

NUEVOS MÉTODOS PARA LA RECUPERACIÓN DE FIBRAS TEXTILES A PARTIR DE  
RESIDUOS TEXTILES

KAREN NATALIA NEIRA LOPEZ

Proyecto integral de grado para optar al título de  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

Orientador

PhD. Harvey Andrés Milquez Sanabria

MsC. Ingeniería – Ingeniería Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIRIA QUÍMICA Y AMBIENTAL  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma del Director

---

Nombre

Firma del Presidente del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá D.C Mayo de 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonzo Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina, MSc. IQ

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	8
2.1. Objetivo general	8
2.2. Objetivos específicos	8
3. CAPÍTULO 1	9
3.1. Generalidades del reciclaje textil	9
3.1.1. <i>Definición</i>	9
3.1.2. <i>Justificación</i>	10
3.2. Materiales y tipos de fibras	11
4. CAPÍTULO 2	15
4.1. Métodos de reciclaje textil	15
4.1.1. <i>Químico</i>	15
4.1.2. <i>Térmico</i>	17
4.1.3. <i>Mecánico</i>	17
4.2. Nuevas tecnologías del reciclaje textil	19
4.2.1. <i>Fermentación</i>	19
4.2.2. <i>Hidrólisis Enzimática</i>	20
5. CAPÍTULO 3	21
5.1. Parámetros para la selección de método o tecnología	21
5.1.1. <i>Microrganismo</i>	21
5.1.2. <i>pH</i>	21
5.1.3. <i>Temperatura</i>	22

5.1.4. <i>% de Recuperación</i>	22
5.2. Comparación de las nuevas tecnologías contra las tradicionales	24
5.2.1. <i>Tiempo de Operación</i>	24
5.2.2. <i>Consumo de Recursos</i>	25
5.2.3. <i>Impacto ambiental</i>	25
5.2.4. <i>Material Recuperado</i>	26
5.2.5. <i>Eficiencia</i>	26
5.3. Selección de la tecnología más eficiente	27
6. CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFIA	30

## **RESUMEN**

La industria textil como responsable de la generación de una gran cantidad de residuos busca reincorporar al ciclo productivo parte de sus desechos producidos. Para ello han surgido varias rutas y métodos de reciclaje textil que permitan recuperar las fibras de los desechos para poder disminuir la huella de carbono que se genera durante la fabricación de las prendas. El propósito de este trabajo es dar a conocer los diferentes métodos para la recuperación de fibras textiles a partir de residuos textiles tanto tradicionales como las nuevas tecnologías emergentes, conocer sus diferencias, compararla y determinar cuál de estas alternativas que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras. Se abordaron los diferentes tipos de reciclaje textil existentes, al realizar la comparación de las tecnologías tradicionales con las que han surgido que implementan microorganismos para mitigar el impacto ambiental, se determinó que las tecnologías que implementan sistemas biológicos, mediante el uso de microorganismos como la fermentación o la hidrólisis enzimática presentan una mejor eficiencia tanto energética como ambiental, entre las mencionadas anteriormente, la tecnología que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras es la hidrólisis enzimática.

Palabras Clave: Reciclaje Textil, Tratamiento de desechos textiles, Degradación, Métodos biológicos, microorganismos

## 1. INTRODUCCIÓN

En el sector de textiles cada año la cantidad requerida y usada de materia prima crece exponencialmente. Un ejemplo de esto es la industria de la moda, la cual es responsable del 10% de las emisiones mundiales, así como los impactos de la industria textil, más específicamente lo relacionado con la “moda rápida”, que genera más de 92 millones de toneladas de desechos producidos por año y 1,5 billones de litros de agua consumidos.(Niinimäki et al., 2020a). Por lo anterior, la cantidad de desechos textiles es cada vez mayor en el mundo. Estos desechos son llevados normalmente a los rellenos sanitarios donde se les da su disposición final.

La industria textil al ser una de las industrias que contribuye de manera significativa a la contaminación, ha venido trabajando en métodos de reciclaje de fibras de poliéster mediante botellas PET, por métodos químicos y mecánicos, logrando disminuir la cantidad de energía y emisiones producidas, sin embargo, la disminución de la contaminación generada durante sus procesos de producción es mínima y en muchos casos requiere de mucho tiempo y altos costos para llevarse a cabo. Es por esto que se busca descubrir e implementar nuevas tecnologías cuyo propósito sea reintegrar al proceso productivo los desechos generados por la industria textil, esto es de vital importancia puesto que esta industria contribuyen de manera significativa al calentamiento global, no solo debido a lo contaminantes que son sus procesos productivos, sino que también las grandes cantidades de agua que requieren ser utilizadas para la producción de una sola prenda, otro de los factores influyentes es la disposición de los residuos puesto que los consumidores desechan el producto una vez termina su vida útil y va a parar, en muchos de los casos, a rellenos sanitarios. Por otro lado, es necesario tener en cuenta que muchos de los productos consumidos son producidos en el continente asiático y se le debe agregar la carga contaminante que el transporte representa hasta llegar al consumidor final.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión de los métodos existentes actualmente y las nuevas tecnologías que han surgido para la recuperación de fibras textiles a partir de desechos textiles, para así determinar cuáles de los métodos existentes presenta un mayor porcentaje de recuperación a partir de criterios establecidos por el autor que permitan compara los métodos tanto tradicionales como los nuevos métodos y seleccionar la alternativa que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

- Determinar las nuevas tecnologías que se están implementando para el reciclaje textil.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Describir los métodos implementados para la recuperación de fibras textiles.
- Identificar las nuevas tecnologías que se están implementando para el reciclaje textil.
- Comparar la eficiencia de las nuevas tecnologías expuestas para el reciclaje textil.
- Seleccionar la alternativa que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras.



