema de Información de Planificación Agropecuaria Rural (SIPRA), y de datos primarios recolectados mediante encuestas aplicadas a productores de la zona. Esta información está relacionada con la producción agrícola, la generación de residuos de cosecha y su aprovechamiento actual en los municipios de Tona, Silos y Pamplona, lo que permitió identificar los cultivos con mayor generación de biomasa residual agrícola y las prácticas asociadas a su manejo.

Selección de Cultivos

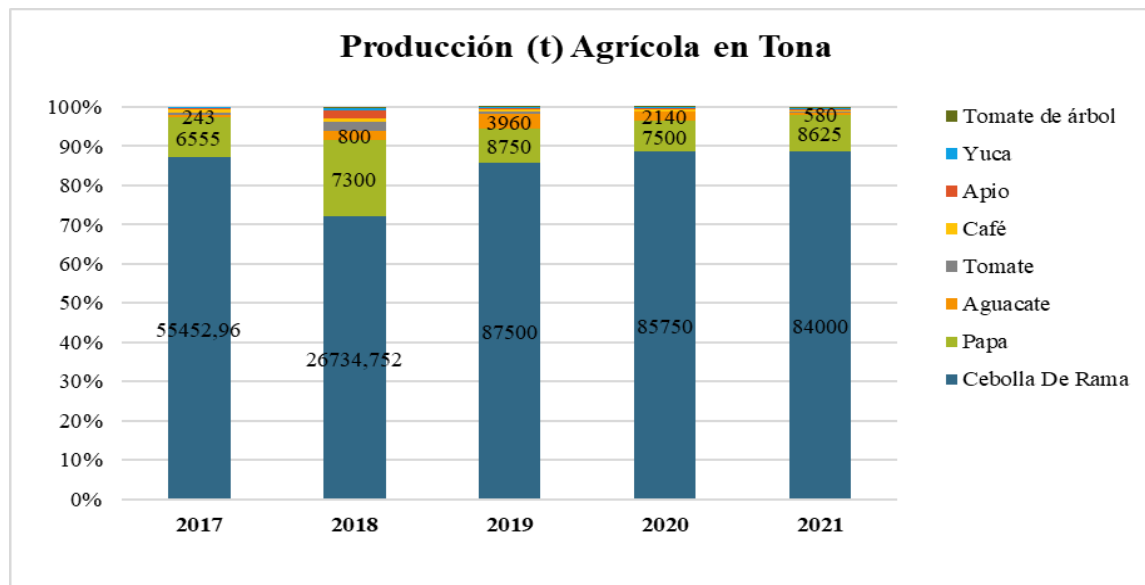
Teniendo en cuenta el área de estudio, se realizó una revisión de la producción en toneladas por cultivo según información obtenida del SIPRA entre los años 2017 y 2021. Los cultivos de mayor producción identificados fueron la papa y la cebolla en rama, seguidos por la fresa, con diferencias de producción según el municipio.

Municipio de Tona

En Tona (Figura 2), los cultivos con mayor producción fueron, en primer lugar, la cebolla en rama, seguida de la papa y el aguacate. También se observa que, en los últimos años, la cebolla en rama ha aumentado y mantenido su producción, alcanzando un valor máximo de 87.500 toneladas en 2019. Información que fue validada mediante las encuestas aplicadas, donde el 64% de la producción agrícola registrada correspondía a cebolla en rama, y un 50% a papa. La fresa, la papa criolla y otros cultivos arrojaron porcentajes menores.

Figura 2

Producción Agrícola (t) en Tona tomada del SIPRA



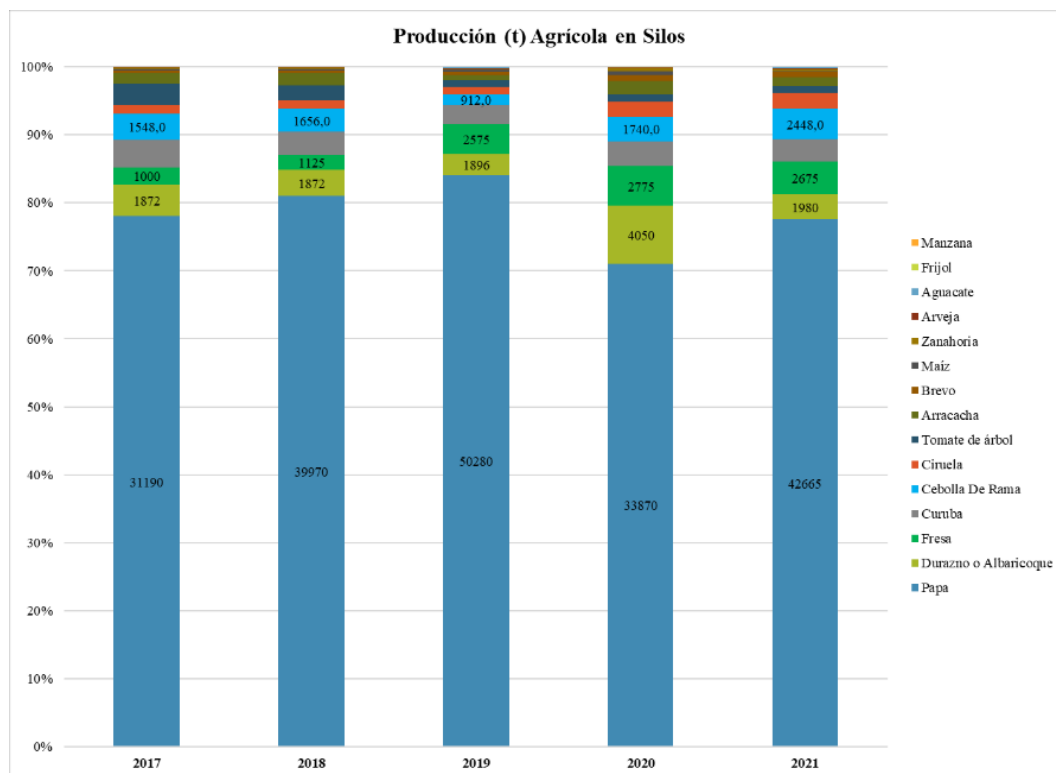
Fuente. Datos tomados del del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA).

Municipio de Silos

En Silos (Figura 3), los cultivos con mayor producción fueron, la papa, seguida del durazno o albaricoque, la fresa, la curuba y la cebolla en rama. Además, se aprecia que, en los últimos años, la producción de fresa y cebolla en rama ha aumentado, alcanzando un valor máximo de 2.775 toneladas en 2020 y 2.448 en 2021, respectivamente. Por otra parte, las encuestas revelaron que tanto la papa como la cebolla en rama y la fresa representaban un 36% de la producción agrícola, siendo los dos primeros los más relevantes en términos de generación de residuos.

