

Bioenergy potential of the main Agroindustrial Waste in the La Libertad Region, Perú 2019-2024

Paul Martin Ferrer Lopez¹ , Eduardo Alexander Gil Villalobos¹ , Diana Sheyla Isuiza Gonzales¹ , Juan Marchello Moncada Córdova¹ , Kevin David Quiroga Marcos¹ , Diego Silva-Chuquipoma¹ 

¹ Universidad Privada del Norte, Peru, N00242518@upn.pe, N00294645@upn.pe, N00271842@upn.pe, N00270879@upn.pe, N00275789@upn.pe, diego.silva@upn.pe

Abstract— The objective of this research was to identify the agro-industrial waste of companies in the region, the biomass and energy potential of the waste in the department of La Libertad, the data collection covers the production of the years 2019-2024. Twenty agricultural crops are identified using a Pareto diagram and the analysis is reduced to four crops (asparagus, grapes, blueberries and avocado) that represent 80% of the waste production in the La Libertad region. In the results, biomass production was identified where Blueberry obtained a biomass of 778202 (ton/year), Asparagus 32375 (ton/year), Avocado 32873 (ton/year) and grapes 83081 (ton/year). On the other hand, the total heat energy potential for one of the crops, Blueberry, was identified as 38681 (kwh/year), for Asparagus 112928 (kwh/year), for Avocado it was 1146414 (kwh/year) and finally for grapes with a value of 897366 (kwh/year). In conclusion, the largest in producing biomass is the blueberry with a total production of 778202 (ton/year), in terms of electrical energy potential the greatest is the Avocado with 1146414 (kwh/year). It is recommended to evaluate the heat energy potential of other crops in Peru, to generate a meaningful comparison between the different crops that were analyzed.

Keywords— Bioethanol, Biomass, Agroindustrial waste, Heat energy, Energy potential.

Potencial Bioenergético de los principales Residuos Agroindustriales en la Región La Libertad, Perú 2019-2024

Paul Martin Ferrer Lopez¹, Eduardo Alexander Gil Villalobos¹, Diana Sheyla Isuiza Gonzales¹, Juan Marchello Moncada Córdova¹, Kevin David Quiroga Marcos¹, Diego Silva-Chuquipoma¹

¹ Universidad Privada del Norte, Peru, N00242518@upn.pe, N00294645@upn.pe, N00271842@upn.pe, N00270879@upn.pe, N00275789@upn.pe, diego.silva@upn.pe

Resumen— La presente investigación tuvo como objetivo identificar los residuos agroindustriales de las empresas de la región, el potencial de biomasa y energía de los residuos del departamento de La Libertad, la recolección de datos cubre la producción de los años 2019-2024. Se identifican veinte cultivos agrícolas mediante un diagrama de Pareto y el análisis se redujo a cuatro cultivos (espárrago, uva, arándano y palta) que representan el 80% de la producción de residuos en la región La Libertad. En los resultados se identificó la producción de biomasa donde el Arándano obtuvo una biomasa de 778202 (ton/año), el Espárrago 32375 (ton/año), Palta 32873 (ton/año) y la uva 83081(ton/año). Por otro lado se identificó su total del potencial de energía calorífica para uno de los cultivos el Arándano es de 38681 (kwh/año), para el Espárrago 112928 (kwh/año), para el Palta es de 1146414 (kwh/año) y por último para la uva con un valor de 897366 (kwh/año). En conclusión el mayor en producir biomasa es el arándano con una producción total de 778202 (ton/año), en el potencial de energía eléctrica en mayor es la Palta con 1146414 (kwh/año). Se recomienda evaluar el potencial de energía calorífica de otros cultivos del Perú, para generar una comparación significativa entre las otras entre los diferentes cultivos que se analizaron.

Palabras clave— Bioetanol, Biomasa, Residuos agroindustriales, Energía calorífica, Potencial energético

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se generan muchos desechos orgánicos a nivel mundial en industrias agrícola, culinaria y forestal que, en lugar de reciclarse, acaban en vertederos, emitiendo gases de efecto invernadero y contaminando suelos y aguas [1]. Por otro lado, se estima que más de un tercio de todos los alimentos producidos para uso humano se pierden o desperdician, lo que equivale a alrededor de 1.300 millones de toneladas cada año [2].

Estos desechos causan no solo pérdidas económicas, sino también daños ambientales significativos, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la contaminación de la tierra y el agua [3]. Asimismo, los desechos agroindustriales, que incluyen residuos agrícolas, subproductos culinarios y desechos de procesamiento, son una fuente importante de biomasa para la generación de energía [1]. Se proyecta que el potencial técnico de la biomasa en todo el mundo sea de hasta 150 exajulios (EJ) por año, lo que es suficiente para satisfacer alrededor del 10% del consumo mundial de energía [4]. Por último, se estima que la industria agroalimentaria europea crea aproximadamente 88 millones de

toneladas de basura cada año, con solo un 30% reciclado [5]. Esto resalta la importancia de adoptar sistemas de recuperación de residuos más efectivos, no solo para reducir el impacto ambiental, sino también para ayudar en la transición a una economía circular [6].

Perú promueve su crecimiento económico sostenible mediante energías renovables, con la meta de lograr que el 20% de su matriz energética provenga de fuentes renovables para 2040. El gobierno ha fomentado el uso de biomasa y energías renovables mediante leyes como la Ley N° 28054 y el Decreto Legislativo N° 1002. El BRA, actualmente considerado un desecho agrícola, suele quemarse en el campo o ser usado como fertilizante. Las empresas Maple y Caña Brava lo están utilizando para producir bioetanol. Este estudio busca calcular el potencial energético del bioetanol de segunda generación a partir de residuos agroindustriales mediante la conversión teórica de sus componentes lignocelulósicos. Además, se estima la reducción de emisiones de CO₂ que resulta del uso de este bioetanol, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles. El estudio también pretende identificar los principales residuos generados por las empresas locales y cómo aprovecharlos para fomentar la sostenibilidad y reducir la contaminación.

