

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Revisión sistemática literaria sobre la producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos.**

**Michelle Abigail Padilla Quimbiulco**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Químico

Quito, 21 de noviembre de 2020

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Revisión sistemática literaria sobre la producción de bioetanol a partir de  
tubérculos andinos.**

**Michelle Abigail Padilla Quimbiulco**

**Nombre del profesor, Título académico José Álvarez, PhD / Daniela Almeida, PhD**

Quito, 21 de noviembre de 2020

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Michelle Abigail Padilla Quimbiulco

Código: 00131739

Cédula de identidad: 1720360732

Lugar y fecha: Quito, 21 de noviembre de 2020

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## RESUMEN

Esta revisión sistemática literaria tenía como objetivo analizar artículos de los últimos 10 años sobre la producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos. Para ello, se realizó una búsqueda de la literatura en bases de datos como Scopus, Science Direct y Springer, utilizando diferentes palabras clave relacionadas con el tema. Adicionalmente, se emplearon criterios de inclusión, es decir, el artículo mostraba información sobre sacarificación y fermentación simultánea (SSF), hidrólisis y fermentación secuencial (SHF), tubérculos, factibilidad económica, con el objetivo de filtrar los textos, obteniéndose un total de 73 artículos. Los estudios fueron divididos en cuatro grupos de tubérculos: papa, yuca, camote y otros, en los cuales se compararon la parte del tubérculo utilizado, tipo de proceso, microorganismo, tiempo de fermentación, concentración final de etanol y rendimiento. Al realizar el análisis estadístico se determinó que la técnica SHF se emplea un 39.66% y la SSF un 48.28%. Además, en los artículos la yuca igual que el camote representan un 32.69%, la papa el 17.31%, y otros como el ñame alemán, alcachofa de Jerusalén, papa china, entre otros, están entre el 1.92% y 3.85%. No obstante, existieron problemas al realizar un análisis comparativo de los resultados de las investigaciones debido a la falta de información sobre variables de entrada y salida de los procesos, así como una falta de homogeneidad en la forma de expresar los resultados. Por lo cual, no se pudo tener una comparación exacta en ningún tipo de tubérculo. De esta manera, a pesar de corroborar el amplio potencial de producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos, sería necesario plantear una metodología común de análisis para que la comparación sea más precisa.

**Palabras clave:** Bioetanol, Hidrólisis y fermentación secuencial (SHF), Sacarificación y fermentación simultánea (SSF), biocombustibles, tubérculos.

## ABSTRACT

This systematic literary review has the objective to analyze articles from the last 10 years for the production of bioethanol from Andean tubers. For this, a literature search was carried out in the databases Scopus, Science Direct and Springer, using different keywords related to the topic. Additionally, inclusion criteria were used for the articles containing information on simultaneous saccharification and fermentation (SSF), sequential hydrolysis and fermentation (SHF), tubers and economic feasibility, to filter the texts, obtaining 73 articles. The research was divided into 4 groups of tubers: potato, cassava, sweet potato, and others, in which were compared the part of the tuber used, type of process, microorganism, fermentation time, final concentration of ethanol and yield. When performing the statistical analysis, it was determined that the SHF technique is used by 39.66% and the SSF by 48.28% of the studies. In addition, 32.69% of the articles used cassava and sweet potatoes as raw materials, while 17.31%, used potatoes and other tubers such as German yams, Jerusalem artichokes, Taro or others, are in the range between 1.92% and 3.85%. However, difficulties were encountered during the comparative analysis, since many articles lack information on input and output variables of the processes, as well as discrepancy in the way of presenting the results. Therefore, it was not possible to compare directly the results of the different tubers. In this way, despite corroborating the wide potential for bioethanol production from Andean tubers, it would be necessary to propose a common analysis methodology for the comparison to be more precise.

**Key words:** Bioethanol, Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF), Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF), biofuels, tubers.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	METODOLOGÍA.....	10
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
	3.1 Tubérculos andinos.....	12
	3.2 Tipos de tubérculos.....	13
	3.2.1 Papa.....	13
	3.2.2 Yuca.....	14
	3.2.3 Camote.....	14
	3.2.4 Ñame.....	14
	3.2.5 Papa china.....	15
	3.3 Técnicas para obtener bioetanol.....	15
	3.3.1 Metodologías SHF y SSF.....	17
	3.4 Métodos de fermentación.....	18
	3.5 Producción de bioetanol a partir de los diferentes métodos de hidrólisis enzimática.....	19
	3.5.1 Papa.....	20
	3.5.2 Yuca.....	21
	3.5.3 Camote.....	23
	3.5.4 Otros.....	26
	3.6 Factibilidad económica en la producción de bioetanol.....	28
	3.6.1 Consumo energético.....	29
4.	EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....	29
5.	FUTURO DEL BIOETANOL.....	30
6.	CONCLUSIONES.....	31
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Palabras clave utilizadas para la búsqueda en las bases de datos.....	10
Tabla 2: Composición proximal de distintos tipos de tubérculos <sup>7,11</sup> .....	13
Tabla 3: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de la papa. ....	20
Tabla 4: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de la yuca. ....	22
Tabla 5: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir del camote. ....	24
Tabla 6: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de otros tubérculos. ....	26
Tabla 7: Estadísticas de la parte del tubérculo utilizada para la producción de bioetanol en la literatura investigada. ....	27



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el sector del transporte contribuye en el aumento del consumo de combustibles fósiles en un 60%, aproximadamente. Esto se traduce en emisiones importantes de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, del cual se proyecta un aumento de 31 Gt en 2011 hasta 37 Gt en 2035 <sup>1,2</sup>. De esta manera, en los últimos años se han buscado alternativas limpias, cuya fuente de producción sea ilimitada y accesible, obteniendo como respuesta los biocombustibles, particularmente, el bioetanol <sup>3</sup>.

El bioetanol es el biocombustible de primera generación más utilizado en el mundo. Este es producido a partir de la fermentación de azúcares contenidos en materias primas con alto porcentaje de sacarosa o almidón. Una de sus ventajas es que es completamente renovable, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 80% en comparación con la gasolina <sup>4-6</sup>. También contiene 34.7% de oxígeno, lo que provoca que tenga una mejor eficiencia de combustión, aproximadamente 15% más que la gasolina, produciendo una menor cantidad de sustancias tóxicas. Además, se puede mezclar el etanol con la gasolina convencional en cantidades de 5, 10 y 85% v/v, ayudando a una reducción en el contenido de azufre del combustible y por ende, en la lluvia ácida <sup>7-9</sup>.

Se puede utilizar una variedad de materias primas para la obtención del bioetanol como son la sacarosa, biomasa lignocelulósica y el almidón. Hasta el 2018, los mayores productores a nivel mundial de este biocombustible fueron Estados Unidos y Brasil con aproximadamente 23.98 billones de galones, un 84% de la producción global. La materia prima mayormente utilizada en estos países fue la caña de azúcar y el almidón de maíz <sup>10</sup>. Sin embargo, los almidones a partir de tubérculos y rizomas son muy atractivos por su facilidad de conversión a etanol, amplia disponibilidad en todo el mundo y el rendimiento final de bioetanol es más alto <sup>7,11</sup>.

Se conoce que los tubérculos están compuestos principalmente por almidón con contenidos entre el 60-80%. Esto hace que, a partir de ellos se cubra alrededor del 60% de la producción total de etanol en comparación con el 40% proveniente de los cultivos de caña de azúcar<sup>7</sup>. Por otro lado, este tipo de materia prima es de gran relevancia en las investigaciones en el Ecuador. Esto se debe principalmente a que en la región andina, (Ecuador, Perú, Colombia y Bolivia), los tubérculos son el cultivo con mayor superficie cosechada<sup>12</sup>.

En la literatura existe una diversidad de técnicas, procedimientos y tubérculos utilizados para la producción de bioetanol. Debido a esto, se plantea que la compilación de artículos sobre la producción de este biocombustible a partir de tubérculos puede ayudar a comprender mejor el estado de las investigaciones y verificar si existen todavía necesidades que se puedan abarcar en un futuro. Por ende, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de la literatura científica publicada en los últimos 10 años sobre la producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos, tomando en cuenta los distintos procesos, materias primas, técnicas de fermentación, el papel de los microorganismos y enzimas, y la factibilidad económica.

## 2. METODOLOGÍA

En este estudio se realizó una búsqueda de la literatura en bases de datos indexadas de importancia, tales como Scopus, Science Direct y Springer. Una vez en estas fuentes, se determinó un grupo de palabras clave enfocadas en el tema principal “Producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos”, las cuales se indican en la Tabla 1.