Figura 3

Producción Agrícola (t) en Silos tomada del SIPRA



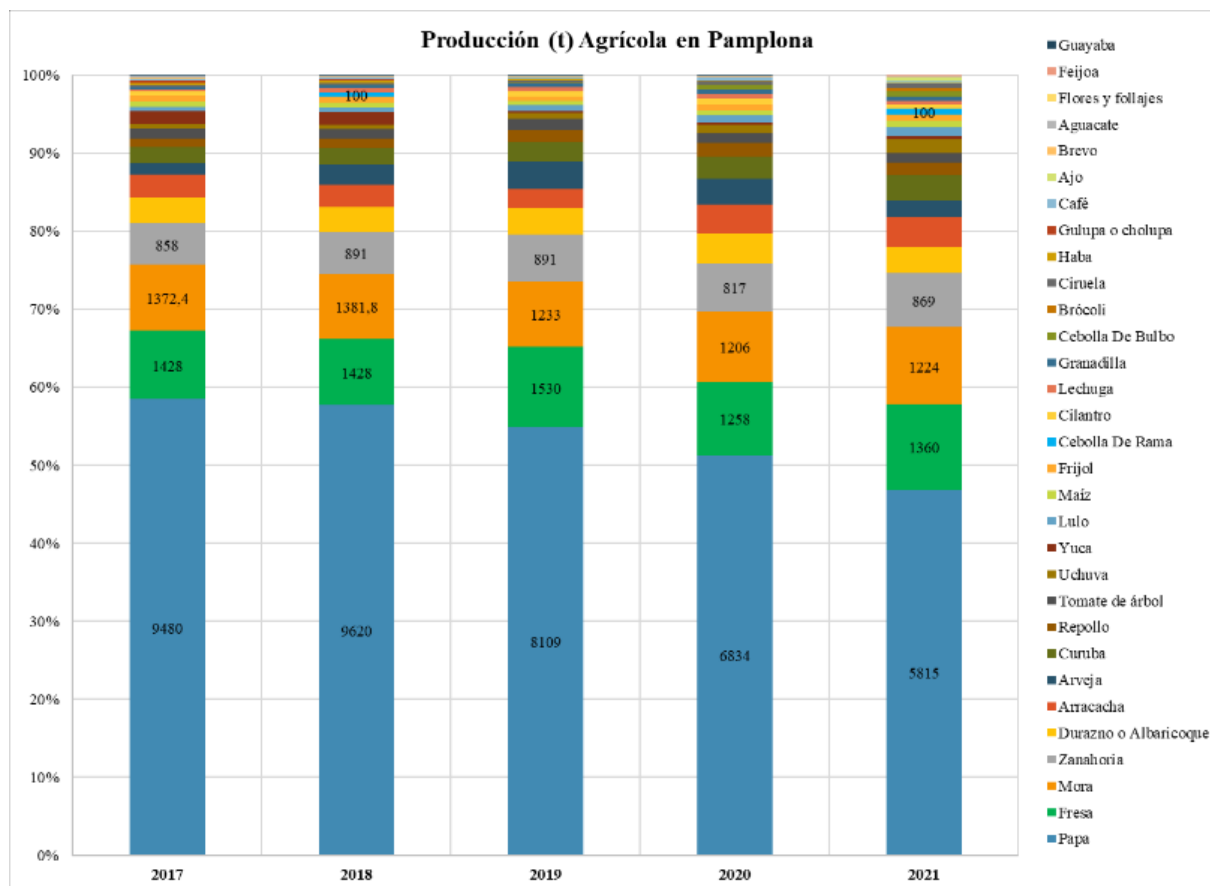
Fuente. Datos tomados del del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA).

Municipio de Pamplona

Pamplona (Figura 4), presentó con el cultivo de papa un valor máximo de producción de 9.620 toneladas en 2018, seguida de la fresa, la mora y la zanahoria. También se observa que, en el 2021 la cebolla en rama incursiona en la producción agrícola con 100 toneladas, ya que no registra informes de producción para los años 2017, 2019 y 2020. Considerando que en el municipio no se aplicaron encuestas, su análisis se basa exclusivamente de datos secundarios.

Figura 4

Producción Agrícola (t) en Pamplona tomada del SIPRA



Fuente. Datos tomados del del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA).

Determinación de la Biomasa Residual

A partir de los datos obtenidos de las encuestas realizadas en Tona y Silos (2022), se analizó la generación y manejo de la biomasa residual agrícola. Identificando prácticas limitadas de cuantificación y acopio, lo que refleja una subutilización de los residuos agrícolas con potencial energético.

Municipio de Tona

De las diversas actividades productivas desarrolladas en Tona (Figura 5), el 93% corresponde a la producción agropecuaria, lo que significa que se produce principalmente productos agrícolas y pecuarios de manera conjunta.

Los cultivos más comunes son la cebolla en rama, la papa y la papa criolla (Figura 6). Se evidenció que no existe cuantificación ni acopio del 100% de los residuos de fresa y de papa criolla (Figura 7). En el caso de la cebolla en rama, el 22% de los residuos se destinan a compostaje y el 78% se desechan en potreros. En cuanto a la papa, el 43% se usa en alimentación animal y el 57% se desecha (Figura 8).