La región de La Libertad en Perú tiene gran potencial para producir bioetanol a partir de residuos agroindustriales, principalmente arroz y maíz. En 2018, el Valle de Jequetepeque produjo 514.000 toneladas de paja de arroz y 12.000 toneladas de rastrojo de maíz, generando unas 75.700 toneladas de bioetanol anuales.

El arroz es más eficiente, produciendo 248,8 litros por tonelada frente a 169 litros del maíz. Este bioetanol puede cubrir el 78% de las necesidades eléctricas del valle y evitar más de 261.000 toneladas de emisiones de CO₂ al año, beneficiando el medio ambiente [7].

En 2023, las principales empresas exportadoras de residuos agroindustriales destacaron por su gestión eficaz y sostenible de estos materiales, las cuales se observan en la Figura 1. Veolia Environnement S.A., una empresa francesa, lideró el grupo gestionando 50 millones de toneladas de residuos, entre ellos residuos de caña de azúcar, palma aceitera y maíz. SUEZ, otra empresa importante, manejó 35 millones de toneladas de residuos, incluyendo trigo, arroz y frutas. En Estados Unidos, Waste Management gestionó 40 millones de toneladas de residuos de soja, algodón y café, mientras que

Republic Services manejó 30 millones de toneladas de residuos de uva, cebada y manzana. Finalmente, Clean Harbors, otra empresa estadounidense, gestionó 25 millones de toneladas de residuos, similares a los de Veolia [8].

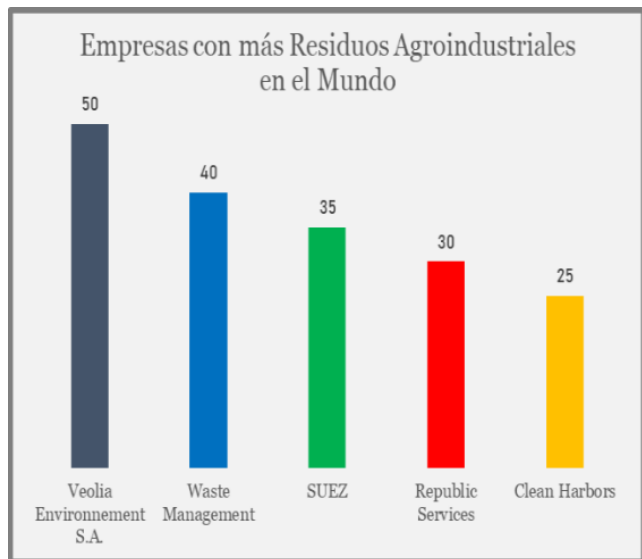


Fig. 1 las principales empresas agroindustriales con más residuos generados

Nota: Veolia Environnement S.A. se destaca como la más importante, gestionando aproximadamente 50 millones de toneladas de residuos, incluyendo bagazo de caña de azúcar y residuos de palma aceitera. En contraste, Clean Harbors es la menos significativa en esta lista, con 25 millones de toneladas, enfocándose en residuos de caña de azúcar, palma aceitera y maíz.

En América Latina, la actividad agroindustrial genera mucha basura con potencial para ser una fuente de energía renovable [1]. En Colombia, el bagazo de caña de azúcar tiene un poder calorífico alto y representa el 35,73% de la energía de los residuos agroindustriales, con un rendimiento de 163,45 TJ/año [9]. Brasil, gran productor de caña de azúcar, utiliza el bagazo para la cogeneración de energía [10]. En México, los desechos del tequila de agave también tienen un gran potencial energético [4]. La falta de tecnología y legislación adecuada limita el uso de estos recursos [11]. La implementación de soluciones técnicas e incentivos es crucial para convertir estos desechos en recursos utilizables, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica [12]. Una eliminación eficiente de desechos ayudaría al medio ambiente, reduciría la dependencia de combustibles fósiles y promovería el crecimiento a largo plazo [9].

Entre las principales empresas que exportan residuos agroindustriales en América Latina se encuentran: En primer lugar, está Agrocentro, una empresa con sede en Guatemala que ha sido un proveedor constante de los cultivos más grandes de la región, como granos, café y vegetales. En 2023, Agrocentro gestionó una cantidad significativa de residuos agroindustriales, incluyendo residuos de banano, azúcar, aguacate y palma [13]. En segundo lugar, se encuentra BGA

Energía Sustentable, una empresa argentina que se especializa en convertir residuos agroindustriales en energía. En 2023, BGA gestionó residuos de maíz, soja y trigo para la producción de biogás [13]. En tercer lugar, está Bioenergía, una empresa brasileña que se dedica a la producción de bioenergía a partir de residuos de caña de azúcar (bagazo) y residuos de palma aceitera. En 2023, Bioenergía procesó millones de toneladas de estos residuos [13]. En cuarto lugar, se encuentra Grupo Altex, una empresa mexicana que maneja residuos de frutas (pieles y semillas), residuos de maíz (mazorcas y hojas), y residuos de trigo (paja). En 2023, Grupo Altex gestionó una gran cantidad de estos residuos para la producción de biocombustibles [13]. Finalmente, en quinto lugar, está Agrosuper, una empresa chilena que se enfoca en la gestión de residuos de soja (vainas), residuos de algodón (fibras y semillas), y residuos de café (cáscaras y pulpa). En 2023, Agrosuper manejó una cantidad considerable de estos residuos [13].

En Perú, la gestión de residuos agroindustriales es crucial para el crecimiento de energías renovables [14]. El país produce una gran cantidad de desechos agrícolas con alto potencial energético, como bagazo de caña de azúcar, cáscaras de café y desechos de palma [15]. El bagazo de caña, con un poder calorífico de 116.187,97 kJ/kg, se utiliza para producir bioetanol y biogás, mejorando significativamente el sistema eléctrico del país [14] [16]. Los estudios en el Departamento de La Libertad sugieren un rendimiento de hasta 163,45 TJ/año [14]. No obstante, la falta de infraestructura adecuada y planes de incentivos restringe la utilización de estos recursos [9]. Es fundamental implementar tecnología innovadora y aprobar leyes de apoyo para convertir estos desechos en fuentes valiosas de energía, reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la sostenibilidad ambiental y económica [15]. Una gestión eficiente de residuos no solo ayuda al medio ambiente, sino que también promueve el desarrollo rural y la creación de empleo, fortaleciendo la sostenibilidad y el crecimiento a largo plazo del país [14].