*Tabla 1: Palabras clave utilizadas para la búsqueda en las bases de datos.*

<b>Términos de búsqueda</b>	<b>Cantidad de artículos</b>
Starch AND bioethanol	566
SSF <sup>1</sup> AND tubers	160
Bioethanol AND tuber	333
Bioethanol AND cassava AND SSF	208
Bioethanol AND "sweet potato" AND SSF	102
Bioethanol AND potato AND SSF	315
SHF <sup>2</sup> AND tubers	51
"First generation biofuels"	243
"Second generation biofuels"	772
"Sucrose raw material"	7
"Starch raw material"	38
Feedstock AND bioethanol	1799
<b>Término</b>	<b>Abreviatura</b>
1. Sacarificación y Fermentación simultánea	SSF
2. Hidrólisis y Fermentación secuencial	SHF

Se delimitó la búsqueda en un rango de tiempo, desde 2010-2020, en inglés y español, y el tipo de publicación: revisión literaria, artículo de investigación y perspectiva general. Con los textos obtenidos se evaluó su relevancia para el trabajo actual según los criterios de inclusión, que fueron:

- Los artículos hablan sobre Sacarificación y Fermentación simultánea (SSF) e Hidrólisis y Fermentación secuencial (SHF) mediante tubérculos.
- Se indican los resultados de la producción de bioetanol, específicamente la concentración y el rendimiento.
- El texto muestra información relevante sobre el tipo de tubérculo, enzimas o microorganismos y técnicas empleadas en este proceso.
- El artículo hace referencia a la factibilidad económica y ciclo de vida.

Por otro lado, los criterios de exclusión fueron:

- El texto no se apoya en datos ni referencias de los últimos 10 años.
- El artículo no cuenta con DOI (Digital Object Identifier).

Posteriormente, los resultados se ingresaron en un diario científico y se compararon tomando como referencia al título, autor, año, volumen, DOI, nombre de la revista, palabras claves, resumen del texto y tema del que trataba. Finalmente, se realizó un análisis estadístico en base al año, clase de publicación, tipo y parte del tubérculo utilizado, proceso, concentración y rendimiento final de etanol.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo se basa en un análisis sobre la producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos comparando literatura científica de los últimos 10 años. Por consiguiente, tomando en cuenta los términos de la

Tabla 1, junto con los criterios de inclusión y exclusión, se logró reducir el número de estudios hasta obtener 60 artículos originales de investigación, 11 de revisión literaria y 2 artículos de perspectiva general. Es importante mencionar, que los puntos comparativos que se evaluaron para la elección final de los textos fueron:

- El proceso utilizado, incluyendo el tipo de hidrólisis (ácida o enzimática), y comparando si se trató de sacarificación y fermentación simultánea (SSF), o hidrólisis y fermentación secuencial (SHF).
- Tipo de tubérculo.
- Parte del tubérculo utilizado.

#### 3.1 Tubérculos andinos

Ecuador es uno de los países con mayor diversidad en plantas, incluyendo tubérculos, debido a las condiciones ecológicas como la estacionalidad anual de temperaturas o precipitaciones. Dentro de las especies tuberosas más importantes de la agricultura andina están la papa (*Solanum tuberosum*), camote (*Ipomea batatas*), achira (*Canna edulis*), papa china (*Colocasia esculenta*), entre otros <sup>12</sup>. De las cuales, en el año 2019, la papa tuvo

una superficie total cosechada de 19.976 hectáreas principalmente en las provincias del Carchi, Cotopaxi y Chimborazo <sup>13</sup>. La yuca también es un tubérculo de gran importancia en el Ecuador, cuyos cultivos se dan mayormente en la Costa y Amazonía con una superficie total cosechada de 13.601 hectáreas en el 2019 <sup>14</sup>.

### 3.2 Tipos de tubérculos

Tomando en cuenta la cantidad de literatura encontrada acerca de la producción de bioetanol utilizando tubérculos, se logró establecer un porcentaje para cada tipo de materia prima empleada en este proceso. La papa representa el 17.31% del total de artículos, mientras que la yuca, al igual que el camote, el 32.69%. Otros tubérculos menos convencionales, como el ñame alemán, alcachofa de Jerusalén, patata de Telinga (*Amorphophallus Campanulatus*), canna edulis ker y papa china se encuentran entre el 1.92% y 3.85%. De esta manera, los más relevantes para la producción de bioetanol son el camote y la yuca, seguidos por la papa. No obstante, en la Tabla 2 se muestra la composición de cada tubérculo, indicando así la cantidad de almidón que tienen para ser una fuente potencial de producción de bioetanol.

Tabla 2: Composición proximal de distintos tipos de tubérculos <sup>7,11</sup>.

Tubérculo	Humedad (g %)	Proteínas (g %)	Almidón (%)
Papa	63-83	0.7-4.6	17.5-20
Yuca	59.4	0.7	35
Camote	68.5	1.2	14-27.5
Ñame	56.3-78.6	7.4	20-40
Taro	55.68	1.2	15-25

#### 3.2.1 Papa.

La papa (*Solanum tuberosum*) es un tubérculo nativo de los Andes, principalmente de Perú y Bolivia; sin embargo, también se encuentra en Ecuador, Colombia y el norte de Argentina. Según el Centro Internacional de Papa (CIP), hasta el año 2017, existieron alrededor de 4.500 especies nativas <sup>15</sup>. Para el siguiente año, su producción en la región

andina fue de aproximadamente 9.658.831 toneladas <sup>16</sup>. Convirtiéndose así en el cuarto alimento más cultivado del mundo después del arroz, trigo y maíz <sup>17,18</sup>. Por otro lado, cuando la papa tiene algún tipo de deformidad, corte o su tamaño es pequeño, se considera una papa de desecho, que en Ecuador representa aproximadamente el 12.82% de la producción nacional <sup>19</sup>.

### **3.2.2 Yuca.**

La yuca (*Manihot esculenta*) es un arbusto tropical y subtropical que pertenece a la familia de las Euphorbiaceas y se originó en América del Sur. En Bolivia, su producción fue de 201.375 toneladas en el 2018. Así mismo, en Perú fueron 1.239.741 toneladas, en Colombia 2.223.355 toneladas y para Ecuador 76.892 toneladas <sup>20</sup>. Una de las ventajas que tiene la yuca es su raíz tuberosa ya que es una fuente rica de almidón; es decir, cerca del 90% de su peso en seco está constituido por carbohidratos, dándole una ventaja para procesos fermentativos <sup>21</sup>.

### **3.2.3 Camote.**

El camote (*Ipomea batatas*) es un cultivo tropical y subtropical, que puede adaptarse a regiones templadas. Después de la papa, es el segundo cultivo de raíces más importante a nivel mundial. Pertenece a la familia Convolvaceae y es nativa de América Central y Suramérica <sup>22</sup>. Hasta el año 2018, se conoce que en Bolivia su producción fue de 4.483 toneladas, en Ecuador 3.976 toneladas y la más significativa en Perú con 275.258 toneladas <sup>23</sup>. En los últimos años se ha modificado genéticamente el camote, cambiando su aspecto visual, color y sabor con el objetivo de aumentar el rendimiento de almidón para utilizarlo industrialmente, sobre todo en la producción de etanol <sup>11,24</sup>.

### **3.2.4 Ñame.**

El ñame (*Dioscorea rotundata*) es un tubérculo producido anualmente en África, América y Asia, siendo una excelente fuente de carbohidratos. Debido a esto, el almidón de este

cultivo puede hidrolizarse y fermentarse para obtener etanol <sup>11</sup>. No obstante, el ñame también se da en Sudamérica, principalmente en Brasil, Colombia y Venezuela, en los cuales su producción fue de 718.448 toneladas en el 2018 <sup>25</sup>. El problema que tiene este tubérculo es que existe limitada información sobre su procesamiento y por ende, no se conoce con certeza el potencial para su industrialización <sup>11</sup>.

### **3.2.5 Papa china.**

El taro o papa china (*Colocasia esculenta* L.) es una planta de zonas tropicales y subtropicales. Su producción se dio inicialmente en el norte de Sudamérica y poco a poco fue expandiéndose al resto del mundo <sup>26</sup>. Este tubérculo proviene de la familia de las Aracea, las cuales contienen grandes cantidades de carbohidratos y almidón en comparación con la papa y yuca. Esto puede provocar que en un futuro sea una fuente alternativa principal para la industria. En Colombia, el taro se cultiva en la mayoría de las regiones, obteniendo una producción de 7154.5 toneladas en el año 2013 <sup>27</sup>.

### **3.3 Técnicas para obtener bioetanol**

Tomando en cuenta las diferentes fuentes tuberosas para la producción de bioetanol, se ha establecido que cada una debe seguir un proceso específico de tratamiento hasta llegar a la fermentación <sup>28</sup>. El primer paso es el pretratamiento, el cual se refiere a las acciones mecánicas y físicas para reducir el tamaño de la materia prima y destruir la pared celular con el objetivo de proporcionar un mejor acceso a la hidrólisis y aumentar el área y porosidad de la biomasa <sup>28,29</sup>. Este paso se divide en cuatro categorías que son físico, químico, fisicoquímico y biológico, los cuales dependen de la materia prima para escoger el adecuado <sup>7,5,30</sup>. No obstante, cuando se trata de un sustrato con almidón generalmente el único pretratamiento que se usa es el físico mediante una molienda ya que así se obtiene la harina del tubérculo que se utilizará en el paso posterior.

En este punto, el almidón se calienta con agua para formar un gel muy espeso, generando como resultado la etapa de gelatinización del almidón <sup>5,11</sup>. A continuación, se pasa a la etapa de hidrólisis, en donde los polisacáridos se descomponen en moléculas de azúcares reductores como la glucosa para luego fermentarse y producir etanol. Esta fase es la más crítica en el proceso, ya que la calidad del hidrolizado afectará el producto final <sup>5,31</sup>. El método de hidrólisis que se utiliza para el almidón varía entre ácida y enzimática dependiendo de la composición de la biomasa tuberosa <sup>7</sup>.