### 3. CAPÍTULO 1

#### 3.1. Generalidades del reciclaje textil

El reciclaje de textiles como cualquier otro reciclaje se establece mediante diversos métodos, dependiendo de factores como origen del material reciclado, su composición, los procedimientos empleados durante el proceso de reciclaje y los productos terminados que se pueden obtener.

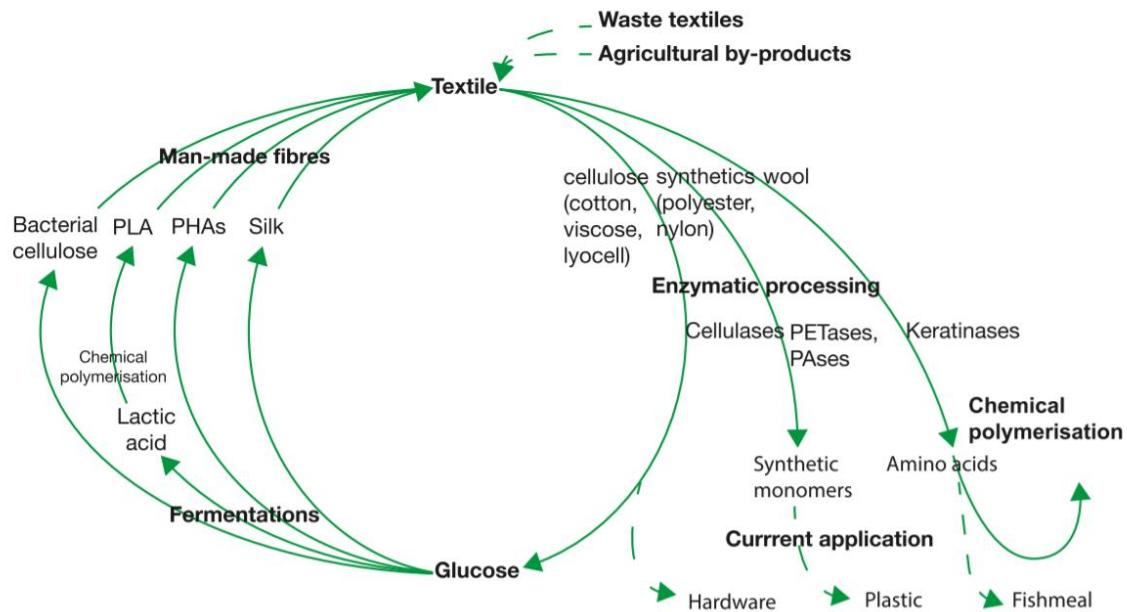
##### 3.1.1. Definición

Según la Directiva 2008/98/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008), por reciclado se entiende a toda operación de recuperación en la que los materiales de desecho se vuelven a transformar en productos, materiales o sustancias, ya sea para el fin original o para otros fines. De acuerdo con esto, se entendería por reciclaje a toda operación que tenga como resultado, un residuo que sirve para un fin útil al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función determinada, o un residuo que se está preparando para cumplir esa función, en la planta o en la economía en general. Significa que el reciclado es de hecho una operación de recuperación. (Piribauer & Bartl, 2019). El reciclado de textiles, por otra parte, se refiere más a menudo al reprocesamiento de los desechos textiles pre o posconsumo para su utilización en nuevos productos textiles o no textiles. tete

La finalidad de este proceso es reincorporar a la cadena productiva las fibras de los desechos textiles para así minimizar el impacto como se muestra en la Fig. 1. Ciclo de reciclaje textil, así como también los subproductos que se obtienen de este proceso. De esta manera se reduciría de manera significativa la cantidad de recursos que son utilizados actualmente para la fabricación de tela textiles.

**Figura 1.**

*Ciclo de reciclaje textil*



**Nota.** La figura representa el ciclo de economía circular que se busca implementar al reciclar las fibras textiles y los subproductos obtenidos. Tomado de: Ribul et al., (2021) Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. Journal of Cleaner Production. ISSN 0959-6526. <https://cutt.ly/YIHEi19>

### 3.1.2. Justificación

En todo el mundo se consumen anualmente 53 millones de toneladas de fibras para confeccionar prendas de vestir, responsables del 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y del 20% de las aguas residuales que generan grandes cantidades de residuos. En Europa, en 2016 se generaron 180.000 toneladas de residuos textiles, de los cuales solo el 15-20% se recogió para reciclado y menos del 1% se recicló en ropa. (Ribul et al., 2021).

A pesar de la gran cantidad de residuos, las tasas de reciclaje de textiles siguen siendo bajas. Tradicionalmente, los países occidentales gestionaban los residuos textiles exportando las prendas viejas a los países en desarrollo, como los de África. Sin embargo, con el aumento de la producción de residuos, esta práctica no puede continuar, ya que muchos países en desarrollo están

prohibiendo la importación de residuos textiles, ya sea para proteger la producción textil nacional (como en Turquía y China) o porque los mercados están sobresaturados de prendas de segunda mano y la ropa usada ha sustituido a la producción local (como en algunas partes de África). El informe del Plan de Acción Europeo de la Ropa sobre la recogida de textiles en las ciudades europeas propuso que las tasas de recogida de reciclaje se consideraran en relación con las tasas de consumo. Así pues, para cerrar el círculo de materiales y crear un sistema de reciclaje eficaz para todos los residuos textiles, no sólo hay que adoptar más ampliamente el reciclaje de prendas, sino que hay que frenar la producción y el consumo de prendas puesto que aun muchos países no tienen ningún sistema de reciclado textil. (Niinimäki et al., 2020)