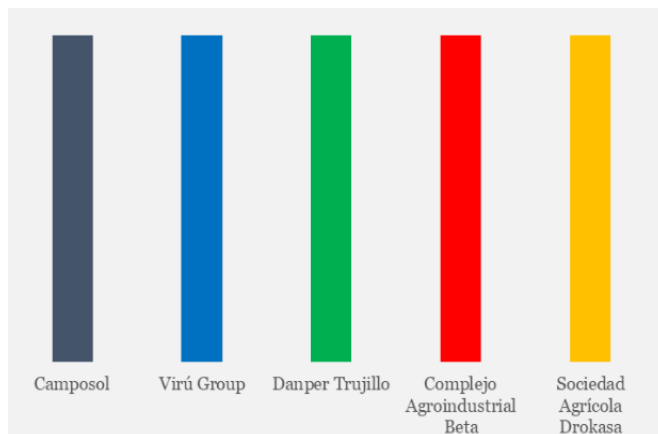


Fig. 2 las principales empresas agroindustriales con más residuos generados

Nota: Camposol es líder del sector, con exportaciones que alcanzan los 342 millones de USD, lo que representa el 3% del total de agroexportaciones del país. Virú Group sigue en importancia con 244 millones de USD, mientras que Danper Trujillo gestiona 235 millones de USD. Otras empresas notables incluyen Complejo Agroindustrial Beta y Sociedad Agrícola Drokasa, con 233 y 195 millones de USD, respectivamente.

Cómo se observa en la Figura 2, entre las principales empresas que exportan residuos se encuentran: En primer lugar, está Camposol; una empresa líder en el sector agroexportador peruano. En 2023, Camposol gestionó aproximadamente 342 millones de USD en exportaciones de residuos agroindustriales, representando el 3% del total de agroexportaciones del país. Entre sus materias primas residuales exportadas se encuentran residuos de frutas como arándanos y paltas [17]. En segundo lugar, se encuentra Virú Group, que en 2023 manejó alrededor de 244 millones de USD en exportaciones de residuos agroindustriales. Sus materias primas residuales incluyen residuos de espárragos y alcachofas [17]. En tercer lugar, está Danper Trujillo, una empresa que gestionó 235 millones de USD en exportaciones de residuos agroindustriales en 2023. Entre sus materias primas residuales exportadas se encuentran residuos de espárragos y pimientos [17]. En cuarto lugar, se encuentra Complejo Agroindustrial Beta, que en 2023 manejó aproximadamente 233 millones de USD en exportaciones de residuos agroindustriales. Sus materias primas residuales incluyen residuos de uvas y mangos [17]. Finalmente, en quinto lugar, está Sociedad Agrícola Drokasa, una empresa que gestionó 195 millones de USD en exportaciones de residuos agroindustriales en 2023. Entre sus materias primas residuales exportadas se encuentran residuos de espárragos y paltas [17].

La Libertad produce una variedad de cultivos como caña de azúcar, espárragos, y frutas. Estos generan subproductos como bagazo de caña, cascarilla de arroz y restos de cosechas que, en lugar de ser desechados, pueden ser utilizados para generar energía a través de tecnologías de biomasa. Esto contribuye a una mejor gestión de los residuos y reduce la necesidad de combustibles fósiles. Puesto que el mal manejo de residuos agroindustriales puede causar problemas ambientales, como la contaminación del suelo, agua y aire.

Por último, el objetivo de este estudio fue identificar los residuos agroindustriales de las empresas de la región la libertad y el potencial de biomasa y energía de los residuos agroindustriales del departamento de la Libertad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación fue de tipo aplicada y no experimental, abordando problemas reales relacionados con la gestión de residuos agroindustriales en la región de La Libertad, lo cual permitió identificar el potencial energético de los desechos y desarrollar soluciones prácticas para su uso [18]. Además, tuvo un enfoque cuantitativo, recopilando y

analizando datos numéricos sobre el volumen y las características de los residuos agroindustriales. Esta técnica ayudó a calcular el potencial energético de dichos residuos, utilizando métodos estadísticos para validar las conclusiones [19]. El diseño de la investigación fue no experimental y se centra en el estado actual de los residuos agroindustriales de las principales empresas sin modificar los factores en consideración [20].

En el estudio, la variable independiente fue el residuo agroindustrial y la variable dependiente fue el potencial energético derivado de dichos residuos.

La población del estudio incluyó todos los datos sobre cómo se generan y gestionan los residuos agroindustriales en diversas empresas del sector agroindustrial en la región La Libertad entre los años 2019 hasta 2024, obtenidos de los sitios web del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), el Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria (SENASA) y la Agencia de Noticias Agrarias (AGRARIA). Mientras que la muestra representativa fue equivalente a la población porque incluyó toda la información encontrada en los sitios web antes mencionados. Esto proporcionó una imagen completa y representativa del problema existente de desechos agroindustriales en la región La Libertad entre los años 2019 hasta el 2024, lo que permitió una investigación exhaustiva de los procedimientos de gestión y su potencial para la producción de energía renovable. De acuerdo con lo investigado, las empresas de la provincia de Trujillo, región La Libertad, generaron numerosos residuos agroindustriales. Para seleccionar los cuatro residuos más relevantes, se utilizó un diagrama de Pareto, y se consultó la base de datos de producción del subsector agrícola, utilizando el Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA) y la Red de Energía del Perú – ISA REP (ISA).

La recolección de datos cubrió la producción de los años 2019-2024. Se empleó la técnica de análisis de contenido para examinar sistemáticamente la información disponible en los sitios web del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) y la Agencia Agraria de Noticias (AGRARIA). Los residuos agroindustriales evaluados incluyeron arándano, palta, uva, espárrago, alcachofa, pimentón, col, mango y papaya, entre otros. Estos residuos presentaron un potencial significativo para la generación de energía renovable y estrategias de gestión sostenible.