Figura 5

Actividades productivas en Tona

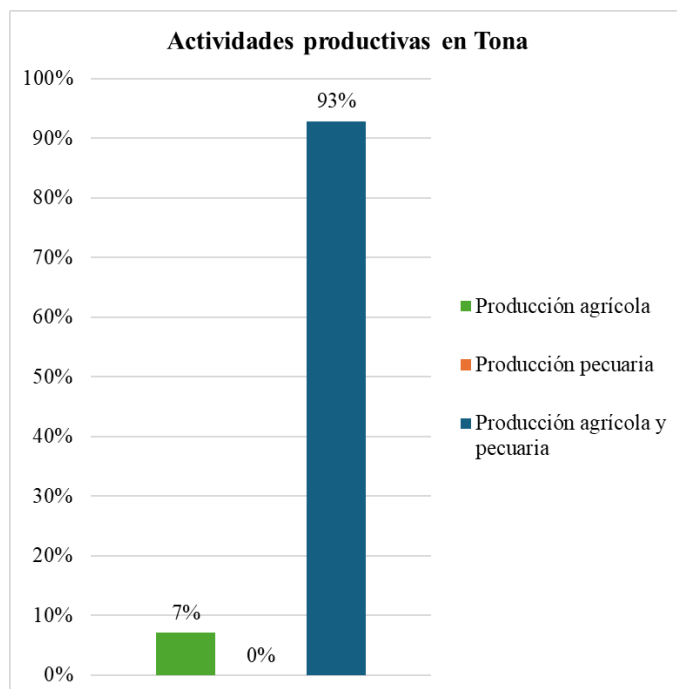


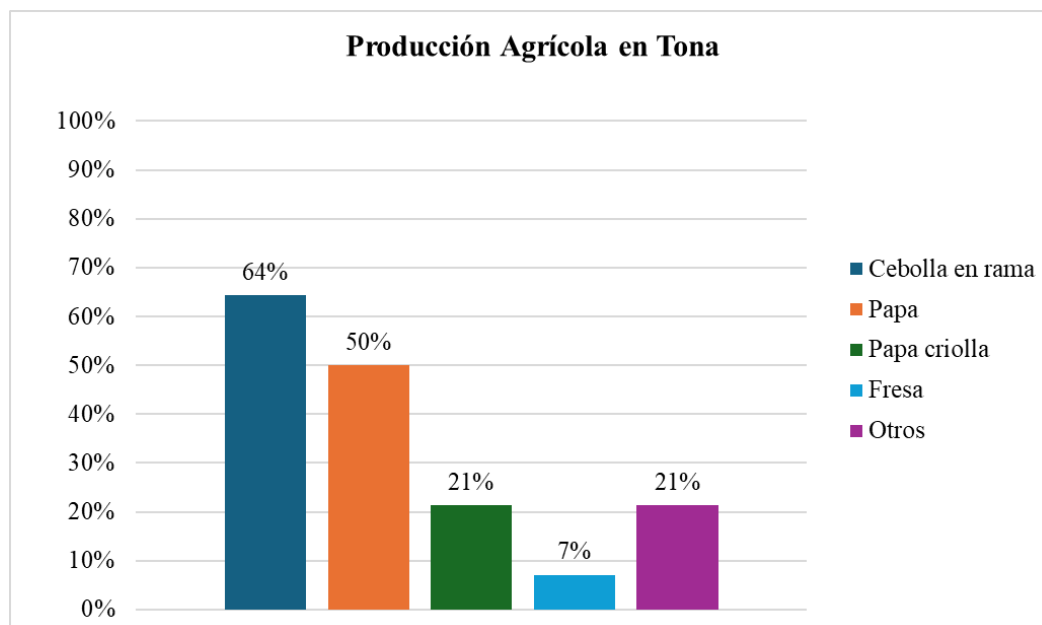
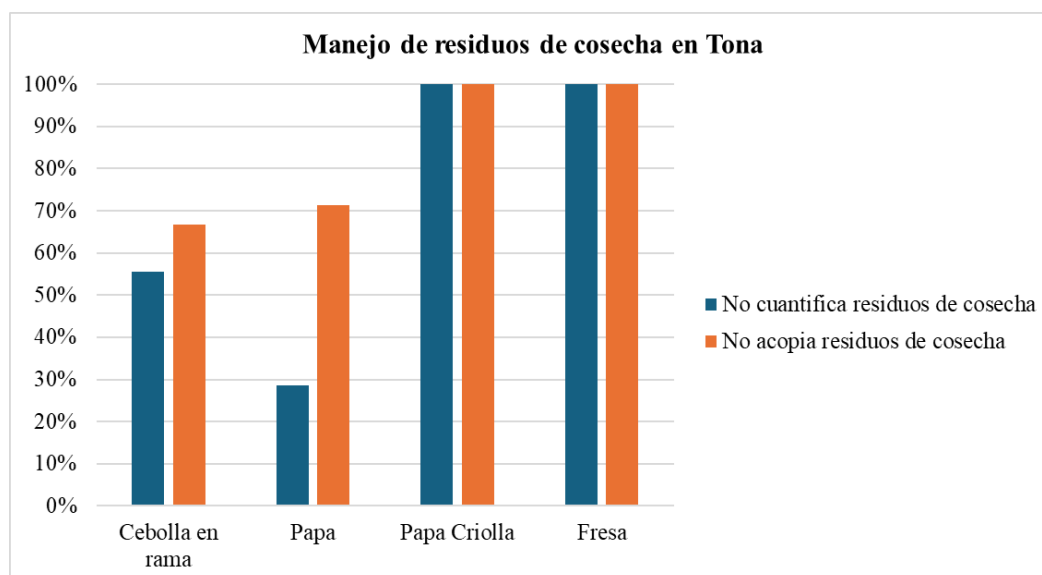
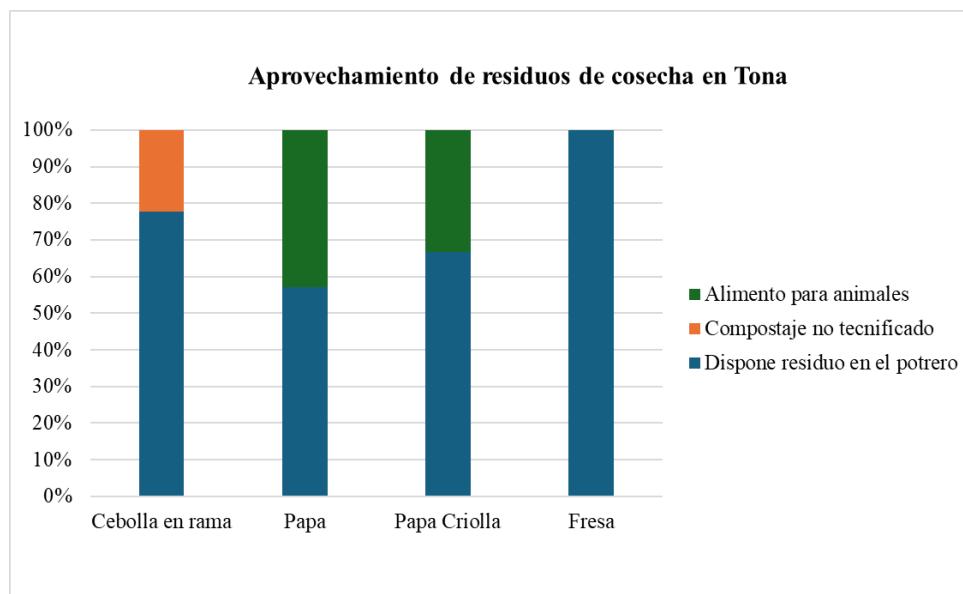
Figura 6*Producción agrícola en Tona***Figura 7***Residuos de cosecha no cuantificados y acopiados en Tona*

Figura 8

Forma de aprovechamiento del residuo de cosecha en Tona



Nota. Las Figuras 5 al 8 es el resultado estadístico de las encuestas realizadas. Tomado del proyecto “Desarrollo de una herramienta metodológica computacional y tecnologías de energías renovables para la transición energética en zonas de alta montaña en condiciones de post-pandemia” y del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA).

Municipio de Silos

La producción agropecuaria representa el 57% de las actividades en Silos y el 29% de la producción agrícola (Figura 9).

Los cultivos más representativos son la papa, fresa, cebolla en rama y papa criolla (Figura 10). Se observó que el 100% de los residuos de cebolla en rama no se cuantifican ni se acopian, se disponen directamente en potreros (Figura 11). La papa presenta un mayor aprovechamiento, ya que el 40% se usa como alimento animal, el 60% se desecha (Figura 12). En el caso del cultivo de fresa, se muestra un mayor aprovechamiento en comparación con el municipio de Tona, con el 60% destinado a alimentación animal y un 40% se desecha.