### **3.2. Materiales y tipos de fibras**

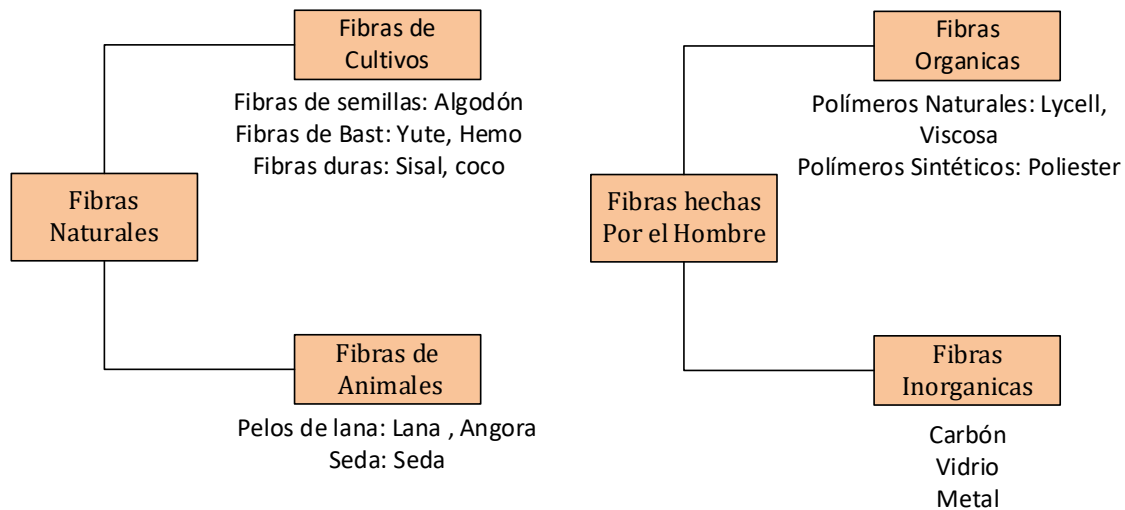
Para este trabajo es conveniente mencionar el origen y composición de los textiles producidos actualmente. Los textiles se componen principalmente de fibras, y actualmente son una mezcla de fibras naturales y materiales poliméricos como el algodón, la lana, la seda, poliéster, nylon, polipropileno, etc. Estas fibras son consumidos y desechados en grandes cantidades, especialmente aquellas fibras diseñadas para usos específicos que requieren una excepcional fuerza, resistencia al calor y/o resistencia química como por ejemplo las alfombras. (Wang, 2010). Por lo tanto, es necesario conocer la composición y clasificación de dichas fibras para saber la manera correcta de reciclarlas y reincorporarlas al proceso productivo.

Las fibras son materiales que se caracterizan por su finura, flexibilidad y de gran longitud al área de la sección transversal. (Piribauer & Bartl, 2019). En las fibras se puede encontrar una amplia cantidad de materiales, normalmente se clasifican en dos grupos como se puede en la Fig. 2

Clasificación de Fibras Textiles

**Figura 2.**

*Clasificación de Fibras Textiles*



**Nota.** En esta figura se muestra de manera grafica las principales clasificaciones de las fibras textiles. Tomado de: Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 37(2), 112–119. <https://cutt.ly/8IJjKXA>

Las fibras naturales se producen a partir de fuentes vegetales, animales y minerales. Las fibras vegetales se clasifican en fuentes primarias, que son fibras producidas como subproductos (por ejemplo, alimentos, materias primas y combustibles) para uso industrial, y las secundarias, que se producen como subproductos derivados de procesos de fabricación. Hay ocho tipos principales de fibras vegetales:

- Fibras de líber (yute, ramio, lino, ratán, soja, cáñamo, vid, banano y kenaf)
- Fibras de hoja (abacá, banano, sisal y piña)
- Fibras de semilla (algodón, tarro y kapok)
- Fibras de hierba (zara, trigo, bambú, cebada y arroz)
- Fibras de núcleo (zara y junco de trigo), recogidas de los tallos de la flora
- Fibras de pulpa de madera
- Fibras de raíz (luffa, colinabo y yuca)
- Fibras de fruta (borassus, tamarindo, banano y tarro).

En cuanto a las fibras animales existen tres tipos: pelusa de animal, ápice de ave y ápice de seda. Las fibras de pelusa animal (pelusa o cabello) se obtienen de mamíferos y animales peludos mamíferos y animales (por ejemplo, ovejas, cabras, alpacas y caballos). Las fibras de seda se obtienen del espumajo sequía de bichos o insectos durante la compostura de sus capullos. Las fibras aviares se obtienen de las plumas de las aves.

Por otra parte, se encuentran las fibras artificiales, son fabricadas a partir de polímeros sintetizados químicamente, se clasifican por su composición en polímeros naturales, como la fibra de viscosa y fibras sintéticas, como el poliéster, fibras de poliamida, y fibras inorgánicas, como el carbono y fibras de vidrio (Piribauer & Bartl, 2019).