La hidrólisis ácida se suele realizar mediante tratamiento con ácido diluido o concentrado. Para los tubérculos, generalmente se emplea el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) u otros como el ácido clorhídrico (HCl) en concentraciones diluidas entre el 0.5 y 1.5% <sup>7</sup>. Por otro lado, la hidrólisis enzimática, como indica su nombre, utiliza enzimas para la conversión del almidón en glucosa y se da en condiciones bajas de pH y temperatura. En esta etapa existen dos pasos básicos, que son la licuefacción, que se da entre 85-105°C (escala de laboratorio) y hasta 165°C (escala industrial) empleando una  $\alpha$ -amilasa termoestable para convertir el almidón en dextrina, maltosa y maltotriosa <sup>7,32</sup>. Luego, la sacarificación ocurre a una temperatura entre 50-60°C, usando una glucoamilasa para convertir los azúcares resultantes de la licuefacción en glucosa <sup>7,33</sup>.

En ciertos trabajos de investigación no se utilizan las enzimas directamente, sino que se reemplazan por microorganismos, de los cuales provienen, por ejemplo, *Aspergillus niger* o *A. oryzae*. El objetivo de esto es prescindir de la etapa de licuefacción para pasar a la sacarificación directamente. Sin embargo, esto afecta en el rendimiento final de etanol obtenido debido a la formación de subproductos no deseados <sup>11,34</sup>.

Al comparar los dos tipos de hidrólisis mencionados anteriormente, varias investigaciones han llegado a la conclusión de que la más conveniente es la enzimática <sup>31</sup>. Esto se debe a que la ácida tiene la gran desventaja de que se debe colocar un sistema



de eliminación o neutralización de ácidos al final del proceso. Así mismo, se debe tomar en cuenta la producción de inhibidores en la degradación de azúcares <sup>7</sup>. Por lo tanto, apenas el 6.90% de los trabajos consultados utilizaron este tipo de hidrólisis. Mientras que, la enzimática requiere menos energía y funciona con enzimas que soportan condiciones ambientales leves (pH 4.8), dando como resultado costos más bajos de mantenimiento. A pesar de que se considera una alternativa respetuosa con el medio ambiente por la materia prima que usa, no hay que olvidar que eso también implica un desafío económico. Sin embargo, con un análisis de planificación adecuado, como empleando combinaciones de métodos de hidrólisis o materias primas y métodos de recolección, sigue siendo la opción más viable. Adicionalmente, la hidrólisis enzimática cuenta con altos rendimientos de bioetanol, entre 75-85%, y con el tiempo se proyectan mejoras (85-95%) <sup>5,31,35</sup>.

### **3.3.1 Procesos de hidrólisis/fermentación**

Cuando se utiliza el proceso enzimático, existen dos posibilidades de hidrólisis y fermentación. Las que más se emplean son hidrólisis y fermentación secuencial (SHF, por sus siglas en inglés) y sacarificación y fermentación simultánea (SSF, por sus siglas en inglés). Las ventajas que tiene el primer método es que cada etapa se puede operar en sus condiciones de reacción óptimas (pH y temperatura), el tiempo de residencia es corto y el sistema es simple <sup>36,37</sup>. No obstante, su limitación es la acción enzimática, pues puede ser inhibida por la acumulación de azúcares, dando como resultado un estrés osmótico en las células de la levadura. Por ende, la producción de bioetanol se reduce y se hace más lenta. Otra desventaja es que al utilizar varios equipos el costo es más alto <sup>3,7,38,39</sup>.

Por otro lado, en la SSF, la principal ventaja que tiene es que supera la inhibición ya que existe un consumo continuo del azúcar, provocando un mayor rendimiento de etanol <sup>3,40</sup>.

Así mismo, previene la contaminación de microbios en el caldo de cultivo, tiene un menor

costo de equipos y utiliza menos enzimas<sup>41,42</sup>. Pero el problema del método SSF es que es necesario tener condiciones de operación adecuadas como pH, temperatura y concentración tanto para las enzimas como el microorganismo, que puede convertirse en un reto en ciertos casos<sup>28,36</sup>.

Tomando en cuenta los puntos anteriores acerca de las diferentes metodologías junto con la bibliografía encontrada, se logró establecer que las técnicas más utilizadas son la SHF y SSF, y minoritariamente, la hidrólisis ácida. La primera se utiliza en un 39.66%, y la segunda un 48.28% de las investigaciones. Adicionalmente, se tomó en consideración otros procesos que se encontraban en la literatura como el sistema de un solo paso para fermentación, estado sólido y SSF parcial, pero no representan un valor significativo ya que son el 1.72% de los trabajos encontrados. De esta manera, los porcentajes indican que la técnica más usada es la Sacarificación y Fermentación Simultánea, SSF, debido a ser más eficiente y los bajos costos de proceso.

### **3.4 Métodos de fermentación**

Para la producción de bioetanol a partir de tubérculos hay tres técnicas que se emplean: por lotes, semi-continuo y continuo. La elección de la técnica correcta depende de las propiedades cinéticas de los microorganismos, el tipo de hidrolizado y aspectos económicos<sup>35,43</sup>. El método por lotes es el más simple puesto que durante la fermentación no se añade nada a excepción de soluciones ácidas o básicas en caso de ser necesario controlar el pH. Sin embargo, el proceso por lotes requiere varios recipientes para controlar el trabajo, proporcionando rendimientos más bajos<sup>44-46</sup>.

El segundo modo, semi-continuo, es ampliamente utilizado para la producción de bioetanol a escala industrial debido a que tiene un menor tiempo de fermentación, mantiene las condiciones de pH, temperatura y oxígeno en niveles específicos, existe una menor contaminación del caldo y produce mayores cantidades de etanol<sup>7,35,47</sup>. No

obstante, esta forma de operación está limitada por la velocidad que no es constante y puede provocar que disminuya la productividad del etanol <sup>46,48</sup>. Finalmente, en la fermentación continua el proceso es más complejo ya que requiere poco tiempo para la limpieza del equipo, recarga y esterilización. Además, proporciona una cantidad aproximadamente tres veces mayor de bioetanol en comparación con la fermentación por lotes. A pesar de ello, el problema principal de esta técnica es que puede existir una contaminación significativa del cultivo <sup>7,46,49,50</sup>.

En la literatura además de utilizar las técnicas mencionadas anteriormente, se emplea un método particular de fermentación para lograr altas concentraciones de bioetanol y es el VHG (very high gravity). Este proceso se emplea únicamente en un medio que tiene una alta concentración de azúcar y más del 30% de sólidos <sup>51</sup>. Según estudios para la misma cantidad de volumen de jugo de azúcar fermentado, se ha obtenido un 23% (v/v) más de bioetanol en comparación con el proceso convencional. De igual manera, reduce los costos de producción y consumo de energía, sobre todo en el consumo de agua. Sin embargo, el método VHG causa estrés al microorganismo, provocando que la fermentación no se dé adecuadamente. Actualmente, existen pocos estudios ya que su tecnología se encuentra en desarrollo <sup>52-54</sup>. No obstante, de los 73 artículos analizados para este proyecto, únicamente 9 estudios utilizan esta técnica. De este grupo, 2 fueron en la yuca, y 7 en el camote, los cuales representan el 77.77%.

### **3.5 Producción de bioetanol a partir de los diferentes procesos de hidrólisis y fermentación**

Al analizar los resultados obtenidos de la revisión, se pudo concluir que el proceso más utilizado para la producción de bioetanol con tubérculos es el SSF, debido a las altas concentraciones de producto. Dentro de la literatura encontrada, para la papa una de las concentraciones más altas de etanol fue de 37.93 g/L con un rendimiento del 0.41 g etanol/g almidón <sup>55</sup>. Por otro lado, la yuca obtuvo cantidades de bioetanol altas tales como

80.83 g/L y 541.2 g/kg almidón con un rendimiento de 95.8% y 95.4%, respectivamente <sup>56,57</sup>. De igual manera, se encontró que para el camote el etanol máximo fue de 172 g/kg de sustrato y 128.51 g/L con un rendimiento entre 90% y 95% <sup>58-59</sup>, respectivamente. Finalmente, los otros tipos de tubérculos (*Canna edulis* ker, Ñame alemán, Alcachofa de Jerusalén y Taro) alcanzaron una concentración entre 43 y 84 g/L con un rendimiento de etanol entre el 87 y 96% <sup>60-63</sup>. Es importante mencionar, que cada investigación fue realizada con cantidades y tipos diferentes de enzimas, microorganismos y materia prima, lo que dificulta la comparación entre los diferentes estudios. Así mismo, se utilizaron distintos métodos analíticos para medir la cantidad final de bioetanol y rendimiento, los cuales no siempre son reportados en las mismas unidades.

### 3.5.1 Papa.

Analizando la Tabla 3, se puede observar que las partes del tubérculo mayormente utilizadas en cualquier proceso para la producción de bioetanol a partir de papa son los residuos de cáscara y pulpa. En la sacarificación y fermentación simultánea (SSF) el rendimiento y la concentración final de etanol son más altos. Por otro lado, el tiempo de fermentación suele variar entre 16 y 120 h, dependiendo del microorganismo empleado. Generalmente, para la SHF, SSF o hidrólisis ácida es la levadura, *S. cerevisiae*, aunque también se usa *Aspergillus niger*, *Zymomonas mobilis*, entre otros.