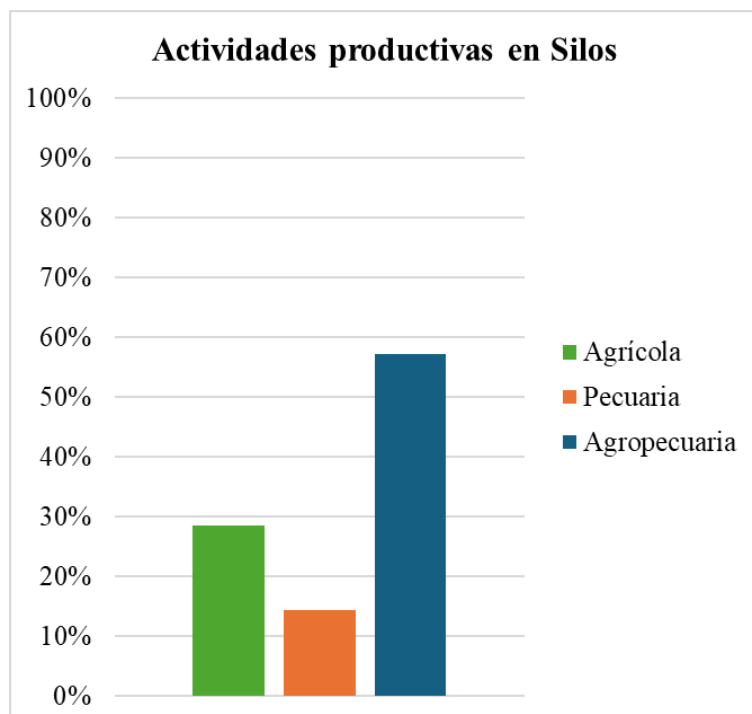
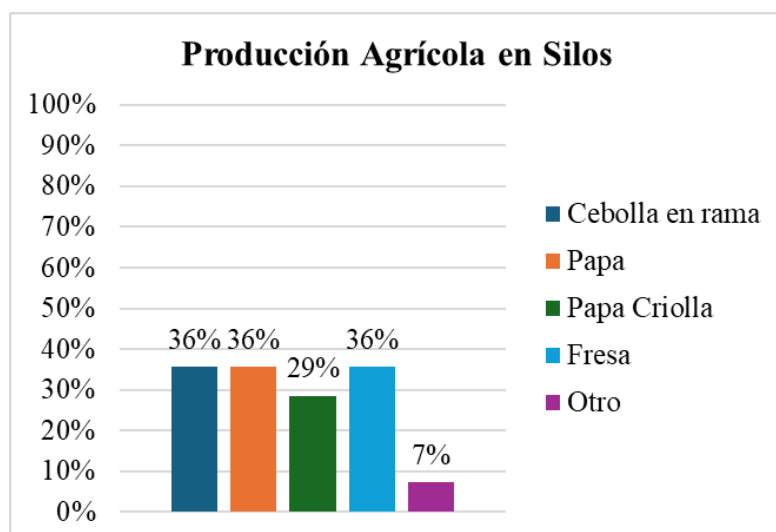
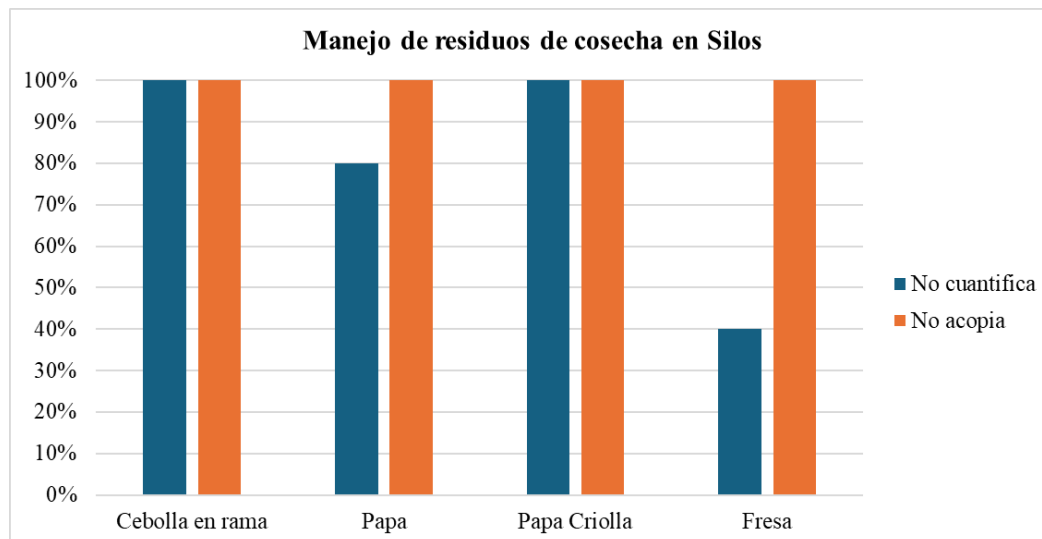
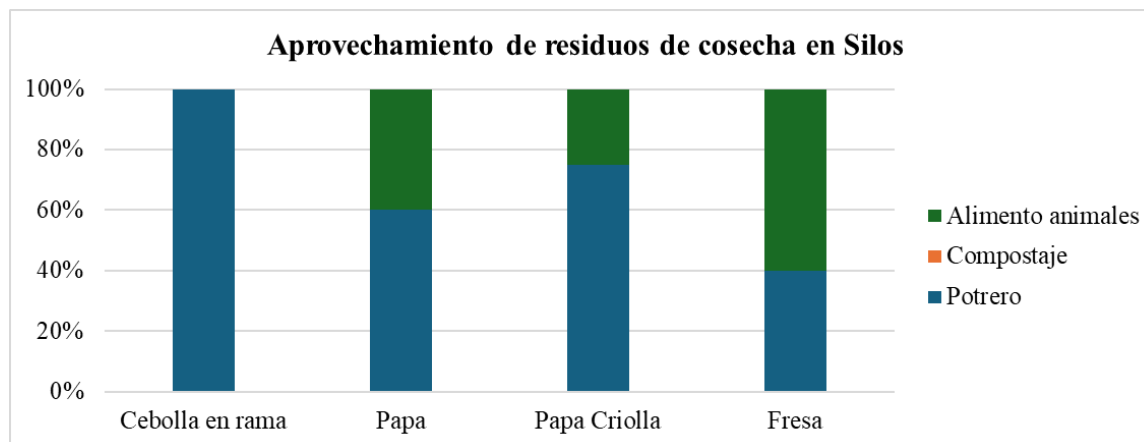
Figura 9*Actividades productivas en Silos***Figura 10***Producción agrícola en Silos*

Figura 11

Residuos de cosecha no cuantificados y acopiados en Silos

**Figura 12**

Forma de aprovechamiento del residuo de cosecha en Silos



Nota. Las Figuras 9 al 12 son el resultado estadístico de las encuestas realizadas. Tomado del proyecto “Desarrollo de una herramienta metodológica computacional y tecnologías de energías renovables para la transición energética en zonas de alta montaña en condiciones de post-pandemia” y del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA).

Caracterización de la Biomasa Residual Agrícola

La información recopilada en bases científicas permitió establecer los parámetros técnicos para la biomasa residual de cada cultivo. Para efectos de este trabajo, se empleará la denominación cebolla en rama de manera estandarizada, dado que en la literatura consultada este cultivo se registra con diferentes denominaciones, como cebolla de rama, cebolla junca o cebolla larga. En la Tabla 1 se presentan los resultados de la recopilación de datos sobre las características fisicoquímicas de la biomasa residual de los cultivos de papa, papa criolla, cebolla en rama y fresa según el tipo de residuo, incluyendo el poder calorífico inferior (PCI), el factor residuo-producto (FR), el contenido de humedad (M), las cenizas (A), el material volátil (MV) y el carbono fijo (FC).