Las poliamidas fueron el primer polímero sintético desarrollado. El nylon, el primer polímero sintético introducido en el mercado, tuvo un éxito inmediato. La palabra "nylon" se introdujo para indicar la finura del filamento. Hay dos tipos de poliamidas, que pueden representarse como nylon XY y nylon Z. El nylon 6 (tipo de nylon Z) y el nylon 66 (tipo de nylon XY) son las dos poliamidas más fabricadas, que se utilizan comúnmente en una amplia gama de aplicaciones, desde prendas de vestir, cuerdas, alfombras, cordones de neumáticos cuerdas, alfombras, cuerdas para neumáticos e innumerables aplicaciones textiles técnicas. (Deopura & Padaki, 2015)

Independientemente del tipo de fibra utilizado, la manera en la que se produce influye en el uso de energía y en el impacto climático. Por ejemplo, el cultivo de algodón convencional puede emitir 3,5 veces más CO<sub>2</sub> que el cultivo de algodón orgánico. Sin embargo, el cultivo ecológico puede requerir más agua que el método convencional, lo que supone un inconveniente para la implementación del algodón ecológico. Sin embargo, las fibras naturales tienen una huella de carbono inferior a la de las fibras sintéticas. Además, las fibras vegetales secuestran el carbono atmosférico y actúan como un sumidero de carbono, por ejemplo, una tonelada de yute seco equivale a la absorción de 2,4 toneladas de carbono. No obstante, la menor huella de carbono de las fibras naturales durante la producción puede verse contrarrestada durante la fase de uso debido a los elevados requisitos energéticos para el lavado, el secado y planchado en comparación con las sintéticas. (Niinimäki et al., 2020)

Al conocer el tipo de fibra existente también es necesario mencionar el tiempo que le toma estas fibras degradarse. Las fibras naturales al ser provenientes de material biológico están compuestas en su mayoría por celulosa, por lo que su tiempo de degradación es menor. Una prenda que

contenga fibras naturales tiende a tener un tiempo de degradación de 1 a 5 años dependiendo del tipo de fibra que contenga (Smith & Thompson, 2017a). Del lado contrario, las fibras sintéticas al ser manufacturadas por el hombre, tienen como componentes principales polímeros, cuyo tiempo de degradación es mayor. Por lo tanto, una prenda que contenga fibras naturales tiende a tener un tiempo de degradación de cientos de años, oscilando entre los 100 y 500 años, dependiendo de igual manera del tipo de fibra que contenga (Smith & Thompson, 2017).

Por lo anterior y al conocer que muchas de las prendas actualmente utilizadas son una mezcla de fibras naturales y sintéticas tiene como resultado que las prendas producidas y desechadas tengan un tiempo de degradación mayor y tarden mucho en descomponerse. La vida útil de una prenda de vestir tiene una media de entre 3,1 y 3,5 años por prenda, esto sumado a el aumento acelerado del consumo a nivel mundial ha provocado un aumento del casi 40% de los residuos textiles depositados en vertederos. Por lo que, al terminar la vida útil de una prenda, esta será desechada y llevada a los vertederos, y sabiendo que en su mayoría las prendas tienen mezclas de fibras naturales y sintéticas, primeramente se van a descomponer las fibras naturales que están contenidas en la prenda en un periodo de máximo 5 años y el porcentaje restante que contienen las fibras sintéticas, que es lo que más tarda en descomponerse, el tiempo de degradación de una prenda común puede llegar a durar hasta 300 años en descomponerse completamente. (Smith & Thompson, 2017)

Los textiles representan hasta el 22% de los residuos mixtos en todo el mundo, aproximadamente el 60% de estos residuos son las prendas desechadas por los consumidores varios años después de la producción. De estos residuos solo el 15% de los residuos textiles posconsumo se recogieron por separado con fines de reciclaje en 2015, y menos del 1% (0,5 millones de toneladas) de la producción total se recicló en circuito cerrado (se recicló en aplicaciones de igual o similar calidad) (Ribul et al., 2021). La mayoría de los textiles reciclados (6,4 millones de toneladas) se reciclaron en otras aplicaciones de menor valor, como material aislante, paños de limpieza y relleno de colchones, y 1,1 millones de toneladas se perdieron durante la recogida y el procesamiento. (Niinimäki et al., 2020)

## 4. CAPÍTULO 2

### 4.1. Métodos de reciclaje textil

El reciclaje de textiles está clasificado en rutas mecánicas, químicas o térmicas. Esto de manera general ya que normalmente son una mezcla de los procesos previamente mencionados (Sandin & Peters, 2018)

#### 4.1.1. Químico

El reciclaje químico permite ser implementado en procesos de economía circular al reincorporar a los procesos productivos materiales que son desechados, sin embargo, en el reciclaje químico de textiles solo el 1% es incorporado para cerrar los ciclos de vida de los productos, por lo que estas tecnologías aún no han alcanzado la capacidad industrial (Ribul et al., 2021). En el reciclaje químicos solo es posible realizar los procesos a un solo tipo de fibra, por lo que el principal obstáculo del reciclaje de textiles es el hecho de que las prendas son mezclas de fibras naturales y sintéticas.

Hay varios tipos de procesos químicos para el reciclaje textil: En el reciclado químico, los polímeros se despolimerizan o se disuelven. De esta manera, una vez fracturados los enlaces moleculares, los monómeros u oligómeros y los polímeros se repolimerizan en fibras nuevas antes de realizar el proceso de reciclaje (Sandin & Peters, 2018). Para reciclado de polímeros suelen degradar la cadena de polímeros, lo que conlleva una pérdida de calidad en la fibra reciclada, en el reciclaje de monómeros transforma los materiales en fibras de calidad. El reciclaje químico puede, en principio, aplicarse a la mayoría de las fibras textiles, sin embargo, el reciclaje de monómeros sólo se utiliza actualmente para las fibras sintéticas.