Para determinar el potencial de bioetanol y energía de los residuos agroindustriales, se emplearon varias fórmulas específicas.

A. Determinación de la biomasa lignocelulósica: Se calculó las variables $Cse(1)$ y $Hse(2)$. Estos cálculos requirieron la

identificación precisa de cada componente lignocelulósico y la consideración del tipo de cultivo a utilizar, asegurando así un análisis detallado y efectivo del potencial energético de los residuos.

$$Cse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]_{i,j} * \%wt_{i,j} * Cse_{i,j} \quad (1)$$

$$Hse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]_{i,j} * \%wt_{i,j} * Hse_{i,j} \quad (2)$$

Donde:

M: es la producción anual

J: residuos agroindustriales (i)

%wt: es porcentaje de reproducción de residuos(i)

%Cse y %Hse= porcentaje de contenido de celulosa y hemicelulosa (R=i)

B. Potencial de producción de bioetanol: Se calculó la biomasa residual de acuerdo con el método descriptivo que se describe en la figura 3.

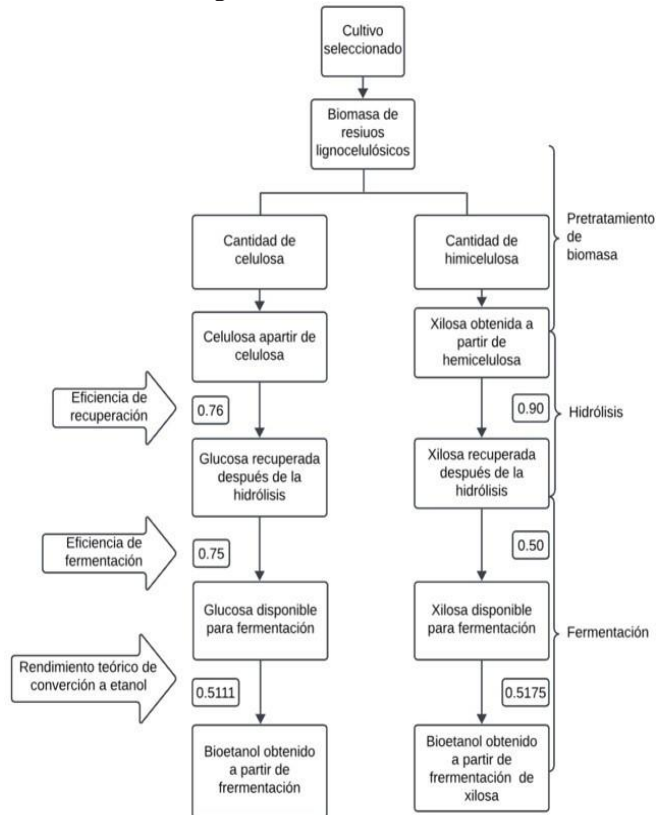


Fig. 3. Secuencia de obtención de bioetanol a partir de biomasa residual

C. Bioetanol a partir de celulosa.

$$Gse_f \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = Cse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * e_{recuperación} * E_{fermentación} \quad (3)$$

$$BioEtOH \text{ Obtenido de } Gse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = Gse_f \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * BcG \quad (4)$$

Donde:

Gse: es la glucosa

Gse_f: es la glucosa disponible para la fermentación

Cse: es la célula de los residuos de lignocelulósicos

BCG: es el rendimiento de conversión de bioetanol a partir de glucosa.

D. Bioetanol a partir de hemicelulosa.

$$Xse_f \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = Hse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * e_{recuperación} * e_{fermentación} \quad (5)$$

$$BioEtOH \text{ de } Xse \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = Xse_f \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * BcX \quad (6)$$

Donde:

Xse: es la xilosa

Gse_f: es la xilosa disponible para la fermentación

Hse: es la hemicelulosa de conservación de los residuos lignocelulósicos

BcX: es el rendimiento de conservación de bioetanol a partir de xilosa

E. Potencial total de bioetanol: Se determinó con los resultados de las dos ecuaciones (4) (6).

$$\dot{m}_{bioEtOH} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = Gse_{bioEtOH} + Xse_{bioEtOH} \quad (7)$$

F. Potencial energético calorífico: Se refiere a determinar la tonelada equivalente al petróleo (tep), el valor fue de (ton; 0.617) [22]. Los valores referidos fueron toe 107 kcal = 41,869 GJ, este dato se obtuvo al definir la energía al quemar petróleo crudo [23].

$$\dot{Q}E_{bioEtOH} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{año}} \right] = \dot{m}_{bioEtOH} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * 0.617 \left[\frac{\text{toe}}{\text{ton}} \right] * 41.868 \left[\frac{\text{GJ}}{\text{toe}} \right] \quad (8)$$

G. Potencial de energía eléctrica: Se procede a calcular el bioetanol (QebioEtOH), al considerar 1 kWh= 3,6 MJ, de acuerdo con la ecuación (9).

$$\dot{E}E_{bioEtOH} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \dot{Q}E_{bioEtOH} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] * \eta \quad (9)$$

Donde:

QebioEtOH: es el potencial energético del bioetanol por año en kWh

N: es la eficiencia global de conversión del bioetanol a energía eléctrica

n: se considera un 35%

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para la selección de los cultivos agroindustriales, se realizó un diagrama de Pareto (figura 4), donde se examinaron 20 cultivos agroindustriales de las empresas de la región La Libertad. Mediante esta prueba, se eligieron cuatro cultivos: palta, espárrago, arándano y uva, que correspondían al 80 % de la producción a nivel regional.

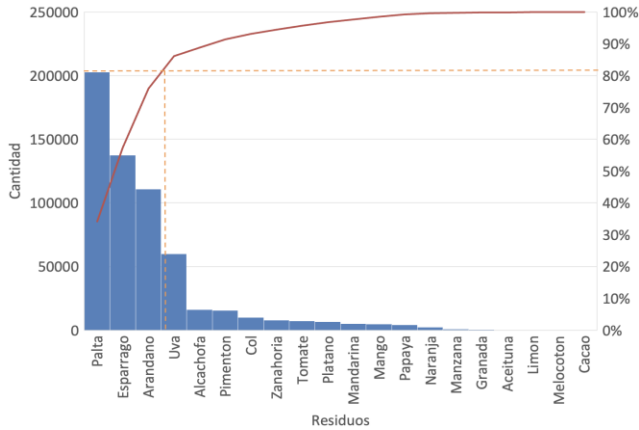


Fig. 4. Diagrama de Pareto de la producción de los cultivos agroindustriales de la región La Libertad, basándose en la data de la [24].