Tabla 3: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de la papa.

Referencia	Parte del tubérculo	Proceso	Microorganismo	Tiempo de fermentación (h)	Concentración final de etanol	Rendimiento
M. Gao et al. (2012) <sup>64</sup>	Residuo de pulpa	SHF	<i>S. cerevisiae</i> IR-2	---	20 g/L	---
M. Hanshem et al. (2010) <sup>65</sup>	Residuo de almidón	Hidrólisis ácida	<i>S. cerevisiae</i> Y-1646 <i>S. cerevisiae</i> comercial	16	Fermentación anaeróbica: 3.61 g/L	5.52 g/L

					Semi-anaeróbica: 3.47-3.62 g/L	
G. Izmirliglu et al. (2017) <sup>55</sup>	Residuo de pulpa	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>van Tieghem</i>	72	37.93 g/L	0.41 g etanol/g almidón
N. Chohan et al. (2020) <sup>66</sup>	Residuo de cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>BY4743</i>	16	22.54g/L	0.32 g/g
A. López-Vásquez et al. (2019) <sup>67</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF *PC: Photocatalytic *GE: Gelatinización	<i>S. cerevisiae</i>	48	PC-GE: 128.21 g/L GE-PC: 106.74 g/L sin PC: 85.91 g/L	PC-GE: 164.2 g/g GE-PC: 134.6 g/g sin PC: 110.4 g/g
Y. Liu et al. (2016) <sup>68</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SHF SSF	<i>Rhizopus Japonicus</i> BCRC 33070 <i>Aspergillus awamori</i> BCRC 31509 <i>Zymomonas mobilis</i>	72	SHF: 2.99 g/L SSF: 17.71 g/L SSF en biorreactor: 21.68 g/L.	---
D. Arapoglu et al. (2010) <sup>69</sup>	Residuos cáscara	Hidrólisis ácida Hidrólisis enzimática	<i>S. cerevisiae</i> var. <i>Bayanus</i>	48	H. ácida: 6.97 g/L H. enzimática: 7.58 g/L	H. ácida: 46.3%, H. enzimática: 46%
A. Chintagunta et al. (2015) <sup>70</sup>	Residuos puré Residuos cáscara	SSF	<i>Aspergillus niger</i> <i>S. cerevisiae</i>	24 120	Puré: 9.30% v/v Cáscara: 6.18% v/v	Puré: 73.4 g/L Cáscara: 48.76 g/L
Y. Lim et al. (2013) <sup>71</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	60	14.92% v/v	91%

### 3.5.2 Yuca.

Mediante la Tabla 4 se puede concluir que en las investigaciones para la producción de bioetanol a partir de yuca se utiliza principalmente al tubérculo completo sin cáscara. El

proceso que se maneja en estos estudios en su mayoría es el SSF debido a su mejor rendimiento y concentración final de etanol, seguido por el SHF. Por otra parte, el microorganismo utilizado es el mismo para todas las técnicas, *S. cerevisiae*, y el tiempo de fermentación se encuentra entre 24 y 116 horas.

*Tabla 4: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de la yuca.*

Referencia	Parte del tubérculo	Proceso	Microorganismo	Tiempo de fermentación (h)	Concentración final de etanol	Rendimiento
Hargono et al. (2017) <sup>72</sup>	Tubérculo completo sin cáscara (Yuca dulce y amarga)	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	72	Yuca dulce: 71.84 g/L Yuca amarga: 68.65 g/L	---
M. Esquivia Mercado et al. (2014) <sup>73</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SHF	<i>S. cerevisiae</i>	48	14.7% v/v	93.42%
G. Choi et al. (2010) <sup>56</sup>	Chips	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>CHF0321</i>	Por lotes: 48 Repetición por lotes: 24 Continuo: 78.8	Por lotes: 80.83 g/L Repetición: 65.89 g/L Continuo: 78.8 g/L	Por lotes: 95.8% Repetición: 90.25% Continuo: 86.2%
S. Shanavas et al. (2011) <sup>57</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SHF SSF	<i>S. cerevisiae</i>	48	SHF: 541.2 g/kg SSF: 533 g/kg	SHF: 95.4% SSF: 93.9%
B. Yinglign et al. (2011) <sup>74</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	72	15.03 wt%	---
F. Ajibola et al. (2012) <sup>75</sup>	Tubérculo completo con cascara (2 tipos: TMS30572, <i>Idileru</i> )	SHF	<i>S. cerevisiae</i> (2 cepas: <i>Vino de palma</i> , <i>Levadura de panaderia</i> )	72	TMS-Palma: 2.34 TMS-Levadura: 1.73 Idileru-Palma: 2.00 Idileru-Levadura: 1.53	TMS-Palma: 5.85 TMS-Levadura: 4.33 Idileru-Palma: 5.00 Idileru-Levadura: 3.83
A. Moshi et al. (2015) <sup>76</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>Calaromator Bolivensis</i>	---	33 g/L	85%

T. Siriwong et al. (2019) <sup>77</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>TISTR 5339</i>	72	27.4 g/L	57.58%
C. Virunanon et al. (2013) <sup>78</sup>	Tubérculo completo sin cáscara (CP) Pulpa con agua residual (CWW)	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>C. butyricum</i>	116	CP con S.: 8.76 g/L CP+CWW con S.: 12.92 g/L CWW con S.: 4.09 g/L CP con C.: 8.98 g/L CP+CWW con C.: 1.64 g/L CWW con C.: 1.76 g/L.	CP con S.: 27.9% CP+CWW con S.: 33.3% CWW con S.: 50.4% CP con C.: 30.4% CP+CWW con C.: 19.2% CWW con C.: 35.4%.
A. Poonsrisawat et al. (2017) <sup>79</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SHF SSF	<i>S. cerevisiae</i>	96	6.98% w/v	96.7%
J. Wangpor et al. (2017) <sup>80</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SHF	<i>S. cerevisiae</i> <i>Zymomonas mobilis</i>	72	2 litros ( <i>S. cerevisiae</i> ): 45.2 g/L 2 litros ( <i>Z. mobilis</i> ): 30.9 g/L 10 litros ( <i>S. cerevisiae</i> ): 43.5 g/L	2 litros ( <i>S. cerevisiae</i> ): 52.1% 2 litros ( <i>Z. mobilis</i> ): 30.3% 10 litros ( <i>S. cerevisiae</i> ): 85.4%
A. Moshi et al. (2015) <sup>81</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>Aspergillus sp</i> *Utiliza 4 concentraciones	24	1: 11.4 g/L 2: 65.7 g/L 3: 10.8 g/L 4: 75.5 g/L	1-2: 14% 3-4: 10-95%
G. Aruwajoye et al. (2020) <sup>82</sup>	Residuos de cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	---	Sin hidrólisis: 16.42 g/L Con hidrólisis: 14.56 g/L	Sin hidrólisis: 143.31 g/kg Con hidrólisis: 161.61 g/kg
E. Elemike et al. (2015) <sup>83</sup>	Residuos celulósicos	SHF Hidrólisis ácida	<i>S. cerevisiae</i>	---	2.7 g etanol/15 g residuos	32.4%
S. Pervez (2014) <sup>84</sup>	Tubérculo	SHF	<i>S. cerevisiae</i>	48	---	84%

### 3.5.3 Camote.

Para el camote (Tabla 5), el tubérculo completo con y sin cáscara son las materias primas más relevantes en la literatura encontrada. No obstante, el proceso que se utiliza difiere significativamente de la papa y yuca puesto que el SHF es mayormente empleado que el SSF. A pesar de ello, la concentración final de bioetanol y el rendimiento son más altos empleando la técnica SSF. Por otro lado, el microorganismo principal que se maneja en este proceso es el *S. cerevisiae*, aunque también se usan otros como *Z. mobilis*, *Aspergillus niger* u *oryzae* y su tiempo de fermentación se extiende hasta las 312 h.

Tabla 5: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir del camote.