Tabla 1

Resumen de las características de la biomasa residual agrícola según tipo de residuos recopiladas de diferentes autores

Cultivo	Tipo de residuo	FR	M	A	MV	FC	PCI	Referencia
Papa	tallos, hojas	0,36	NR	NR	NR	NR	9,001(MJ/t)	(Quintero & Quiroga, 2017)
papa criolla	Tallos, hojas	0,36	NR	NR	NR	NR	9,001(MJ/t)	
Cebolla en rama	Tallos	0,45	NR	NR	NR	NR	9,001(MJ/t)	
Fresa	tallos, hoja	0,9	NR	NR	NR	NR	8,995.6(MJ/t)	
Fresa	cáscaras y semillas	NR	87,90	NR	NR	NR	NR	(Cubillos & Aguirre, 2018)
Fresa	Residuos	NR	77,92	NR	NR	NR	NR	(Siles et al., 2013)
Papa	Residuos	NR	9,85	14,66	71,62	13,72	15,571.67 (MJ/t)	(López, 2021)
Papa	Cáscaras	1,14	NR	13,4	93,0	3,7	21,100 (MJ/t)	(Jekayinfa et al., 2020)
Papa	Residuos	NR	9,85	14,66	71,62	NR	15,571.67 (MJ/t)	(Llamuca, 2021)
Papa	Tallos	NR	10,55	NR	63,85	25,6	15,440 (MJ/t)	(Piarpuezán Enríquez, 2023)
cebolla en rama	Hojas	0,37	82,53	7,42	92,16	0,46	13,918.81(MJ/t)	(Mejía & Rondón, 2013)
	fruto	0,25	71,45	5,36	90,68	3,99	14,694.8 (MJ/t)	
	descarte							
Papa	Cáscara	0,14	82,09	3,10	87,33	9,6	14,111.28 (MJ/t)	

	puca shungo	NR	81	NR	NR	NR	38	NR	
	estrella de los Andes morado	NR	84	NR	NR	NR	32	NR	
	criolla manzana	NR	77	NR	NR	NR	46	NR	
	criolla negra	NR	80	NR	NR	NR	40	NR	
	papa superior	NR	59	NR	NR	NR	82	NR	
	trompeta amarilla	NR	71	NR	NR	NR	59	NR	
	yana shungo	NR	70	NR	NR	NR	60	NR	
	papa bandera	NR	81	NR	NR	NR	64	NR	
Papa	sin variedad	1,0	NR	NR	NR	NR	0,21	14,120.00 (MJ/t)	(Guzmán-Bello et al., 2023)
Cebolla	sin variedad	0,20	NR	NR	NR	NR	0,10	16,380.00 (MJ/t)	

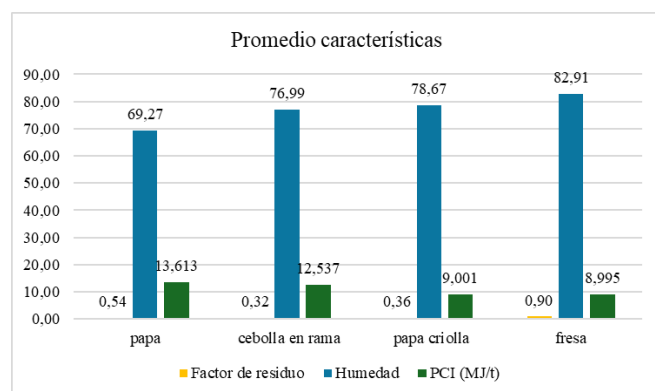
Nota. La tabla muestra las características de la biomasa residual agrícola según las variedades de los cultivos, recopiladas en la revisión de literatura especializada. Fuente. Autoría propia

NR = No reportado

La Figura 13 muestra el promedio de algunas características fisicoquímicas como factor residuo, humedad y PCI de la biomasa residual agrícola o variedades entre cultivos recopilados en las Tabla 1 y Tabla 2.

Figura 13

Promedio características recopiladas de variedades o biomasa residual agrícola



Fuente. Autoría Propia

Según los datos representados en la Figura 13, se observan las similitudes y diferencias entre los cultivos y sus características. En cuanto al factor de residuo y el contenido de humedad, la fresa presentó los valores más altos, con un promedio de 0,90 y 82,91, respectivamente. Por otro lado, el cultivo con el factor de residuo más bajo fue la cebolla en rama, con un promedio de 0,32, y el de menor contenido de humedad fue la papa, con 69,27. Respecto al poder calorífico inferior PCI, la papa tiene el valor más alto con un promedio de 13,613 MJ/t, mientras que el valor más bajo es la fresa con 8,995 MJ/t.

Al comparar los residuos de cosecha generados por cultivos como la papa y la cebolla en rama con los de la fresa y papa criolla, se evidencia que los primeros son más viables para el aprovechamiento energético. La papa, por ejemplo, presenta una mayor producción, lo que se traduce en un mayor porcentaje de generación de residuos, con un poder calorífico promedio de 13.613 MJ/t, convirtiéndola en una fuente eficiente de biomasa.

La cebolla en rama, aunque con menos residuos en relación con su porcentaje de producción, presenta un poder calorífico de 12.537 MJ/t y un menor contenido de humedad, al igual que la papa. En cambio, la fresa y la papa criolla exponen una menor producción y poder calorífico, y un mayor contenido de humedad. Por estas razones, y como mencionan Quintero & Quiroga (2017), para que los residuos de cosecha de un cultivo sean un referente de potencial energético, necesitan un alto poder calorífico y un gran volumen de biomasa, la papa y la cebolla en rama representan una opción más viable y eficiente para la generación de energía renovable en la zona de estudio.

En la Tabla 3, se observa que tanto la biomasa residual de papa como de la cebolla en rama en los municipios de Tona y Silos presentan un mayor potencial energético por su bajo contenido de humedad (73% y 82,53% respectivamente) y su alto PCI (superior a 13 MJ/t), en

contraste con la fresa, cuyo PCI no supera los 9 MJ/t y cuya humedad excede el 87%. Asimismo, el aprovechamiento de residuos es significativamente mayor en Silos para la fresa, en comparación con Tona, lo cual sugiere prácticas diferenciadas en el manejo de biomasa residual entre los municipios de la zona de estudio.

Tabla 3

Resumen comparativo entre municipio y cultivo

Municipio	Cultivo	Producción (t)	FR	Humedad (%)	PCI (MJ/t)	Cuantificación (%)	Aprovechamiento (%)
Tona	Papa	87000	0.45	73.0	14.11	71	43
Tona	Cebolla en rama	87500	0.37	82.53	13.92	33	22
Tona	Fresa	10000	0.9	87.9	8.99	0	0
Silos	Papa	8000	0.45	73.0	14.11	20	40
Silos	Cebolla en rama	2448	0.37	82.53	13.92	0	0
Silos	Fresa	2775	0.9	87.9	8.99	60	60
Pamplona	Papa	9620	0.45	73.0	14.11	0	0
Pamplona	Fresa	4200	0.9	87.9	8.99	0	60

Nota. La tabla muestra el comparativo de los cultivos más representativos de cada municipio y las principales características de potencial energético de la biomasa residual agrícola, donde los datos de la columna de producción provienen de SIPRA, los valores del factor de residuo (FR), contenido de humedad y poder calorífico inferior (PCI) fueron tomadas de la revisión de literatura especializada y los porcentajes de cuantificación y aprovechamiento se obtuvieron a partir de encuestas realizadas a productores agrícolas. Fuente. Autoría propia

En síntesis, los datos comparativos permiten afirmar que los cultivos de papa y cebolla en rama presentan características más adecuadas para ser considerados fuentes viables de energía renovable, con base en los valores de poder calorífico, contenido de humedad y factor residuo-producto obtenidos a partir de fuentes bibliográficas especializadas.