Los 4 cultivos que fueron elegidos mediante esta prueba, para la palta tuvo una producción de 202,726.96 TM, el espárrago tuvo 137,619.45 TM, el arándano con 110,881.9 TM y por último la uva con de 60,023.68 TM; siendo los cultivos con más producción en cada una de las empresas agroindustriales establecidas por la prueba de Pareto.

Las tendencias de la producción de los cultivos agroindustriales seleccionados se muestran en la figura 5. Durante un período de cinco años, se presentó la tasa anual de producción de cada producto, y se observó que la uva se destacó entre los demás cultivos en el periodo establecido.

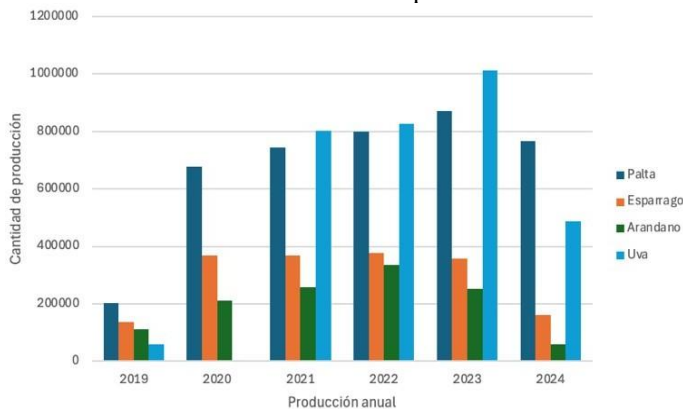


Fig. 5. Producción anual de cada cultivo agroindustrial seleccionado en los años 2019-2024, recolectados de [25], [26].

La producción de uva en 2023 tuvo un auge significativo en comparación con otros cultivos. Aunque en 2024 la producción no es tan alta, esto podría deberse a que la

temporada no ha alcanzado su pico o que los datos no se han registrado completamente. Según [27], la comercialización de la uva aumentó un 511% en comparación con cosechas anteriores en 2023 y 2024 en la región de La Libertad. Los principales residuos generados en la comercialización son las pieles, semillas y tallos. Estos subproductos generan un impacto significativo en los productores, con 1.6 millones de toneladas de residuos generados durante 2022 y 2023, como se reafirma en [28].

El cultivo de palta en La Libertad ha crecido significativamente, alcanzando 765,743.47 toneladas en 2024. La producción en ascenso también se reflejó en un aumento del 8.3% en exportaciones comparado con 2022 [29]. Sin embargo; la producción de residuos fue considerable, desechándose piel, hueso o pepa, y hojas, que contienen compuestos bioactivos. Estos residuos representaron el 30% del total, aprovechándose solo el 70% del producto. Esto implicó una pérdida anual de más de 180,000 toneladas de producto [30].

El cultivo del espárrago suele tener alta producción en buenas temporadas. De 2020 a 2023, la producción anual promedió 368,123.5125 TM. Para 2024, se estimó una disminución del 18%, pero se espera que siga siendo alta en La Libertad [31]. Los principales residuos del espárrago fueron hojas, tallos y raíces, generando 90,000 kg/ha de residuos no aprovechados en La Libertad [32]. Anualmente, el 30% de la producción de espárragos se convirtió en residuos, quedando solo un 70 % en producto bruto.

El cultivo del arándano no fue tan elevado, pero sí se registró una gran producción en toda la región de La Libertad, con su mayor auge en 2022, alcanzando 336,024.43 toneladas, el nivel más alto en los últimos cinco años. Aunque la producción sigue en aumento, no se debe olvidar los desechos generados, como tallos, hojas y frutos en mal estado. Estos residuos representaron entre el 30% y el 40% de la producción anual, una cantidad considerable que generó pérdidas. Sin embargo, estos desechos contienen compuestos bioactivos que podrían aprovecharse para crear subproductos sostenibles [33].

La producción de uva, palta, espárrago y arándano generaron los mismos tipos de residuos, como pieles, tallos, semillas y hojas, que suelen no ser aprovechados. Sin embargo, estos contienen compuestos bioactivos con un alto potencial. En los últimos años, algunos de estos productos han generado más del 30% de residuos anuales. A partir de este punto, es crucial aprovechar estos desechos para convertirlos en productos sostenibles que puedan reducir el índice de residuos y mejorar la rentabilidad económica. El resumen de ello se puede observar en la Tabla I.

Tabla I
Principales residuos generados en el procesamiento de los cultivos seleccionados (2019 – 2024)

| Año | Palta | Espárrago | Arándano | Uva |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2019 | 202726.96 | 137619.45 | 110881.9 | 60023.68 |
| 2020 | 677371.24 | 369367.61 | 210238.4 | 3100.37 |
| 2021 | 744722.34 | 369151.83 | 256824.88 | 801140.93 |
| 2022 | 798198.67 | 377246.1 | 336024.43 | 826724.82 |
| 2023 | 871418.19 | 356728.51 | 251154.86 | 1011464.1 |
| 2024 | 765743.47 | 162271.67 | 57642.72 | 486581.27 |

Los cultivos seleccionados generaron una gran cantidad de residuos a lo largo de su cadena productiva, tanto agrícolas como agroindustriales. En Perú, las industrias de arándano, espárrago, palta y uva producen muchos residuos no alimentarios que no se aprovechan adecuadamente. Las plantas de arándano, como tallos y hojas, tienen un alto contenido en fibra, adecuado para la producción de bioetanol. Las cáscaras y semillas de palta contienen lignocelulosa, que se usa para energía, mientras que los residuos de uva tienen lignina y polifenoles, como antocianinas, con propiedades antioxidantes. Estos componentes son de interés para diversas aplicaciones industriales, como la producción de bioenergía. Para simplificar los cálculos, se toma un promedio de los valores informados en la Tabla II para la cáscara (%) y la celulosa (%) hemicelulosa [1].