La técnica de disolución es otra opción de reciclaje, la cual consiste en separar las fibras mediante el uso de un disolvente como alcoholes alifáticos, fenoles alquílicos o el ácido clorhídrico para ser posteriormente mezclados con el agente de extracción como el metanol y finalmente ser separados por procesos de precipitación y filtrado (Y. Wang, 2010a). Si bien esta tecnología ha logrado obtener al menos 90% de los materiales reciclados y no se produce ninguna degradación o

alteración grave al material durante el proceso de extracción. Los inconvenientes de la extracción con disolventes son los productos químicos implicados, las modestas temperaturas y presiones y el tiempo necesario. (Y. Wang, 2010b)

Algunas de las opciones existentes para la recuperación de fibras consisten en añadir un componente químico que permita separar uno de los materiales de las fibras para así poder recuperar el otro material intacto. Un ejemplo de ello es un proceso químico que utiliza hidróxido de sodio para despolimerizar el componente PET del poliéster, de modo que el componente de algodón intacto puede recuperarse para la producción de fibras. Otro ejemplo que revelo grandes resultados fue la utilización de un disolvente de hidrofilia conmutable para disolver el poliéster de las fibras de algodón en residuos de tela vaquera, en los que se pueden reutilizar ambos tipos de fibras. La separación de las mezclas de fibras recuperó el 98% de la fracción de poliéster, mientras que la celulosa se fermentó en etanol tras una hidrólisis enzimática. (Ribul et al., 2021)

Para reciclar algunas fibras sintéticas, el reciclaje químico por despolimerización es una vía viable. Las cadenas de polímeros se descomponen en monómeros, que se separan y purifican antes de reunirse en nuevos polímeros. Los aditivos se eliminan durante el proceso de purificación (a menudo destilación). El poliéster tereftalato de etileno (PET) y el nylon 6 se reciclan hoy en día químicamente a una limitada escala comercial (Y. Wang, 2010). El material de entrada del poliéster suele ser PET posconsumo procedente de materiales de envasado de alimentos y residuos industriales (preconsumo). El nylon es generalmente nylon posconsumo procedente de alfombras, redes de piscifactoría y residuos industriales. Las fibras recicladas tienen en principio las mismas propiedades que las fibras sintéticas vírgenes.

Algunas fibras celulósicas (por ejemplo, el algodón) pueden reciclarse químicamente mediante un proceso de despulpado seguido de un hilado en solución para producir fibras celulósicas regeneradas. En la actualidad, ésta no es una vía viable para la viscosa y el lyocell, que ya son fibras celulósicas regeneradas (Piribauer & Bartl, 2019). Los aditivos se eliminan parcialmente durante el proceso. El reciclado químico del algodón produce fibras de celulosa regenerada que, en principio, tienen las mismas propiedades que otras fibras de celulosa regenerada.

Una característica común a las fibras sintéticas y de celulosa es que el proceso de reciclaje químico obtiene una mayor eficiencia cuanto más puro sea el material de entrada. Cualquier contenido distinto de la fibra destinada para el reciclaje es una contaminación que reduce el rendimiento o



añade pasos adicionales de separación/purificación y aumenta el coste tanto en términos medioambientales como económicos. (Roos et al., 2019)

#### ***4.1.2. Térmico***

Este proceso también se conoce como reciclaje mecánico de polímeros o reciclaje térmico. El reciclaje termo mecánico funde las fibras sintéticas antes de que estas puedan volver a hilarse en nuevas fibras o ser reconvertidas en otras formas. Por otra parte, se refiere a la conversión mediante la extrusión por fusión de escamas, pellets o astillas de PET en fibras, estas normalmente se producen a partir de residuos de PET por métodos mecánicos (Sandin & Peters, 2018).

El reciclado termomecánico se utiliza para fibras sintéticas puras como el nylon 6, el poliuretano termoplástico, el elastano y la poliamida 6, pero las propiedades de las fibras de elastano rehiladas demuestran que se rompen, a menos que se transformen en formas sólidas como barras. (Ribul et al., 2021). Otro de los procesos térmicos encontrados es la incineración con recuperación de energía, esta tecnología consiste en un tratamiento avanzado de calor y electricidad combinados en un proceso de combustión que tiene como finalidad captar los gases de combustión generados durante la incineración (Zamani et al., 2015)

A pesar de que este proceso es tecnológicamente viable y una solución prometedora para el reciclaje de poliéster, todavía no se ha escalado a nivel industrial debido a los elevados costes que conlleva la eliminación de contaminantes. (Ribul et al., 2021)

#### ***4.1.3. Mecánico***

El reciclado mecánico consiste en la utilización de procesos físicos para reducir el tamaño de las fibras y facilitar el reciclaje, incluyen el hilado de fibras textiles, la reutilización de materiales y la producción de material no tejido (Zamani et al., 2015). También se utiliza para fundir las fibras sintéticas para producir gránulos que se utilizan para hilar nuevas fibras. El método de reciclaje mecánico más común para procesar cualquier tipo de fibra textil es la trituración o el corte. Antes de que los textiles puedan ser triturados en trozos más pequeños, es necesario retirar cualquier

pieza de hardware, como cremalleras y botones, lo que a menudo requiere la intervención humana (Roos et al., 2019).

El método de refundición no tolera ninguna contaminación en forma de determinados tratamientos de superficie, polvo o suciedad. Mezclas de fibras (por ejemplo, nylon 6 y Nylon 6.6) y los polímeros que no se pueden fundir (por ejemplo, el elastano) no se pueden reciclar de esta manera (Roos et al., 2019) Estos procesos se han adoptado para todos los materiales textiles.