Referencia	Parte del tubérculo	Proceso	Microorganismo	Tiempo de fermentación (h)	Concentración final de etanol	Rendimiento
W. Lee et al. (2012) <sup>85</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	Sistema simultáneo de un solo paso para la fermentación	<i>Aspergillus oryzae</i> <sup>a</sup> <i>M. purpureus</i> <sup>b</sup> <i>S. cerevisiae</i> <sup>c</sup>	<sup>c</sup> + ( <sup>a</sup> ó <sup>b</sup> ): 312 <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (2:1): 264 <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (1:2): 216	<sup>c</sup> + ( <sup>a</sup> ó <sup>b</sup> ): 3.05-3.17% v/v <i>S. cerevisiae</i> + <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (2:1): 3.84% v/v <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (1:2): 4.08% v/v	<sup>c</sup> + ( <sup>a</sup> ó <sup>b</sup> ): 0.31-0.37 <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (2:1): 0.39 <sup>c</sup> + <sup>a</sup> + <sup>b</sup> (1:2): 0.41
A. Lopes et al. (2018) <sup>86</sup>	Tubérculo completo sin cascara (UGA 05)	SHF	<i>S. cerevisiae</i>	72	Con nutrientes: 8.11-13.45 °GL Sin nutrientes: 10.31-14.84 °GL	---
A. Lopes et al. (2018) <sup>86</sup>	Tubérculo completo sin cascara (UGA 05, UGA 77)	SHF	<i>S. cerevisiae</i> (Fresca y seca)	96	UGA 05 seca: 6.85-16.34 °GL UGA 77 seca: 18.67-20.30 °GL UGA 05 fresca: 17.85- 18.60 °GL UGA 77 fresca: 22.50- 32.37 °GL	---
J. Diaz et al. (2014) <sup>87</sup>	Tubérculo completo sin	SHF SSF	<i>S. cerevisiae</i> <i>Kluyveromyces marxianus</i>	SHF: 72 SSF blanco: 48	SHF- <i>S. cerevisiae</i>	---



	cáscara (Blanco y morado)			SSF morado: 72	blanco: 0.61 g/g SHF-K. <i>marxianus</i> morado: 0.57 g/g SSF-S. <i>cerevisiae</i> blanco: 96.9 g/L	
C. Lareo et al. (2013) <sup>88</sup>	Tubérculo completo sin cáscara Tubérculo completo con cáscara	SHF SSF	<i>S. cerevisiae</i>	16	Sin cáscara (1:2.2): 100 g/L Con cáscara (1:2): 99 g/L	Sin cáscara: 92% Con cáscara: 79%
M. Swai et al. (2013) <sup>58</sup>	Tubérculo completo sin cáscara	Estado sólido de fermentación	<i>S. cerevisiae</i> <i>Trichoderma sp.</i>	72	172 g/kg	95%
L. Zhang et al. (2011) <sup>59</sup>	Tubérculo completo con cáscara	SHF SSF PSSF (Parcial)	<i>S. cerevisiae</i>	SHF-PSSF: 30 SSF: 27	SSF-PSSF: 128.51 g/L SHF: 93.56 g/L	SSF-PSSF: 90% SHF: 67.25%
A. Montefusco et al. (2014) <sup>89</sup>	Tubérculo completo con cascara (Amarillo, blanco, naranja)	---	<i>S. cerevisiae</i>	32	Amarillo: 2032 L/ha (anual)	Amarillo: 381 L/ton (anual)
Y. Cao et al. (2011) <sup>90</sup>	---	SHF SSF	<i>S. cerevisiae</i>	45	15.5% v/v	87.8%
P. Zhang et al. (2013) <sup>91</sup>	Tubérculo completo con cáscara	SSF	<i>Zymomona mobilis</i> <i>Aspergillus niger</i>	72	14.4 g/100g	87.2%
S. Srichuwong et al. (2012) <sup>92</sup>	Tubérculo completo con cáscara Tubérculo completo sin cáscara (K159, DYC50)	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	48 72	50°C-K159: 13.2% v/v 60-100°C: 15.1-15.5% v/v (48 h) 60-100°C: 14.4-15.7% v/v (72 h) DYC50-50-70°C: 7.1-7.4% v/v	50°C-K159: 76.5% 60-100°C: 88.8-91.2% (48 h) 60-100°C: 90.6-92.4% (72 h) DYC50-70°C: 41-43%

					80°C: 11.1% v/v 90°C: 16.1% v/v 100°C: 15.3% v/v (48h)	80°C: 63.8% 90°C: 92.5% 100°C: 87.9% (48h)
A. Dewan et al. (2013) <sup>93</sup>	Residuos pulpa	SHF	<i>Zymomona mobilis</i>	18	49.07 g/L	87.2%
C. Schweinberger et al. (2016) <sup>94</sup>	Tubérculo completo con cáscara	SHF	<i>S. cerevisiae</i>	19	A los 39 días (Baño maría): 0.0738 L etanol/L experimental A los 39 días (Microondas): 0.0782 L/L	---
W. Duvernay et al. (2013) <sup>95</sup>	Tubérculo completo sin cáscara Tubérculo completo con cáscara	SHF	<i>S. cerevisiae</i>	72	Sin sal: 67.8 g/L Con sal: 62.6 g/L Camote fresco sin sal: 34.9 g/L Camote fresco con sal: 33.6 g/L	---

### 3.5.4 Otros.

Mediante la Tabla 6 se puede observar que para otros tipos de tubérculos que no sean la papa, yuca y camote se utiliza la materia prima completa con y sin cáscara. Así mismo, el proceso que más se destaca es el SSF y el microorganismo es el *S. cerevisiae* con un tiempo de fermentación entre 8 y 96 h.

Tabla 6: Resultados obtenidos de la literatura de la concentración final de etanol y su rendimiento a partir de otros tubérculos.

Referencia	Tubérculo	Parte del tubérculo	Proceso	Microorganismo	Tiempo de fermentación (h)	Concentración final de etanol	Rendimiento
Y. Huang et al. (2013) <sup>60</sup>	Canna edulis Ker	Tubérculo completo con cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	20.5	83.98 g/kg	94.5%
R. López et al. (2016) <sup>61</sup>	Ñame Alemán	Tubérculo completo sin cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i> (Ethanol Red)	8	0.139 L/kg	6.2% v/v

Y. Wang et al. (2015) <sup>62</sup>	Alcachofa de Jerusalén	Tubérculo completo con cáscara	SSF	<i>S. cerevisiae</i>	72	84.3 g/L	88.6%
W. Wu et al. (2015) <sup>63</sup>	Papa China	Residuos de cáscara	SHF SSF	<i>K. marxianus</i>	22	SHF: 43.46 g/L SSF: 48.98 g/L	SHF: 87.83% SSF: 95.83%
E. Praputri et al. (2019) <sup>96</sup>	Papa China	Tubérculo completo con cáscara	Hidrólisis ácida SHF	<i>S. cerevisiae</i>	96	19.10%	---
Kusmiyati et al. (2015) <sup>97</sup>	Iles-Iles	---	---	<i>S. cerevisiae</i>	72	50-80 g/L	---

En la Tabla 7 se puede observar que las partes más empleadas del tubérculo para la producción de bioetanol en la literatura son el tubérculo completo con y sin cáscara, y los residuos de cáscara y pulpa. Esto se debe a que la mayoría de las investigaciones sacan un gran porcentaje de almidón proveniente de la harina de la pulpa del tubérculo, ayudando así a tener un mejor rendimiento de etanol. Así mismo, se puede ver que existe un aprovechamiento de los residuos orgánicos, convirtiéndose en una estrategia ambiental y económica. Lo que se traduce, en una revalorización de los residuos <sup>98</sup>. Puesto que hay una diversidad de residuos utilizados para este proceso, se puede plantear que son una importante alternativa para la producción de biocombustibles <sup>99</sup>.

*Tabla 7: Estadísticas de la parte del tubérculo utilizada para la producción de bioetanol en la literatura investigada.*

<b>Parte del tubérculo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Completo sin cáscara	47.83
Completo con cáscara	23.91
Residuos cáscara	10.87
Residuos de pulpa	6.52
Residuos celulósicos	2.17
Residuos de almidón	2.17
Residuos puré	2.17
Chips	2.17
Pulpa con agua residual	2.17

### 3.6 Factibilidad económica en la producción de bioetanol

Recientemente, se han realizado varios estudios acerca del análisis económico de la producción de bioetanol a partir de tubérculos andinos. Sin embargo, no existe una conclusión puntual debido a que la materia prima, tecnología y el método de estudio son distintos en cada publicación. Para conocer los costos totales de producción, se debe incluir los costos de operación, mano de obra, tubérculos, enzimas, microorganismos, equipos, tipo de planta, ubicación y gastos generales, entre otros. Un ejemplo de esto es el camote, donde el pretratamiento de la materia prima tiene un costo en la producción total entre el 20-40%, la cosecha es el 25% y las enzimas entre 19-22%<sup>53,93</sup>. En Canadá el valor del bioetanol proveniente de este tubérculo oscila entre 0.44 y 1.40\$/L dependiendo de la técnica que se utilice<sup>94</sup>.

Por otro lado, según estudios en Colombia el rendimiento anual en litros por hectárea utilizando caña de azúcar es de 4.900 L/ha, pero el de la yuca es de 6.000 L/ha. Lo cual indica que si se invierte más en la plantación se obtendrá mayores cantidades de bioetanol proporcionando un mayor ingreso<sup>100</sup>. De igual manera, en Colombia se realizó un análisis económico en base a la papa para la producción de un litro de etanol. El porcentaje del costo de la materia prima fue de 32.59%, la mano de obra 31.08% y los costos indirectos de fabricación 36.33%, dando como resultado un ingreso de 6.18\$ por cada litro de bioetanol<sup>101</sup>. Por otra parte, en Brasil, empleando la yuca el valor de la materia prima fue de 131 \$/ton, el proceso tuvo un costo entre 0.04-0.62\$/L y el precio de venta del bioetanol entre 0.10-0.88\$/L<sup>102</sup>.

No obstante, para comparar el costo del bioetanol a partir de tubérculos con el producido mediante el bagazo de caña de azúcar o biomasa lignocelulósica, se debe tomar en cuenta que la materia prima del segundo grupo representa aproximadamente el 30 y 40% del coste total<sup>3,103</sup>. Por ende, en México el etanol de caña de azúcar cuesta alrededor de 1.34

\$/galón, es decir, 0.35 \$/L <sup>104</sup>. Mientras que, en Estados Unidos, el de lignocelulosa tiene un precio de 2.47 \$/galón ó 0.65 \$/L <sup>103</sup>. En base a esto, la cantidad de producto final obtenido es la principal diferencia con los tubérculos.