Tabla II
Principales residuos de los cultivos elegidos y su composición de lignocelulósica.

| Cultivo | Residuos de cosecha | % | Composición lignocelulósica (%) | | Referencias |
|-----------|---------------------|---------|---------------------------------|-----|-------------|
| | | | | | |
| Arándano | Hoja | 10- 20 | 35% | 25% | [39] |
| | Tallo | 20 - 30 | 30% | 20% | [40] |
| Palta | Cáscara | 7 - 15 | 15% | 10% | [38] |
| | Semilla | 13 - 25 | 22% | 15% | [41] |
| Uva | Orujo de uva | 15 -25 | 27% | 22% | [42] |
| | Tallo | 3 - 7 | 25% | 16% | [43] |
| | Semilla | 3 – 6 | 15% | 11% | [44] |
| Espárrago | Tallo | 20 - 30 | 27% | 18% | [45] |
| | Cáscara | 15 - 20 | 34% | 21% | [46] |

La Figura 6 muestra el potencial de producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos seleccionados. Se compararon los valores mínimos (X_{SEmin} , en azul) y máximos (X_{SEmax} , en naranja) para cada tipo de residuo. En las hojas y tallos del arándano, el valor mínimo fue de aproximadamente 0.008 ml/kg y el máximo es 0.016 ml/kg, lo que indicó una gran variabilidad en el potencial de producción. En los tallos, los valores mínimos alcanzaron cerca de 0.012 ml/kg y los máximos fueron similares a los de las hojas. Para la palta, la cáscara presentó un valor mínimo cercano a 0 y un máximo ligeramente superior a 0.002 ml/kg. Las semillas de palta no mostraron un valor máximo, pero el mínimo superó los 0.004 ml/kg. En el caso de la uva, el orujo tuvo un valor mínimo cercano a 0.010 ml/kg y un máximo de aproximadamente 0.015 ml/kg. Los tallos de uva tuvieron un bajo potencial, con un mínimo de 0.002 ml/kg y un máximo de 0.003 ml/kg. Las semillas de uva presentaron valores mínimos y máximos muy bajos, cercanos a 0. Finalmente, para el espárrago, el tallo mostró un valor máximo superior a 0.014 ml/kg y un mínimo de casi 0.010 ml/kg. La cáscara del espárrago tuvo un valor mínimo superior a 0.010 ml/kg y un máximo de aproximadamente 0.041 ml/kg.

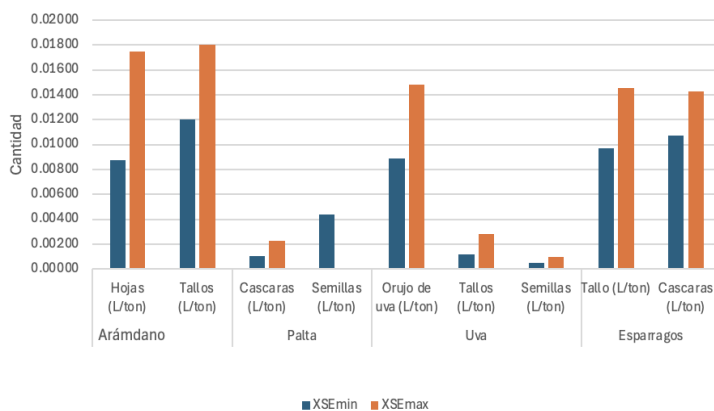


Fig. 6. Producción potencial de bioetanol (para el período 2019-2024) a partir de residuos lignocelulósicos de Arándano, Palta, Uva y Espárrago, de las empresas agroindustriales.

Las investigaciones indican que la alteración de las bacterias celulíticas incrementa la producción de etanol al mejorar la descomposición de la biomasa vegetal y la fermentación de azúcares para bioetanol [47]. Los estudios se centran en la producción de biomasa y conversión de energía, destacando tecnologías para convertir celulosas y hemicelulosas en etanol usando bacterias y enzimas modificadas, y tecnologías para la separación de etanol por membrana. Según [48], los residuos de arándano contienen cantidades moderadas de celulosa y hemicelulosa, haciéndolos útiles para la fermentación tras un pretratamiento químico o enzimático. En cuanto a los espárragos, un estudio encontró que los tallos liberan hasta un 55% de azúcares fermentables mediante hidrólisis enzimática, aunque la lignina en los tallos

reduce la eficiencia de la hidrólisis en aproximadamente un 25% [49]. Esto resalta tanto las oportunidades como los desafíos en la utilización de residuos agrícolas para la producción de bioetanol.

En la Figura 7 se observa la biomasa total obtenida a partir de los residuos estudiados, los cuales presentaron un alto potencial energético, destacándose como fuente viable para la producción de bioetanol de 926,531 Toneladas/año y generación de electricidad 1,625,497 kWh/año en total de los 4 cultivos analizados. Los residuos de cultivos como arándano, espárrago y uva mostraron niveles significativos de bioetanol potencial, con un rendimiento energético que superó el de otros residuos agrícolas. Esto no solo permite valorizar estos desechos, sino que también facilita su aprovechamiento para energía renovable. Los resultados sugieren que estos residuos de biomasa podrían cubrir una parte de la demanda energética, representando una alternativa sustentable.

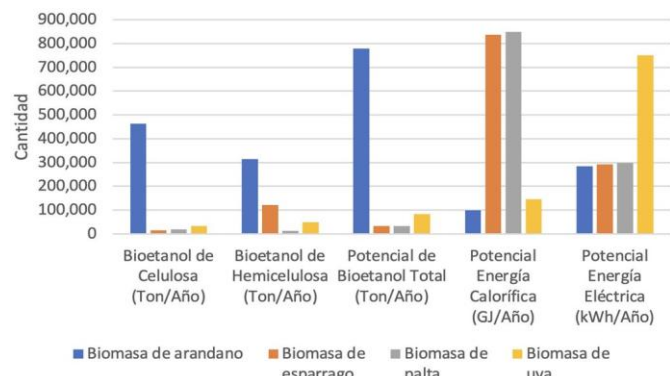


Fig. 7. Potencial energético y generación de electricidad teórica de bioetanol obtenido a partir de los residuos.