Análisis

El análisis de la información recopilada permite establecer comparaciones relevantes entre los cultivos predominantes de los municipios en la zona de estudio, así como las características fisicoquímicas que pueden determinar un potencial energético de la biomasa residual agrícola. Por otra parte, se logra evidenciar las prácticas actuales de manejo de los residuos agrícolas en los municipios de Tona, Silos y Pamplona, área de influencia del Páramo de Santurbán.

Identificación de Cultivos con Mayor Potencial Energético

Los cultivos de papa y cebolla en rama fueron los que presentaron mayor producción agrícola en los tres municipios evaluados, lo que directamente permitiría tener una mayor generación de biomasa residual agrícola para aprovechamiento. En particular, la papa mostró valores elevados de producción (hasta 87.000 t en Tona), un factor de residuo promedio de 0,45 y un poder calorífico inferior (PCI) de hasta 14,11 MJ/t, lo cual la posiciona como una fuente de biomasa altamente eficiente. Por otra parte, la cebolla en rama, con valores ligeramente inferiores, mantiene también un potencial energético importante (PCI de 13,92 MJ/t).

Los resultados obtenidos son congruentes con las características y condiciones agroclimatológicas de la zona de estudio, ya que la cebolla en rama (*Allium fistulosum*) y la papa (*Solanum tuberosum*) crecen de manera óptima y con mejor rendimiento en rangos altitudinales y térmicos específicos. De acuerdo con Ibáñez (2013), el complejo Jurisdicciones Santurbán, que abarca los municipios de Tona, Silos y Pamplona, se encuentra a una altitud que oscila entre los 3.000 y 4.290 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas que varían entre 0 y 15 °C. En el caso de la cebolla en rama, su desarrollo óptimo se da entre los 1.500 y 3.200 m s. n. m., con temperaturas entre los 12 y 20 °C, mientras que la papa requiere temperaturas entre 12 y 14 °C y altitudes entre los 2.000 y 3.500 m s. n. m. (Galindo Pacheco et al., 2024; Santos Díaz et al.,

2022). Además, otro factor determinante de la notable producción de papa y cebolla en rama es que, en la zona, la principal actividad productiva está orientada a la agricultura, y se basa en estos cultivos de tipo tradicional, los cuales sirven de abastecimiento para los mercados locales, regionales y nacionales (Sarmiento & Ungar, 2014).

En contraste, la fresa, a pesar de su presencia en todos los municipios, arrojó un alto contenido de humedad (87,9%), un PCI mucho más bajo (8,99 MJ/t) y un manejo deficiente de sus residuos (en Tona, el 100% no se cuantifica ni aprovecha). Esto limita significativamente su viabilidad como fuente energética, aunque en Silos su aprovechamiento fue del 60%, lo que evidencia diferencias en prácticas locales.

Cuantificación y Aprovechamiento de Residuos

El análisis de los porcentajes de cuantificación y aprovechamiento revela una gestión inadecuada de la biomasa residual, especialmente en Tona, donde el 67% de los residuos de cebolla en rama y el 57% de los de papa se desechan sin acopio o uso posterior. En Silos, aunque la cuantificación también es limitada (20% para papa), el aprovechamiento es relativamente superior (40%), destacándose como un municipio con mayores prácticas de reutilización, particularmente en alimentación animal.

Estos resultados podrían deberse a que los residuos de la cebolla en rama no suelen destinarse a la alimentación de animales como como ovejas, ganado vacuno, caballos, gatos y perros, ya que contienen compuestos organosulfóxidos que pueden dañar los glóbulos rojos y provocar anemia hemolítica si se consumen en grandes cantidades (Salgado et al., 2011). En cuanto a la papa, las actividades productivas de Silos están más diversificadas que en Tona,

situación que determina una mayor inclinación de sus sistemas productivos hacia los cultivos y no tanto hacia la crianza de animales.

Pamplona, por su parte, no cuenta con datos primarios, lo cual constituye una limitación metodológica. Sin embargo, la producción reportada de papa (9.620 t) y fresa (4.200 t) sugiere un volumen considerable de residuos potencialmente aprovechables que requieren ser estudiados en futuras investigaciones.

Propiedades Fisicoquímicas de la Biomasa Residual Agrícola

Las características fisicoquímicas de los residuos agrícolas tienen una implicación directa en su eficiencia como fuente energética. De acuerdo con Cahyanti et al. (2020), la humedad es un parámetro crítico en el proceso de combustión, ya que un mayor contenido de humedad implica una mayor pérdida de energía, debido a que se requiere más energía para evaporar el agua presente durante la combustión. Por lo tanto, los residuos de papa destacan por su menor humedad (73%) y alta proporción de materia seca, frente a la fresa, cuyos tejidos blandos y acuosos limitan su combustibilidad.

Lo anterior, dado a que de los residuos de la fresa se obtienen desechos como cáliz, tallo hojas, y en su mayoría frutos inmaduros, en mal estado o no comercializables, que son tejidos blandos compuestos en su mayoría por agua (Villamil-Galindo et al., 2021; Borja, 2010). En cambio, en la cosecha de cultivo de papa se generan altos volúmenes de hojas, tallos y tubérculos en mal estado o desechados (Torres, 2021), y los residuos de cebolla en rama (escamas protectoras y tallos desechados), contienen menos agua debido a su cantidad de tejido estructural o fibroso, especialmente las papas, que tienen un follaje más robusto. Caso contrario ocurre con la papa criolla, que al presentar un menor desarrollo estructural y ser cosechada en un ciclo más

corto, conserva un mayor contenido de humedad. Según Niño-Medina et al. (2025), mientras que esta variedad alcanza la cosecha en aproximadamente 120 días, otras variedades de papa requieren entre 145 y 210 días para completar su ciclo de desarrollo, lo cual favorece una mayor acumulación de biomasa aérea y tejidos lignificados. Esto se explica porque, como indican Liu & Eudes (2022), la lignina es un componente fundamental de los tejidos estructurales cuya cantidad varía según la especie vegetal y tiende a incrementarse a medida que la planta envejece.

Adicionalmente, el factor residuo (FR) permite estimar la cantidad de biomasa generada por cada tonelada de producto principal. La fresa presenta el mayor valor (0,90), pero su baja calidad energética reduce su aprovechamiento. En contraste, la papa y la cebolla en rama presentan un equilibrio más favorable entre volumen de residuo generado y calidad energética.

Conclusiones

En la zona de influencia del páramo de Santurbán, que abarca los municipios de Tona, Silos y Pamplona, se identificaron como cultivos predominantes la papa, la cebolla en rama y, en menor medida, la fresa. Se consideran cultivos que generan cantidades significativas de biomasa residual agrícola, sin embargo, la papa y la cebolla en rama son quienes tienen propiedades fisicoquímicas adecuadas para su aprovechamiento energético.

Los residuos de los cultivos de papa y cebolla en rama presentan valores destacados de poder calorífico inferior (PCI), superiores a 13 MJ/t, y contenidos de humedad relativamente bajos en comparación con otros residuos agrícolas como los de fresa, lo que confirma su viabilidad técnica como biomasa residual agrícola con potencial energético.

A pesar de que la fresa presenta un elevado factor de residuo, su bajo poder calorífico y alto contenido de humedad disminuyen su potencial energético. Su aprovechamiento podría orientarse hacia otras estrategias como compostaje o producción de insumos para biotecnología, más que como un potencial energético.