### **3.6.1 Consumo energético.**

Para hablar acerca del consumo energético que provoca la producción de bioetanol mediante tubérculos, se toma en cuenta al camote como materia prima ya que la mayoría de las revisiones literarias se basan principalmente en este. Para el tubérculo completo, la trituración representa un 0.2%, la conversión de azúcar y fermentación 16.1% y la recuperación de etanol un 83.7% del consumo de energía. Esto en términos energéticos significa 0.1, 2.06 y 10.68 (GJ/m<sup>3</sup> etanol) respectivamente. No obstante, para la harina del camote el porcentaje de consumo de la trituración fue de 0.3%, secado 68.1%, conversión y fermentación <0.1% y recuperación de etanol 31.6%. Lo que significa 0.11, 24.45, 0.01 y 11.34 (GJ/m<sup>3</sup> etanol) para cada etapa. En base a estos valores se puede establecer que el consumo de energía para la producción con harina fue mayor, 36 (GJ/m<sup>3</sup> etanol), en comparación con el tubérculo completo, (13 GJ/m<sup>3</sup> etanol). Esto se debe a que se necesita más energía para secar y moler correctamente la materia prima <sup>24</sup>.

## **4. EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL**

Los tubérculos tienen una contribución significativa en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la producción de biocombustibles <sup>105</sup>. Para evaluar si tienen efecto positivo en el ambiente, los puntos que se toman en cuenta son: Potencial de calentamiento global (GWP), Potencial de oxidación fotoquímica (POCP), Potencial de eutrofización (EP) y Potencial de acidificación (AP). Según investigaciones la mayoría de los tubérculos son capaces de reducir las primeras categorías entre un 28 y 42% comparado con la gasolina. Sin embargo, esto no sucede con los dos últimos parámetros,

pues, al aplicar fertilizantes nitrogenados en los cultivos, se puede aumentar dichas emisiones <sup>105</sup>. El proceso de conversión es el que más contribuye a los gases de efecto invernadero, pero si se escoge la fuente de energía correcta, el ahorro en las emisiones puede ser entre el 26 y 34% <sup>106</sup>. Es importante mencionar que no todos los estudios de ciclo de vida son iguales puesto que dependen del enfoque que utilicen, es decir, incluyendo o no todas las operaciones del proceso desde la obtención de materias primas hasta la eliminación de residuos.

## **5. FUTURO DEL BIOETANOL**

Actualmente, todo lo relacionado con bioenergía está ganando importancia en las actividades del diario vivir. Debido a esto, se plantea que los biocombustibles van a ser los que más crezcan ya que cada vez los gobiernos están buscando alternativas más verdes para el transporte <sup>107</sup>. A pesar de que la producción de bioetanol de primera generación es lo que más destaca, la competencia con la industria alimenticia y el aumento de precios de la materia prima son el problema para seguir adelante. Debido a esto, se ha planteado la integración de los procesos de producción de biocombustibles de segunda generación con los de primera. Esto puede generar beneficios tecnológicos, ambientales y sobre todo económicos ya que para el bioetanol de segunda generación el costo de inversión es alto al considerar su producción de manera individual <sup>3,107,108</sup>.

Se plantea que la materia prima representa aproximadamente el 30% del costo de producción para el bioetanol de primera generación y al integrarlo con el de segunda se puede reducir el valor de la logística como el transporte, fabricación, entre otros. De igual manera, puede aumentar el rendimiento y la productividad, y disminuir la demanda de energía puesto que se integrarán operaciones como el pretratamiento, la conversión de azúcar, fermentación y destilación. Es importante mencionar, que en la etapa de fermentación se está investigando la posibilidad de incorporar otras rutas bioquímicas y

termoquímicas porque esto permitiría encontrar la tecnología adecuada en la producción 3,107 .

## 6. CONCLUSIONES

Al analizar la concentración final de bioetanol, así como su rendimiento obtenidos en este estudio, se pudo observar que la producción de bioetanol a partir de tubérculos como la papa, camote y yuca mediante la sacarificación y fermentación simultánea (SSF) tiene un gran potencial de escalamiento. A pesar de ello, el avance de esta área de investigación se ve afectado por una serie de factores que son importantes abordar en futuros artículos, pues estos permitirían tener comparaciones más objetivas para poder concluir certeramente sobre el estado del arte. Uno de los componentes más relevantes fue la falta de información de especificaciones del proceso utilizado, como el tiempo de fermentación, y algunos resultados de significancia, como la concentración final o rendimiento de bioetanol. De igual manera, no existe un consenso definido de unidades en las variables de entrada y resultados, por ejemplo, algunos artículos sobre el camote, dan valores como 8.11°GL, 100 g/L y 15.5% v/v <sup>86,88,90</sup>. En base a esto, es necesario establecer una metodología común de análisis de los resultados para este tipo de investigaciones. Adicionalmente, la región Andina cuenta con una variada diversidad de raíces y tubérculos importantes aún sin explorar, por lo que existe la posibilidad de investigar otros tipos como el melloco (*Ullucus tuberosus*), la zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*) y la mashua (*Tropaeolum tuberosum*) para la producción de bioetanol. Así mismo, se requiere evaluar la oportunidad de reemplazar las enzimas por microorganismos para los procesos de licuefacción y sacarificación que podría resultar en una reducción de costos, y un aumento en el rendimiento del proceso.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Intergovernmental panel on climate change, I. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. in *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. (2013).
2. Ho, D. P., Ngo, H. H. & Guo, W. A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresour. Technol.* **169**, 742–749 (2014).
3. Ayodele, B. V., Alsaffar, M. A. & Mustapa, S. I. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *J. Clean. Prod.* **245**, 118857 (2019).
4. Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I. & Ortiz-Ojeda, J. C. Producción de biodiesel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética? *Ra Ximhai* **8**, 93–100 (2012).
5. Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H. & Sebayang, A. H. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **66**, 631–653 (2016).
6. Costa, J. A. V. & de Morais, M. G. The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. *Bioresour. Technol.* **102**, 2–9 (2011).
7. Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N. & Faruq, G. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **71**, 475–501 (2017).
8. Nigam, P. S. & Singh, A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog. Energy Combust. Sci.* **37**, 52–68 (2011).
9. Bušić, A. *et al.* Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: a Review. *Food Technol. Biotechnol.* **56**, 289–311 (2018).
10. Center for Sustainable Systems. *Biofuels*. [http://css.umich.edu/sites/default/files/Biofuels\\_CSS08-09\\_e2019.pdf](http://css.umich.edu/sites/default/files/Biofuels_CSS08-09_e2019.pdf) (2019).
11. Thatoi, H., Dash, P. K., Mohapatra, S. & Swain, M. R. Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review. *Int. J. Sustain. Energy* **35**, 443–468 (2016).
12. Pacheco, M. T., Hernández-Hernández, O., Moreno, F. J. & Villamiel, M. Andean tubers grown in Ecuador: New sources of functional ingredients. *Food Biosci.* **35**, 100601 (2020).
13. INEC. *Boletín Técnico: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, 2019*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin\\_Tecnico\\_ESPAC\\_2019.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin_Tecnico_ESPAC_2019.pdf) (2020).
14. INEC. *Tabulados de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/> (2019).
15. International Potato Center. *Hechos y cifras sobre la papa*. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/87957/CIP-Hechos-y-cifras-sobre-la-papa-Espanol-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Las papas son una fuente,ingesta diaria recomendada de fibra.> (2017).
16. FAOSTAT. *Producción de Papa en América del Sur*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (2018).
17. Suquilanda, M. B. *Producción orgánica de cultivos andinos*.