En la reducción de tamaño también conocida como recuperación de fibras (Piribauer & Bartl, 2019), consiste de un en el que se desmonta el tejido y se conserva la fibra (Rittfors, 2020). Para este caso, el material textil se libera primero de las piezas de metal y plástico, como cremalleras y botones. A continuación, el material se corta en trozos más pequeños que se introducen en una máquina que abre la estructura textil y libera las fibras para convertirlo en hilo, la masa de fibras textiles se carda y puede pasar por otras etapas para eliminar las fibras cortas. Se produce la llamada cinta, que se transforma en hilo mediante hilatura. En el proceso, se conservan las propiedades de la fibra con la excepción de la longitud de la fibra. (Roos et al., 2019). Al clasificar el color de la materia prima, se puede evitar el reteñido, reduciendo el impacto medioambiental del proceso de fabricación del producto textil. En realidad, el reciclaje mecánico es una ruta muy importante para las calidades de fibras mezcladas. Este es un proceso que es utilizado a modo de pretratamiento en la mayoría de los procesos de reciclaje (Y. Wang, 2010a).

Uno de los límites del reciclaje mecánico es que las fibras en el proceso de trituración se acortan y, por lo tanto, la producción de nuevos hilos suele requerir la mezcla de la fibra reciclada con fibras vírgenes, con el fin de obtener la necesaria resistencia y calidad para la confección (Le, 2018). Este método de reciclaje mecánico método está establecido a escala industrial para el reciclaje de residuos textiles de fibras de algodón (Le, 2018). El algodón adopta un proceso de reciclaje de ciclo semicerrado proceso, en el que la fibra reciclada se mezcla con la fibra de algodón virgen y se hila en un nuevo hilo. La lana adopta un proceso de ciclo cerrado sin necesidad de mezclar fibras vírgenes cuando el textil se recicla por primera vez (Roos et al., 2019)

## **4.2. Nuevas tecnologías del reciclaje textil**

Una de las alternativas de reciclaje de textiles recientemente investigada se trata de Métodos de reciclaje textil Biológicos. Presenta una gran complejidad, puesto que al final de su vida útil, los textiles suelen estar compuestos de fibras de varios materiales complicando así el reciclaje, ya que los diferentes tipos de fibras tendrían que ser separados, lo que en muchos casos es difícil o hasta resulta imposible (Piribauer & Bartl, 2019). Para ello se plantean los procesos de fermentación e hidrólisis enzimática que por medio de microorganismos y enzimas buscan facilitar la separación de las fibras.

### ***4.2.1. Fermentación***

Aunque la celulasa se produce por medio de la fermentación sumergida comercialmente, también puede llevarse a cabo con la fermentación de estado sólido (SSF). El SSF se lleva a cabo sin la aparente presencia de agua libre, pero con suficiente humedad proporcionada para apoyar el crecimiento de los hongos en sustrato lignocelulósico. La fermentación contribuye a aumentar el costo de la producción de celulasa, por ello es necesario la utilización de los desechos textiles mediante un proceso que incluyan el pretratamiento, la sacarificación y la fermentación (Yoon et al., 2014).

Las condiciones para que se de fermentación SSF son críticas para el crecimiento microbiano y la actividad metabólica (Yoon et al., 2014). Los parámetros que influyen en la SSF incluyen el medio de fermentación, la temperatura, el contenido de humedad, el pH y los nutrientes suplementarios (Hu et al., 2018a)

Aparte de la preparación del inóculo, las condiciones de funcionamiento de la FTS, como la composición del medio de fermentación, la duración de la fermentación, el pH, la temperatura y el contenido de humedad del sustrato pueden afectar a la producción de celulasa (Yoon et al., 2014).

#### **4.2.2. Hidrólisis Enzimática**

Durante la hidrólisis enzimática, puede producirse una reacción catalítica cuando la celulasa se une a la celulosa en un lugar específico (Li et al., 2019a). Es en este proceso donde se hidroliza la celulosa del algodón a la glucosa soluble, mientras que el material no biodegradable permanece intacto y es separado a través de un proceso de filtración. La cantidad de glucosa recuperada de los residuos textiles tratados depende de la composición de fibra natural de la muestra analizada (Subramanian et al., 2020)

La hidrólisis enzimática representa una alternativa más limpia: tiene lugar a presión atmosférica, temperaturas moderadas y condiciones de pH suaves, lo que da lugar a una reducción de los costos de producción, un mayor respeto del medio ambiente y una mejor calidad y funcionalidad de los productos. (Vasconcelos and Cavaco-Paulo, 2006)

Los desechos textiles contienen una parte celulósica que puede ser convertida en glucosa mediante hidrólisis y posteriormente fermentada en etanol. La parte celulósica de los textiles de desecho va acompañada de una fibra sintética, por ejemplo, poliéster. La hidrólisis de la celulosa en el tejido de desecho, no se inhibe, ya que el principal obstáculo en la bioconversión del tejido de desecho es la cristalinidad de la celulosa. Por lo tanto, el uso de un pretratamiento adecuado como el uso de agentes alcalinos (NaOH (12 %), NaOH/urea (7/12 %), NaOH/tiourea (9,5/4,5 %), y NaOH/urea/tiourea (8/8/6,5 %)), un tratamiento térmico o incluso un tratamiento mecánico antes de la hidrólisis es esencial para una hidrólisis eficiente de la parte celulósica de los textiles de desecho (Gholamzad et al., 2014). Los productos obtenidos de la hidrólisis del sustrato lignocelulósico por la celulasa consisten principalmente en glucosa, celobiosa y cello-oligosacáridos.

## 5. CAPÍTULO 3

### 5.1. Parámetros para la selección de método o tecnología

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 2, para evaluar cuál de las nuevas tecnologías es la más eficiente se escogieron una serie de condiciones que serán expuestas las cuales permiten organizar la información para realizar una adecuada selección, por ello con la información recuperada en la Tabla 1 se compararon las nuevas tecnologías para definir cuál de ellas es la más eficiente.