La subutilización de la biomasa residual es una constante en los municipios evaluados. En Tona y Silos, un alto porcentaje de residuos no es cuantificado ni acopiado, y su disposición final se realiza mayoritariamente en potreros, sin aprovechamiento productivo. Esta situación limita el desarrollo de iniciativas sostenibles y representa una pérdida de valor energético.

La ausencia de información primaria en el municipio de Pamplona constituye una limitación del estudio, por lo que se recomienda el desarrollo de investigaciones de campo que permitan estimar de manera precisa el volumen y características de los residuos generados.

Finalmente, los residuos de papa y cebolla en rama, de acuerdo con la literatura analizada, tienen características fisicoquímicas que pueden representar una alternativa energética viable, sostenible y ambientalmente responsable para zonas de alta montaña, teniendo en cuenta la cuantificación, el acopio y la transformación apropiada bajo las condiciones locales, lo que permite considerar estos resultados como una propuesta de línea base para la formulación de proyectos energéticos sostenibles en este tipo de sistemas productivos.

De esta forma, se da respuesta a la pregunta de investigación planteada, confirmando que la papa y la cebolla en rama constituyen las opciones más viables de biomasa residual con fines energéticos en el área de estudio.

Recomendaciones

Fortalecer las prácticas de cuantificación y acopio de biomasa residual agrícola en los municipios de Tona, Silos y Pamplona, mediante la implementación de protocolos técnicos estandarizados y capacitaciones dirigidas a los productores sobre el valor energético de los residuos.

Diseñar estrategias diferenciadas de gestión de residuos agrícolas, que permita identificar las propiedades del residuo, para cuantificar y acopiar los residuos disponibles, con el propósito de maximizar su aprovechamiento en procesos de compostaje, generación de energía renovable, bioinsumos agrícolas, entre otros.

Mejorar las practicas agronómicas, que permita el aprovechamiento de los espacios de tierra, por ejemplo, reduciendo la distancia de siembra entre plantas, mediante la aplicación de planes de manejo integrado y esquemas de fertilización y riego ajustados a las necesidades del cultivo, a fin de evitar la sobreexplotación y degradación del recurso hídrico y edáfico.

Incluir al municipio de Pamplona en futuras fases de investigación de campo, a través de encuestas y caracterización de los residuos agrícolas que permita identificar su manejo y aprovechamiento, para evaluar su aporte real al potencial energético de la región.

Referencias bibliográficas

- Agudelo, J. (2014). Simulación de gasificación integrada con un ciclo combinado para aprovechamiento de gasificación de biomasa residual. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Baca-G., A. E. (2014). Reflexiones sobre los procesos de ocupación humana en los páramos. Situación actual del páramo Volcán Chiles, Colombia. In *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 17(1): 217-226.
- Borja, E. (2010). Estudio de la conservación de fresas (*Fragaria vesca*) mediante tratamientos térmicos. Universidad Tecnica de Ambato.
- Cahyanti, M. N., Doddapaneni, T. R. K. C., & Kikas, T. (2020). Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements. *Bioresource Technology*, 301, 122737. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122737>
- Cuadros Salazar, M. F., & Sanabria Fajardo, A. K. (2018). Relación humano-ambiental en el páramo de Santurbán: una perspectiva desde la ecología social [Universidad Industrial de Santander]. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/fef463b5-14bf-429f-b1de-932e3bf620ed/content>
- Cubillos, L., & Aguirre, L. (2018). Efecto de la conservación de subproductos de mora y fresa sobre las propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. In Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Galindo Pacheco, J., Pérez Parra, M., Hío, J., Martínez Lemus, E., Vargas Díaz, R., Huertas Carranza, B., & Polo Murcia, S. (2024). Cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.): manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia.
- García Del Rey Martín, P. (2023). Estimación del potencial energético de residuos orgánicos generados en Tenerife. En vía de una economía circular. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología Universidad de la Laguna.
- Guzmán-Bello, H., López-Díaz, I., Aybar-Mejía, M., Domínguez-Garabitos, M., & de Frias, J. A. (2023). Biomass energy potential of agricultural residues in the dominican republic. *Sustainability*, *15*(22), 15847. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su152215847>
- Huaytalla, B. (2019). Identificar el potencial energético de la biomasa residual agrícola para su aprovechamiento como uso doméstico. Universidad Científica del Sur.
- Ibañez, L. (2013). Análisis de alternativas para la preservación y conservación del páramo de Santurbán en el departamento de Santander teniendo en cuenta los tipos de áreas protegidas de orden nacional. Universidad Pontificia Bolivariana.

Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH),
CORPONARIÑO, Cabildo Indígena de Chiles, & WWF. (2009). Estudio sobre
el estado actual del páramo de Chiles. In *Corporación Autónoma Regional de
Nariño*.

Jekayinfa, S. O., Orisaleye, J. I., & Pecenka, R. (2020). An assessment of potential
resources for biomass energy in Nigeria. *Resources*, 9(8), 92. Recuperado de
<https://doi.org/10.3390/resources9080092>

Liu, C.-J., & Eudes, A. (2022). Lignin synthesis and bioengineering approaches toward
lignin modification (pp. 41–96). Recuperado de
<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2022.02.002>

Llamuca, D. (2021). Evaluación de la biomasa de los desechos agrícolas del cultivo de
papa (*Solanum tuberosum*) como potencial recurso energético [Universidad
Técnica de Ambato]. Recuperado de
[https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/325454b2-ebda-4c71-
95df-ce342259e0d3/content](https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/325454b2-ebda-4c71-95df-ce342259e0d3/content)

López, I. (2021). evaluación de la biomasa residual agrícola de los cultivos de papa
(*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*) y tomate de árbol (*Solanum betaceum*)
como recurso energético renovable en la provincia de Tungurahua [Universidad
Técnica de Ambato]. Recuperado de
[https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5180663f-687e-42e0-
83f0-789d0b04e0b2/content](https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5180663f-687e-42e0-83f0-789d0b04e0b2/content)

- Mejía, J., & Rondón, J. (2013). Caracterización fisicoquímica DE BIOMASA de biomasa agrícola. [Universidad Industrial de Santander]. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/c272be5e-6eb1-48af-8e6b-c044cfb3669d/content>
- Niño-Medina, R. C., León-Rueda, W. A., Arevalo-Galindo, J. A., & Arias-Vaca, N. S. (2025). El cultivo de la papa, una guía integral. *FEDEPAPA - FNFP*.
- Oñate, Y., & Lemos, C. (2022). Caracterización fisicoquímica y tecnológica de diez (10) Variedades De Papa De La Región Del Pantano De Arce (Subachoque, Cundinamarca). *Documentos De Trabajo ECBTI, 3(1)*, 3. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/ECBTI.5859>
- Oviedo, J., Badii, A., & Lugo, O. (2015). Historia y uso de energías renovables. *International Journal of Good Conscience*.
- Palacios Vallejos, K. Y., Romero Mendoza, M. A., & Rosero Delgado, E. A. (2020). Estimación de las propiedades físico-químicas de residuos agroindustriales para el aprovechamiento como biocombustible. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721, 4(2)*, 28. Recuperado de <https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2191>
- Pérez-Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., Duarte González, C. S., Montaña, A., & García-Marroquín, C. (2022). Harnessing residual biomass as a renewable energy source in Colombia: A potential gasification scenario. *Sustainability, 14(19)*, 12537. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su141912537>