- [http://www.mountainpartnership.org/fileadmin/user\\_upload/mountain\\_partnership/docs/1\\_produccion\\_organica\\_de\\_cultivos\\_andinos.pdf](http://www.mountainpartnership.org/fileadmin/user_upload/mountain_partnership/docs/1_produccion_organica_de_cultivos_andinos.pdf) (2010).
18. FAOSTAT. *Estadísticas sobre cultivos (producción) en el mundo*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (2018).
  19. Delgado, L., Schuster, M. & Torero, M. The Reality of Food Losses: A New Measurement Methodology. *Int. Food Policy Res. Inst.* **40** (2017) doi:10.1016/j.bmcl.2012.04.004.
  20. FAOSTAT. *Producción de Yuca en América del Sur*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (2018).
  21. Sivamani, S. *et al.* Evaluation of the potential of cassava-based residues for biofuels production. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* **17**, 553–570 (2018).
  22. International Potato Center. *Hechos y cifras sobre el camote*. <http://agajunkcarbuying.com/blog/hechos-y-cifras-sobre-el-reciclaje-de-coches.html> (2017).
  23. FAOSTAT. *Producción de Batata en América del Sur*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (2018).
  24. Ferrari, M. D., Guigou, M. & Lareo, C. Energy consumption evaluation of fuel bioethanol production from sweet potato. *Bioresour. Technol.* **136**, 377–384 (2013).
  25. FAOSTAT. *Producción de Ñame en América del Sur*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (2018).
  26. Púa, A. L., Barreto, G. E., Zuleta, J. L. & Herrera, O. D. Nutrient analysis of taro root (*Colocasia esculenta* Schott) in the dry tropics of Colombia. *Inf. Tecnol.* **30**, 69–76 (2019).
  27. Leonardo, N. & Cundumi, I. Efecto de abono orgánico y densidad de siembra en crecimiento y producción de papa china (*Colocasia esculenta* L.). *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.* 139–147 (2016) doi:10.22490/21456453.1535.
  28. Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M. & Negro, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresour. Technol.* **101**, 4851–4861 (2010).
  29. Wyman, C. E. *et al.* Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.* **96**, 1959–1966 (2005).
  30. Mosier, N; Wyman, C; Dale, B; Elander, R; Lee, Y.Y; Holtzapple, M; Ladisch, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* **96**, 673–686 (2005).
  31. Ferreira, S., Duarte, A. P., Ribeiro, M. H. L., Queiroz, J. A. & Domingues, F. C. Response surface optimization of enzymatic hydrolysis of *Cistus ladanifer* and *Cytisus striatus* for bioethanol production. *Biochem. Eng. J.* **45**, 192–200 (2009).
  32. Lamsal, B. P., Wang, H. & Johnson, L. A. Effect of corn preparation methods on dry-grind ethanol production by granular starch hydrolysis and partitioning of spent beer solids. *Bioresour. Technol.* **102**, 6680–6686 (2011).
  33. Plumier, B. M., Danao, M. G. C., Rausch, K. D. & Singh, V. Changes in unreacted starch content in corn during storage. *J. Stored Prod. Res.* **61**, 85–89 (2015).
  34. Dasgupta, D. *et al.* Design and optimization of ethanol production from bagasse pith hydrolysate by a thermotolerant yeast *Kluyveromyces* sp. IPE453 using response surface methodology. *Springerplus* **2**, (2013).
  35. Balat, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Convers. Manag.* **52**, 858–875 (2011).
  36. Phwan, C. K. *et al.* Overview: Comparison of pretreatment technologies and

- fermentation processes of bioethanol from microalgae. *Energy Convers. Manag.* **173**, 81–94 (2018).
37. Sarkar, J. & Bhattacharyya, S. Application of graphene and graphene-based materials in clean energy-related devices Minghui. *Arch. Thermodyn.* **33**, 23–40 (2012).
  38. Nikolić, S., Mojović, L., Pejin, D., Rakin, M. & Vukašinović, M. Production of bioethanol from corn meal hydrolyzates by free and immobilized cells of *Saccharomyces cerevisiae* var. *ellipsoideus*. *Biomass and Bioenergy* **34**, 1449–1456 (2010).
  39. Kadhum, H. J., Rajendran, K. & Murthy, G. S. Effect of solids loading on ethanol production: Experimental, economic and environmental analysis. *Bioresour. Technol.* **244**, 108–116 (2017).
  40. Mithra, M. G., Jeeva, M. L., Sajeev, M. S. & Padmaja, G. Comparison of ethanol yield from pretreated lignocellulo-starch biomass under fed-batch SHF or SSF modes. *Heliyon* **4**, e00885 (2018).
  41. Vohra, M., Manwar, J., Manmode, R., Padgilwar, S. & Patil, S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *J. Environ. Chem. Eng.* **2**, 573–584 (2014).
  42. Taylor, M. P. *et al.* Thermophilic ethanogenesis: future prospects for second-generation bioethanol production. *Trends Biotechnol.* **27**, 398–405 (2009).
  43. Chandel, A. K. *et al.* Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol. Mol. Biol. Rev.* **2**, 14–32 (2007).
  44. Puligundla, P., Smogrovicova, D., Mok, C. & Obulam, V. S. R. A review of recent advances in high gravity ethanol fermentation. *Renew. Energy* 1366–1379 (2019) doi:10.1016/j.renene.2018.06.062.
  45. de Araujo Guilherme, A., Dantas, P. V. F., Padilha, C. E. de A., dos Santos, E. S. & de Macedo, G. R. Ethanol production from sugarcane bagasse: Use of different fermentation strategies to enhance an environmental-friendly process. *J. Environ. Manage.* **234**, 44–51 (2019).
  46. Toor, M. *et al.* An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere* **242**, 125080 (2020).
  47. Gunther, J. C., Seborg, D. E. & Baclaski, J. Fault detection and diagnosis in industrial fed-batch fermentation. *Proc. Am. Control Conf.* **2006**, 5511–5516 (2006).
  48. Hadiyanto, Ariyanti, D., Aini, A. P. & Pinundi, D. S. Optimization of ethanol production from whey through fed-batch fermentation using *kluveromyces marxianus*. *Energy Procedia* **47**, 108–112 (2014).
  49. Brethauer, S. & Wyman, C. E. Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. *Bioresour. Technol.* **101**, 4862–4874 (2010).
  50. Carrillo-Nieves, D. *et al.* Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **102**, 63–74 (2019).
  51. Laopaiboon, L., Nuanpeng, S., Srinophakun, P., Klanrit, P. & Laopaiboon, P. Ethanol production from sweet sorghum juice using very high gravity technology: Effects of carbon and nitrogen supplementations. *Bioresour. Technol.* **100**, 4176–4182 (2009).
  52. Joannis-Cassan, C., Riess, J., Jolibert, F. & Taillandier, P. Optimization of very high gravity fermentation process for ethanol production from industrial sugar beet syrup. *Biomass and Bioenergy* **70**, 165–173 (2014).

53. Taghizadeh-Alisaraei, A., Motevali, A. & Ghobadian, B. Ethanol production from date wastes: Adapted technologies, challenges, and global potential. *Renew. Energy* **143**, 1094–1110 (2019).
54. Khongsay, N., Lin, Y. H., Laopaiboon, P. & Laopaiboon, L. Improvement of very-high-gravity ethanol fermentation from sweet sorghum juice by controlling fermentation redox potential. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **45**, 302–307 (2014).
55. Izmirlioglu, G. & Demirci, A. Simultaneous saccharification and fermentation of ethanol from potato waste by co-cultures of *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae* in biofilm reactors. *Fuel* **202**, 260–270 (2017).
56. Choi, G.-W., Kang, H.-W., Moon, S.-K. & Chung, B.-W. Continuous Ethanol Production from Cassava Through Simultaneous Saccharification and Fermentation by Self-Flocculating Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* CHFY0321. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **160**, 1517–1527 (2010).
57. Shanavas, S., Padmaja, G., Moorthy, S. N., Sajeev, M. S. & Sheriff, J. T. Process optimization for bioethanol production from cassava starch using novel eco-friendly enzymes. *Biomass and Bioenergy* **35**, 901–909 (2011).
58. Swain, M. R., Mishra, J. & Thatoi, H. Bioethanol production from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) flour using co-culture of *Trichoderma* sp. and *Saccharomyces cerevisiae* in solid-state fermentation. *Brazilian Arch. Biol. Technol.* **56**, 171–179 (2013).
59. Zhang, L. *et al.* Application of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) from viscosity reducing of raw sweet potato for bioethanol production at laboratory, pilot and industrial scales. *Bioresour. Technol.* **102**, 4573–4579 (2011).
60. Huang, Y. H. *et al.* Simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of non-starch polysaccharides and starch from fresh tuber of *Canna edulis* ker at a high solid content for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* **52**, 8–14 (2013).
61. López, R., Torregroza, A., Salcedo, J. & Rodríguez, J. Evaluación del rendimiento de alcohol por sacarificación-fermentación simultánea en ñame espinoso Alemán (*Dioscorea rotundata* P.). *Agron. Colomb. Supl.* **34**, S577–S580 (2016).
62. Wang, Y. Z., Zou, S. M., He, M. L. & Wang, C. H. Bioethanol production from the dry powder of Jerusalem artichoke tubers by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* in simultaneous saccharification and fermentation. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **42**, 543–551 (2015).
63. Wu, W. H. *et al.* Bioethanol production from taro waste using thermo-tolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* K21. *Bioresour. Technol.* **201**, 27–32 (2015).
64. Gao, M. T., Yano, S., Inoue, H. & Sakanishi, K. Production of ethanol from potato pulp: Investigation of the role of the enzyme from *Acremonium cellulolyticus* in conversion of potato pulp into ethanol. *Process Biochem.* **47**, 2110–2115 (2012).
65. Hashem, M. & Darwish, S. M. I. Production of bioethanol and associated by-products from potato starch residue stream by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass and Bioenergy* **34**, 953–959 (2010).
66. Chohan, N. A., Aruwajoye, G. S., Sewsynker-Sukai, Y. & Gueguim Kana, E. B. Valorisation of potato peel wastes for bioethanol production using simultaneous saccharification and fermentation: Process optimization and kinetic assessment. *Renew. Energy* **146**, 1031–1040 (2020).
67. López Vásquez, A. F., Cobo Angel, M. I. & Convers Sánchez, J. D. Effect of photocatalytic pretreatment of potato starch for bioethanol production using