Debido a que las nuevas tecnologías son métodos que involucran microorganismos, hay diversos factores como la temperatura y el pH que hay que tener en cuenta a la hora de definir las condiciones de operación.

#### 5.1.1. *Microorganismo*

Existe una amplia variedad de microorganismos, incluidos hongos y bacterias, degradan la celulosa mediante la síntesis de enzimas del complejo celulítico (Michelin et al., 2015). Por ello es importante el tipo de microorganismo que se utiliza para este proceso puesto que no todos los microorganismos degradan las fibras naturales y si no lo degradan correctamente no se puede llevar a cabo el proceso. El principal objetivo de estos microorganismos es convertir la celulosa en azúcares fermentables, esto se logra gracias a la acción de tres enzimas conocidas como celulasas. (Sutaoney et al., 2020).

#### 5.1.2. *pH*

El pH es un factor importante que influye sobre el crecimiento de los microorganismos. Dependiendo el tipo de microorganismo, existe un rango óptimo de pH, que es donde el microorganismo realiza los procesos de fermentación de manera adecuada. Para las bacterias va de 6.0 hasta 8.5. Los hongos pueden crecer en medios con pH hasta de 8.5, pero la mayoría de ellos prefieren un pH ácido. (“Acerca Del Desarrollo y Control de Microorganismos En La Fabricación de Papel,” 2017)

### **5.1.3. Temperatura**

La temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos. Al igual que con el pH existe un rango de temperatura para cada microorganismo donde hay una mayor actividad enzimática. El rango de temperatura va desde 0 hasta 65°C en un tiempo prolongado para algunas bacterias y hongos. (“Acerca Del Desarrollo y Control de Microorganismos En La Fabricación de Papel,” 2017)

### **5.1.4. % de Recuperación**

Este parámetro resulta importante puesto que, la gran mayoría de los métodos de reciclaje textil por medios biológicos aún se encuentran en su fase experimental y este porcentaje permite evaluar la efectividad del método de degradación y medir cuanto del material que ingresa es fermentado para obtener el producto final. También permite comparar entre los microorganismos, las condiciones de operación (temperatura y pH) y el método implementado (Fermentación o Hidrólisis enzimática).

Para determinar cuál de las nuevas tecnologías es la más eficiente, se realiza a continuación la Tabla 1. Tabla de comparación de las nuevas tecnologías a partir de criterios establecidos por el autor. Donde se exponen los criterios presentados anteriormente para comparar y evaluar cada uno de los métodos biológicos expuestos anteriormente.

**Tabla 1.**

*Tabla de comparación de las nuevas tecnologías a partir de criterios establecidos por el autor*

Método	Microorganismo	pH	Temp. (°C)	Muestra entrante	% de recuperación	Fibras	Referencia
Fermentación	Aspergillus Niger CKB	6.3- 6.5	28	2 g	70.2	80/20 - Algodón y Poliéster	(Hu et al., 2018)
Fermentación	Trichoderma reesei ATCC 24449	5 - 7	28	2g	44.6	40/60 - Algodón y PET	(H. Wang et al., 2018)
Hidrólisis Enzimática	Aspergillus Niger	4.8	50	2 g	79.2	70/30 - Algodón y Poliéster	(Shen et al., 2013)
Hidrólisis Enzimática	B- glucosidasa	5	50	2 g	98.3%	Algodón y PET	(Li et al., 2019)
Hidrólisis Enzimática	Keratinasa	8 -10	37	3 g	85 -100 %	Lana y Poliéster	(Navone et al., 2020)

**Nota.** La anterior tabla es una recopilación de información relevante de algunas investigaciones realizadas por otros autores sobre las nuevas tecnologías de reciclaje textil.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 1. Tabla de comparación de las nuevas tecnologías a partir de criterios establecidos por el autor. Se puede determinar que la hidrólisis enzimática es la tecnología biológica que presenta un mayor porcentaje de recuperación con respecto a el proceso de fermentación, como se mencionó anteriormente dado que aún se encuentran en fase experimental es el parámetro más determinante. También se puede observar que los microorganismos a utilizar y las condiciones de operación son menos específicas en comparación con la fermentación.

## **5.2. Comparación de las nuevas tecnologías contra las tradicionales**

Para la comparación de las tecnologías se hará uso de una Metodología de calificación de 1 a 3 como se observa en la Tabla 2., de acuerdo a una serie de criterios como tiempo, eficiencia, consumo de materias primas, impacto ambiental, calidad del material obtenido, así como la cantidad de material recuperado. Se evaluarán cada uno de estos criterios donde: (1 = cumple con el criterio evaluado; 2 = puede mejorar; 3 = no cumple con el criterio evaluado) y se determinara cuál de las tecnologías es a mejor a partir del puntaje, la que obtenga un menor puntaje será la más efectiva puesto que significaría que cumple con una gran mayoría de criterios evaluados.

### ***5.2.1. Tiempo de Operación***

Se escogió a este criterio puesto que es necesario comparar entre las nuevas tecnologías cual es la que obtiene una buena calidad en un tiempo de operación menor. Para las tecnologías tradicionales, los métodos Mecánicos y Térmicos obtienen una calificación de 2, ya que, si recuperan los materiales deseados, pero en muchos casos se les debe realizar un proceso adicional para obtener las fibras, lo que se traduce en un aumento en el tiempo de operación que depende del tipo de proceso adicional que se deba realizar para obtener el producto deseado. En cuanto al método químico se le da una calificación de 1, debido a que muchos de los procesos implementados no requieren de tratamientos posteriores y los tiempos en cada operación son menores.