De acuerdo [50], subrayan la utilidad de residuos lignocelulósicos, dada su eficiencia energética y su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, [51] evaluaron residuos agrícolas diversos y observaron que aquellos con un alto contenido de celulosa y hemicelulosa tienen un mejor rendimiento en la producción de bioetanol. Sin embargo, la lignina, presente en algunos residuos, sigue siendo un reto en los procesos de pretratamiento, y su manejo adecuado puede optimizar la conversión de biomasa en bioenergía.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se llegó a identificar 20 cultivos agroindustriales mediante un diagrama de Pareto, reduciéndose a 4 cultivos que significaron el 80% de producción de residuos en la región La Libertad. El espárrago generó un total de 1,137,619.5 (ton/año), el arándano generó 110,881.9 (ton/año), la palta generó 202,727 (ton/año), y por último la uva generó 60,023.68 (ton/año). Así mismo, el arándano mostró una producción de biomasa de 778,202 (ton/año); mientras que el espárrago presentó 32,375 (ton/año), asimismo se identificó el

mayor y el menor en el potencial energético eléctrico, siendo el mayor la palta con 1,146,414 (kWh/año), y el menor siendo el arándano con una producción de 382,681(kWh/año). Se recomienda que, a partir de un análisis detallado de la biomasa disponible en La Libertad, se implemente un sistema piloto de producción de bioetanol y energía a partir de residuos agroindustriales para evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental, optimizando así su escalabilidad y sostenibilidad. Además, evaluar el potencial energético de otros cultivos del Perú, para generar una comparación significativa entre las otras entre los diferentes cultivos que se analizaron.

REFERENCIAS

- Jurado, D., Tulcán, Y., & Rojas, A. (2023). Perspectivas de valorización de residuos de frutas a partir de sus características físicas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. https://doi.org/https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:3016
- Comejo, J., & García, M. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales (R.A) enfocados en el mejoramiento de la calidad del medio ambiente: una revisión de la literatura científica. Perú: Facultad de Ingeniería. Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/23808>
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Zavala, C., Pretell, V., Verastegui, J., & Ramirez, A. (2021). Estimación del potencial energético del gas pobre a partir de la gasificación de cáscara de cacao y racimos de frutos vacíos de palma aceitera. *Información tecnológica*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000200143>
- Torres, C., & Quintero, L. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Revista Ingenierías USBMed*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6943761>
- Velázquez, L., Aguilar, J., & Tulcán, E. (2020). Estudio del potencial energético de la cascara de arroz ecuatoriano peletizado para su uso como combustible. *Ingeniería Química y Desarrollo*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9499472>
- Bardales, J., & Arévalo, M. (2015). Residuos lignocelulósicos La Libertad, Perú para la obtención de bioetanol. *UPAO Journal*, 22(1), 229-240. <https://journal.upao.edu.pe/>
- MMR. (2024). *Agricultural Waste Market: Global Industry Analysis and Forecast (2024-2030)*. Maximize Market Research: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/agricultural-waste-market/214223/>
- Muñoz, D., Cuatin, M., & Pantoja, A. (2014). Potencial Energético de Residuos Agroindustriales del Departamento del Cauca, a partir del Poder Calorífico Inferior. *Biocombustibles en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000200018
- Siles, A. (2024). Producción de energía a partir de bagazo de caña. *Plataforma Bio-emprender*. [https://bio-emprender.iica.int/#8203::contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://bio-emprender.iica.int/#8203::contentReference[oaicite:0]{index=0}).
- Godoy, D., Daza, R., Fernández, L., Layza, A., Roque, R., Hidalgo, V., . . . Gómez, C. (2020). Caracterización del valor nutricional de los residuos agroindustriales para la alimentación de ganado vacuno en la región de San Martín, Perú. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. https://doi.org/https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1374
- García, P. (2023). Estimación del potencial energético de residuos orgánicos generados en Tenerife. En vía de una economía circular. España: Universidad de La Laguna. <http://riull.uil.es/xmlui/handle/915/33012>
- Gutman, D. (2024). Turning Agro-industrial Waste into Energy in Argentina. *Habana Times*: <https://havanatimes.org/features/turning-agro-industrial-waste-into-energy-in-argentina/>