- Saccharomyces cerevisiae during simultaneous saccharification-fermentation (SSF). *DYNA* **86**, 251–256 (2019).
68. Liu, Y.-K. & Lien, P.-M. Bioethanol production from potato starch by a novel vertical mass-flow type bioreactor with a co-cultured-cell strategy. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **62**, 162–168 (2016).
  69. Arapoglou, D., Varzakas, T., Vlyssides, A. & Israilides, C. Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste Manag.* **30**, 1898–1902 (2010).
  70. Chintagunta, A. D., Jacob, S. & Banerjee, R. Integrated bioethanol and biomanure production from potato waste. *Waste Manag.* **49**, 320–325 (2016).
  71. Lim, Y., Jang, Y. & Kim, K. Production of a high concentration of ethanol from potato tuber by high gravity fermentation. *Food Sci. Biotechnol.* **22**, 441–448 (2013).
  72. Hargono, Jos, B. & Kumoro, A. C. Production of Bioethanol from Sweet and Bitter Cassava Starches by Simultaneous Saccharification and Fermentation Using Saccharomyces cerevisiae. *Adv. Sci. Lett.* **23**, 2427–2431 (2017).
  73. Esquivia Mercado, M. B., Castaño Peláez, H. I., Atehortua Garcés, L., Acosta Cárdenas, A. & Mejía Gómez, C. E. Producción de etanol a partir de yuca en condiciones de alta concentración de sólidos (VHG). *Rev. Colomb. Biotecnol.* **16**, 163 (2014).
  74. Yingling, B., Zongcheng, Y., Honglin, W. & Li, C. Optimization of bioethanol production during simultaneous saccharification and fermentation in very high-gravity cassava mash. *Antonie Van Leeuwenhoek* **99**, 329–339 (2011).
  75. Ajibola, F. O., Edema, M. O. & Oyewole, O. B. Enzymatic Production of Ethanol from Cassava Starch Using Two Strains of Saccharomyces cerevisiae. *Niger. Food J.* **30**, 114–121 (2012).
  76. Moshi, A. P., Hosea, K. M. M., Elisante, E., Mamo, G. & Mattiasson, B. High temperature simultaneous saccharification and fermentation of starch from inedible wild cassava (*Manihot glaziovii*) to bioethanol using *Caloramator boliviensis*. *Bioresour. Technol.* **180**, 128–136 (2015).
  77. Siriwong, T. *et al.* Cold hydrolysis of cassava pulp and its use in simultaneous saccharification and fermentation (SSF) process for ethanol fermentation. *J. Biotechnol.* **292**, 57–63 (2019).
  78. Virunanon, C., Ouephanit, C., Burapatana, V. & Chulalaksananukul, W. Cassava pulp enzymatic hydrolysis process as a preliminary step in bio-alcohols production from waste starchy resources. *J. Clean. Prod.* **39**, 273–279 (2013).
  79. Poonsrisawat, A. *et al.* Simultaneous saccharification and viscosity reduction of cassava pulp using a multi-component starch- and cell-wall degrading enzyme for bioethanol production. *3 Biotech* **7**, 290 (2017).
  80. Wangpor, J., Prayoonpong, P., Sakdaronnarong, C., Sungpet, A. & Jonglertjunya, W. Bioethanol production from cassava starch by enzymatic hydrolysis, fermentation and ex-situ nanofiltration. *Energy Procedia* **138**, 883–888 (2017).
  81. Moshi, A. P. *et al.* Production of raw starch-degrading enzyme by *Aspergillus* sp. and its use in conversion of inedible wild cassava flour to bioethanol. *J. Biosci. Bioeng.* **121**, 457–463 (2015).
  82. Aruwajoye, G. S., Sewsynker-Sukai, Y. & Kana, E. B. G. Valorisation of cassava peels through simultaneous saccharification and ethanol production: Effect of prehydrolysis time, kinetic assessment and preliminary scale up. *Fuel* **278**, 118351 (2020).
  83. Elemike, E. E., Oseghale, O. C. & Okoye, A. C. Utilization of cellulosic cassava waste for bio-ethanol production. *J. Environ. Chem. Eng.* **3**, 2797–2800 (2015).

84. Pervez, S., Aman, A., Iqbal, S., Siddiqui, N. & Ul Qader, S. Saccharification and liquefaction of cassava starch: an alternative source for the production of bioethanol using amylolytic enzymes by double fermentation process. *BMC Biotechnol.* **14**, (2014).
85. Lee, W. S., Chen, I. C., Chang, C. H. & Yang, S. S. Bioethanol production from sweet potato by co-immobilization of saccharolytic molds and *Saccharomyces cerevisiae*. *Renew. Energy* **39**, 216–222 (2012).
86. Lopes, A. C., Resende, J. T. V. de, Machado, J., Guerra, E. P. & Resende, N. V. Alcohol production from sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) genotypes in fermentative medium. *Acta Agronómica* **67**, 231–237 (2018).
87. Diaz, J. T., Chinn, M. S. & Truong, V. Den. Simultaneous saccharification and fermentation of industrial sweetpotatoes for ethanol production and anthocyanins extraction. *Ind. Crops Prod.* **62**, 53–60 (2014).
88. Lareo, C. *et al.* Evaluation of sweet potato for fuel bioethanol production: hydrolysis and fermentation. *Springerplus* **2**, 493 (2013).
89. Montefusco, A. *et al.* Assessment of sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] for bioethanol production in southern Italy. *Plant Biosyst. - An Int. J. Deal. with all Asp. Plant Biol.* **148**, 1117–1126 (2014).
90. Cao, Y., Tian, H., Yao, K. & Yuan, Y. Simultaneous saccharification and fermentation of sweet potato powder for the production of ethanol under conditions of very high gravity. *Front. Chem. Sci. Eng.* **5**, 318–324 (2011).
91. Zhang, P. *et al.* Starch saccharification and fermentation of uncooked sweet potato roots for fuel ethanol production. *Bioresour. Technol.* **128**, 835–838 (2013).
92. Srichuwong, S. *et al.* Sweet potato having a low temperature-gelatinizing starch as a promising feedstock for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy* **39**, 120–127 (2012).
93. Dewan, A., Li, Z., Han, B. & Karim, M. N. Saccharification and Fermentation of Waste Sweet Potato for Bioethanol Production. *J. Food Process Eng.* **36**, 739–747 (2013).
94. Schweinberger, C. M., Putti, T. R., Susin, G. B., Trierweiler, J. O. & Trierweiler, L. F. Ethanol production from sweet potato: The effect of ripening, comparison of two heating methods, and cost analysis. *Can. J. Chem. Eng.* **94**, 716–724 (2016).
95. Duvernay, W. H., Chinn, M. S. & Yench, G. C. Hydrolysis and fermentation of sweetpotatoes for production of fermentable sugars and ethanol. *Ind. Crops Prod.* **42**, 527–537 (2013).
96. Praputri, E. & Sundari, E. Production of Bioethanol from *Colocasia esculenta* (L.) Schott (Talas Liar) by Hydrolysis Process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **543**, 012056 (2019).
97. Kusmiyati & Susanto, H. Fuel Grade Bioethanol Production from Iles-iles (*Amorphophaluscampanulatus*) Tuber. *Procedia Environ. Sci.* **23**, 199–206 (2015).
98. Malagón Micán, M. L., Paéz, A. I., Santos Aguilar, J. & Zabala García, D. Producción de bioetanol a partir de diferentes mezclas de los residuos orgánicos generados en una empresa alimentos. *Rev. Invest. (Guadalajara)*. **10**, 47–60 (2017).
99. Vargas Corredor, Y. A. & Pérez Pérez, L. I. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Rev. Fac. Ciencias Básicas* **V**, 59–72 (2018).

100. Sierra, S. C., Chavarriaga, P. & Sc, M. BIOCMBUSTIBLES Y BIOTECNOLOGÍA : LA YUCA ( *Manihot esculenta* ) COMO MODELO DE INVESTIGACIÓN. *Acta Biol. Colomb.* **15**, 3–24 (2010).
101. Lizarazo H., S. P., Hurtado R., G. G. & Rodríguez C., L. F. Análisis técnico económico de la producción de bioetanol a partir de papa a nivel de laboratorio en Boyacá. *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas* **9**, 97–111 (2015).
102. Campos Benvenega, M. A., Henriques Librantz, A. F., Curvelo Santana, J. C. & Tambourgi, E. B. Genetic algorithm applied to study of the economic viability of alcohol production from Cassava root from 2002 to 2013. *J. Clean. Prod.* **113**, 483–494 (2016).
103. Chovau, S., Degrauwe, D. & Van Der Bruggen, B. Critical analysis of techno-economic estimates for the production cost of lignocellulosic bio-ethanol. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **26**, 307–321 (2013).
104. Barrera, I., Amezcua-Allieri, M. A., Estupiñan, L., Martínez, T. & Aburto, J. Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chem. Eng. Res. Des.* **107**, 91–101 (2016).
105. Bessou, C., Lehuger, S., Gabrielle, B. & Mary, B. Using a crop model to account for the effects of local factors on the LCA of sugar beet ethanol in Picardy region, France. *Int. J. Life Cycle Assess.* **18**, 24–36 (2013).
106. Liu, B., Wang, F., Zhang, B. & Bi, J. Energy balance and GHG emissions of cassava-based fuel ethanol using different planting modes in China. *Energy Policy* **56**, 210–220 (2013).
107. Dias, M. O. S. *et al.* Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane. *Chem. Eng. Res. Des.* **91**, 1411–1417 (2013).
108. Mupondwa, E., Li, X. & Tabil, L. Integrated bioethanol production from triticale grain and lignocellulosic straw in Western Canada. *Ind. Crops Prod.* **117**, 75–87 (2018).