- Piarpuezán Enríquez, M. A. (2023). Obtención de briquetas obtenidas a partir de residuos del tallo de la papa para su uso como combustible. [Escuela Politécnica Nacional]. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25255/1/CD%2013888.pdf>
- Quintero, C., & Quiroga, L. (2017). Estimación del potencial energético a partir de la biomasa primaria agrícola en el departamento de Cundinamarca [Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas]. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/9f74621d-ad8e-47f6-81e9-1ee2e6cf5307/content>
- Rodríguez, R. de J. (2023). Metodología para la evaluación de escenarios de aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola en Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Salgado, B., Monteiro, L., & Rocha, N. (2011). Allium species poisoning in dogs and cats. *Journal of Venomous Animals and Toxins Including Tropical Diseases*, 17(1), 4–11. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/S1678-91992011000100002>
- Santos Díaz, A., Gómez Arias, L., Pedraza Rute, R., Gómez Latorre, D. A., Bohórquez Caballero, G. L., Ureña Sosa, D. F., Gómez Rodríguez, K., Villagrán, E. A., Numa Vergel, S., & Gómez Vargas, Y. (2022). Aspectos generales del cultivo de papa en Cundinamarca. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia)*.

- Sarmiento, C., & Ungar, P. (2014). Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1:25.000 y análisis del sistema social asociado al territorio: Complejo de Páramos Jurisdicciones – Santurbán – Berlín Departamentos de Santander y Norte de Santander. *Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.*
- Siles, J. A., Serrano, A., Martín, A., & Martín, M. A. (2013). Biomethanization of waste derived from strawberry processing: advantages of pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, 42, 190–197. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.012>
- Talero Cabrejo, S., & Salcedo Silva, E. M. (2020). Aportes para el diseño de esquemas de pagos por servicios ambientales en la cuenca del lago de Tota, Colombia. *Apuntes Del Cenec*, 39(69), 269–298. Recuperado de <https://doi.org/10.19053/01203053.v39.n69.2020.10078>
- Torres, E. (2021). *Diseño operativo de una planta para valorización de biomasa residual de la papa en Boyacá* [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Recuperado de <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7c45c85c-9531-4442-9ea5-06e9031e6984/content>
- Urbano, D., Beltrán, G., & Roldan, A. (2023). Energías renovables en Colombia: viabilidad, desarrollo y potencial de implementación para la diversificación de la matriz energética del país. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Villamil-Galindo, E., Van de Velde, F., & Piagentini, A. M. (2021). Strawberry agro-industrial by-products as a source of bioactive compounds: effect of cultivar on the phenolic profile and the antioxidant capacity. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 61. Recuperado de <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00416-z>

Apéndices

Apéndice A

Encuesta aplicada

Plantilla de la encuesta

ENCUESTA DE CARACTERIZACIÓN PREDIOS Y PRODUCCIÓN

Información General

1. Nombre completo del productor:

2. Número de contacto:

3. Correo electrónico:

4. Nombre del Predio:

5. Vereda y municipio:

6. Coordenadas geográficas del predio (HH,MM,SS):

7. Altura sobre el nivel del mar (asnm)

Información Producción

8. Tipo de producción:

a. Agrícola

b. Pecuaria

c. Mixta (Agrícola y pecuaria)

d. Agroindustrial (si cuenta con un proceso de transformación de la producción obtenida)

9. Tamaño de la finca y uso para explotación (en hectáreas):

- a. Área total del predio _____
- b. Área de uso Agrícola _____
- c. Área de uso Pecuario _____
- d. Área para otros usos (relevantes) _____

10. Métodos de producción:

- a. Tradicional (con aplicación de agroquímicos)
- b. Orgánico (solo aplica productos Orgánicos)
- c. Agroecológico (tiene actividades de cuidado del medio ambiente)
- d. Tecnificado (Usa Registros de Producción).

11. Uso de tecnología:

- a. Uso de maquinaria en labores de siembra y/o cosecha
- b. Uso de sistemas de riego
- c. Uso de tecnología de información (por ejemplo, aplicaciones, software de gestión)
- d. Uso de tecnología para fertilización

12. Información de producción pecuaria.

Especie (número de animales) Infraestructura de manejo (establo, sala de ordeño, corral, otro) Estiércol generado (peso, diario, semanal, mensual, año) Estiércol aprovechado (peso, diario, semanal, mensual, año). Cómo lo aprovecha?

Bovinos _____

Porcino _____

Ovinos _____

Caprinos _____

Otros _____

Espacio para información adicional relacionada que el encuestado pueda aportar.

13. Información de producción agrícola. Si no tiene la información en las unidades solicitadas, proporcione datos en las unidades con las que más se familiariza (metros cuadrados, semanas, día, kilogramos, pesas, bultos)

	Cultivo (especie) (ha/año)	Área sembrada * (ha/año)	Producción total (t/año)	Área cosechada Rendimiento (t/año)
Cebolla en rama	_____	_____	_____	_____
	_____	_____	_____	_____
Papa	_____	_____	_____	_____
	_____	_____	_____	_____
Cebolla de bulbo	_____	_____	_____	_____
	_____	_____	_____	_____
Otro	_____	_____	_____	_____
	_____	_____	_____	_____

* Si tiene información en las unidades solicitadas, por favor proporcione información de número de plantas sembradas y la distancia de siembra.

Espacio para información adicional relacionada que el encuestado pueda aportar.

14. Información de producción de biomasa residual agrícola. Si no tiene la información en las unidades solicitadas, proporcione datos en las unidades con las que más se familiariza (metros cuadrados, semanas, día, kilogramos, pesas, bultos, entre otros)

Cultivo (especie) Residuo durante la cosecha

(t / ha / año)

¿Acopia el residuo? (S/N) Residuo de limpieza

(t / ha / año)

¿Acopia el residuo? (S/N) ¿De qué forma se aprovecha el residuo? ¿Cuánto del residuo aprovecha? (t)

Cebolla en rama _____

Papa _____

Cebolla de bulbo _____

Otro _____

Espacio para información adicional relacionada que el encuestado pueda aportar.

15. ¿Realizan rotación de cultivos? Si / No _____

Si la respuesta es Si, indique por favor qué otros cultivos.

Información de mercado y comercialización.

16. ¿Comercializa los productos cosechados en el predio? (Ton/Ha/Año)

Cultivo (especie) Frecuencia de comercialización (diario, semanal, quincenal, mensual) Cantidad que comercializa Lugar de comercialización (mercado local, regional, nacional, exportación) ¿Entrega el producto limpio para comercialización? (S/N)

Cebolla en rama _____

Papa _____

Cebolla de bulbo _____

Otro _____

17. ¿Cómo utiliza los productos cosechados no comercializados?

18. Indique cuales cree que son los principales desafíos o afectaciones que enfrenta usted con la producción agrícola y/o pecuaria:

- a. Cambio climático
- b. Acceso a financiamiento
- c. Acceso a Mercado y comercialización
- d. Problemas de plagas y enfermedades
- e. Otros (especificar) _____

Firma Encuestador:	
Nombre Encuestador:	Número de identificación Encuestador
Fecha de la encuesta (d/m/a)	