- [14] Castro, A. (2022). Técnicas para la biotransformación de residuos agroindustriales y disminución de sus impactos ambientales. *High Tech Engineering Journal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.46363/high-tech.v21i.3>
- [15] Assureira, E., & Assureira, M. (2013). Potencial Energético de la biomasa residual en el Perú. *Revista Conferencia*. <http://www.conferencia2013.consortio.edu.pe/wp-content/uploads/2014/09/3.-Assureira.pdf>
- [16] Retamozo, A. (2023). Impacto ambiental del ciclo de vida de la producción de etanol a partir de residuos agroindustriales en una planta piloto – 2021. Perú: Facultad de Ingeniería. Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/36569>
- [17] Fluctuante. (2024). Ranking de las diez principales empresas agroexportadoras peruanas en el 2023. *Fluctuante*: <https://fluctuante.lat/agroexportaciones-peruanas/2024/03/01/ranking-de-las-diez-principales-empresas-agroexportadoras-peruanas-en-el-2023/>
- [18] Castro, J., Gómez, L., & Camargo, E. (2022). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Revista Tecnura*. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- [19] Rodríguez, E. (2019). La hermenéutica gadameriana como síntesis entre el enfoque cuantitativo y cualitativo en la investigación social. *Limite: revista de filosofía y psicología*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7364521>
- [20] Salamanca, G., Reyes, L., Osorio, M., & Rodríguez, N. (2015). Diseño experimental de mezclas como herramienta para la optimización de cremolácteos de mango. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8739235>
- [21] C. S. Goh, K. T. Tan, K. T. Lee, and S. Bhatia, "Bio-ethanol from lignocellulose: status, perspectives and challenges in Malaysia," *Bioresource technology*, vol. 101, pp. 4834-4841, 2010.
- [22] RFA. (2016, Enero 1). Fuel Ethanol Trade Measurements and Conversions. Available: https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2015/12/Fuel-Ethanol-Trade-Measurements-and-Conversions_RFA.pdf
- [23] A. Budí Orduña, "Estimación del potencial energético de la biomasa residual agrícola y análisis de aprovechamiento en los municipios de la comarca del Alto Palancia," 2016.
- [24] SIEA. Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), Informe de Seguimiento 1
- [25] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Sistema de Información Estadística Agraria. MIDAGRI. https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/
- [26] Agroeconómico (ISA) [En línea]. Disponible: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/>
- [27] RPP Noticias. (2024, 16 de octubre). La producción de uva en La Libertad enfrenta desafíos en 2024. <https://www.rppnoticias.pe>
- [28] La Razón. (2024, 16 de octubre). Título de la noticia sobre la producción de uva. <https://www.larazon.pe>
- [29] Cárdenas, R. (2024). Impacto de la producción de palta en la economía peruana. *Revista de Ciencias Empresariales*, 12(1), 45-67. <https://repositorio.ulima.edu.pe/>
- [30] Residuos Profesional. (2024). Estudian el aprovechamiento de los residuos de aguacate. *Residuos Profesional*. <https://www.residuosprofesional.com>
- [31] AGRARIA.PE. (2024). Producción de espárragos en Perú presenta un panorama mixto para 2024. *Agencia Agraria de Noticias*. <https://www.agraria.pe/>
- [32] C, Barbales; C, Rojas; C, Leon (2015) Evaluación de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales del departamento de La Libertad, Perú como potenciales materias primas para la obtención de bioetanol. Universidad privada Antenor Orrego
- [33] Agencia Andina. (2023). Investigadores usarán residuos de arándanos para fabricar empaques de exportación. *Industria Alimentaria*. <https://www.industriaalimentaria.org/investigadores-usaran-residuos-de-arandanos-para-fabricar-empaques-de-exportacion>
- [34] Cazuriaga Durán, R. K. Optimización del proceso de biotratamiento de biomasa de segunda generación a partir de residuos de pepa de uva para la producción de biodiesel en un biorreactor discontinuo (Doctoral dissertation).
- [35] Retto-Hernandez, P., Rojas, M. L., Lescano, L., Sanchez-Gonzalez, J., & Linares, G. (2020). Lignocelulosic agroindustrial waste in Peru: potential for bioethanol, energy, and reduction of CO2 emission.
- [36] Pinto Altamiranda, S. R. (2022). Valorización de residuos agroindustriales mediante carbonización hidrotermal asistida por microondas.
- [37] Kumar, G., Dharmaraja, J., Arvindnarayan, S., Shoban, S., Bakonyi, P., Saratale, G. D., Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K., Yoon, J. J., & Kim, S. (2019). A comprehensive review on thermochemical, biological, biochemical and hybrid conversion methods of bio-derived lignocelulosic molecules into renewable fuels. *Fuel*, 251, 352–367.
- [38] R, Dighero (2023) Pirólisis de residuos de aguacate para la obtención de combustibles sólido y líquido. Universidad del Valle de Guatemala <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4818>
- [39] Patiño, K., Torres, S. (2021) Alternativa de obtención de etanol a partir de los desechos de piña generados por Industrias Karpos SAS. Universidad de América <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8666/1/616723-2021-2-IQ.pdf>
- [40] Arévalo, M., Patricia, C. (2022) Uso de residuos de poda de arándanos para mitigar la oxidación del cemento asfáltico en climas fríos de La Libertad. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas <https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/660443>
- [41] M, Chacón; L, Milagros (2015) Caracterización de biomasa residual de la región Arequipa para la producción de biocombustibles. Universidad tecnológica Equinoccial <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=572260849003>
- [42] A Sánchez, A., Ysunza, F., Beltrán, M., Esqueda, M. (2005) Cultivo del hongo comestible *Pleurotus* sobre residuos vitivinícolas y su manejo pos cosecha. Área de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal <https://www.sciencedirect.com/reference/270068>
- [43] Y, Villa; N, Espín (2012) Determinación de la cinética de crecimiento del hongo *Phanerochaete chrysosporium* en residuos lignocelulósicos y determinación de la actividad ligninoperoxidásica. *Revista politécnica* https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/192
- [44] R,Wuilloud; T, Stadler; J, Altamirano (2019) EFLUENTES Y RESIDUOS DE LA INDUSTRIA VITIVINÍCOLA. MUCHO MÁS QUE SOLO DESECHOS. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
- [45] E, Piscocoya (2019) ESTUDIO COMPARATIVO EN LA FORMULACIÓN DE ENSILAJE A BASE DE BROZA DE ESPARRAGO (Asparagus officinalis) Y MAÍZ CHALA (Zea mays), EN SU COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA Y PALATABILIDAD. Universidad Señor de Sipan <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/5580>
- [46] R, Angulo (2019) Potencial alimentario de productos obtenidos a partir de residuos industriales de espárrago. Universidad nacional de Trujillo <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/44f35206-8b11-4b3f-abd5-fad4df4b1ad6/content>
- [47] Bacca Narváez, A. J., & España Muñoz, J. (2024). Revisión bibliográfica de metodologías para el aprovechamiento de residuos de frutas y verduras para la obtención de compuestos bioactivos, producción de biomasa y conversión de energía.
- [48] Rojas González, A. F. Caracterización física y química de residuos de frutas: cáscaras y semillas.
- [49] Ramos, L., Ballesteros, I., Ballesteros, M., Sáez, F., & González, A. (2011). Optimización de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos: caso de los tallos de espárrago. *Revista de Energía y Biotecnología*, 29(4), 45-53.
- [50] Jurado, D., Tulcán, Y., y Rojas, A. (2023). Perspectivas de valorización de residuos agrícolas a partir de sus características físicas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:3016
- [51] Cornejo, J., & García, M. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales (RA) enfocados en el mejoramiento de la producción de bioetanol. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 18(2), 87-95