Por otra parte, las nuevas tecnologías tienen una calificación de 3, puesto que estos procesos requieren un alto tiempo de operación antes de alcanzar el producto final, ya que al hacer uso de microorganismos se debe esperar a que los procesos fermentativos culminen, los tiempos de



operación varían dependiendo del tipo de microorganismo a utilizar puesto que algunos los procesos fermentativos pueden tardar días para descomponer las fibras y obtener las fibras deseadas, adicionalmente para realizar estos procesos se requiere realizar cultivos de microorganismos o enzimas específicas en medios de cultivo, ambientes, temperaturas y pH específicos.

### ***5.2.2. Consumo de Recursos***

Este criterio fue elegido debido a que es necesario evaluar la cantidad de materiales o reactivos necesarios para llevar a cabo cada uno de los procesos. En cuanto a las tecnologías tradicionales su calificación asignada es de un valor de 3, esto es debido a que en los tres procesos se requieren de una gran cantidad de productos químicos o materiales específicos, un ejemplo de ello es que para los procesos químicos y térmicos se requieren de disolventes y aditivos para poder obtener una de las fibras a recuperar y en el caso de los métodos mecánicos si bien o requiere de una gran cantidad de recursos el material utilizado en este proceso debe tener ciertas características y no tolera ninguna contaminación por lo que mucho del material reciclado es desperdiciado. Por lo que ninguno de estos métodos cumple con el criterio evaluado.

Por el contrario, las nuevas tecnologías no requieren disolventes y aditivos químicos que puedan ser nocivos para el ambiente, ni tampoco las restricciones sobre la materia prima a trabajar, lo único que se requiere es un medio de cultivo óptimo para los microorganismos que se vayan a utilizar por lo que se le asigno un valor de 1, ya que cumple con el criterio evaluado.

### ***5.2.3. Impacto ambiental***

Se selecciono este criterio debido a que la industria textil quiere minimizar el impacto ambiental de sus residuos así que es importante comparar cual de todos los métodos es el que cumple este requerimiento. Para el caso de las nuevas tecnologías no requieren del uso de una gran cantidad de energía ni insumos químico y su emisión es menor, ya que representa una alternativa más limpia puesto que las condiciones de operación se dan a condiciones casi ambientales (25 °C, 1 atm) lo que se traduce en un menor impacto ambiental, por lo que su calificación es de 1. En cambio, las tecnologías tradicionales si requieren una gran cantidad de recursos, como agua, insumos químicos

y energía, también existe una limitación en cuando al tipo de fibra a reciclar lo que también puede acarrear procesos adicionales que aumentan el daño medioambiental producido, por lo que la calificación asignada a este criterio es de 3.

#### **5.2.4. Material Recuperado**

Es necesario evaluar para cada una de las tecnologías que tanto material se recupera y bajo qué condiciones. Para el caso de este criterio se le dio una calificación intermedia con el valor de 2 para todas las tecnologías, puesto que, si bien hay algunas que tienen un mayor porcentaje de recuperación, también existen muchas restricciones para todas ellas como el tipo de fibra a tratar, o la calidad con la que se recupera o incluso el tipo de disolventes o microorganismos utilizados, por lo que se considera que para este criterio todas las tecnologías no cumplen con el criterio evaluado y se deben mejorar algunos de los aspectos previamente mencionados.

#### **5.2.5. Eficiencia**

En este criterio se comparan todos los criterios anteriores y se determina si la tecnología presenta una buena relación consumo/resultados. La única tecnología que presenta una buena relación con material consumido y altos porcentajes de recuperación y tiene un menor impacto ambiental es la Hidrólisis Enzimática, por lo que se le da una calificación de 1 ya que cumple con el criterio establecido. Para el caso de la fermentación, si bien no requiere de un gran número de recursos los porcentajes de recuperación son muy bajos en comparación con las demás tecnologías.

En cuanto a las tecnologías tradicionales, encontramos que el método químico tiene altos porcentajes de recuperación (superiores al 80%), sin embargo, hay muchos otros aspectos que afectan la efectividad como la limitación a reciclar un solo tipo de fibra, o la pérdida de calidad en la fibra reciclada dependiendo del tratamiento dado o que para obtener grandes eficiencias se requiere que el material de entrada tenga una alta pureza. Por otra parte, los métodos mecánicos no presentan muchas ventajas como que tienen bajos porcentaje de recuperación y por el reducido tamaño de las fibras después de estos métodos se requiere de material virgen para el hilado. O que no siempre se obtienen fibras deseadas por la mezcla de las fibras. También que en algunos de los procesos las fibras a trabajar no deben contener ningún tipo de contaminación como polvo o

suciedad porque afecta el rendimiento del proceso. Finalmente, los métodos térmicos no todos los tipos de fibras son aptos para realizar estos procesos de reciclaje fibras y pueden conllevar a elevados costes para la eliminación de contaminantes. Las anteriores tecnologías reciben un valor de 2 porque tienen bastantes elementos por mejorar.

De acuerdo a los criterios y especificaciones expuestas previamente se organiza la información en la Tabla 2. Matriz de decisión.

**Tabla 2.**

*Matriz de decisión*

Criterio	TECNOLOGÍA				
	TRADICIONAL			NUEVA TECNOLOGÍA	
	Mecánicos	Químicos	Térmicos	Fermentación	Hidrólisis Enzimática
Tiempo de operación	2	1	2	3	3
Consumo de recursos	3	3	3	1	1
Impacto ambiental	3	3	3	1	1
Material recuperado	2	2	2	2	2
Eficiencia	2	2	2	2	1
Total	12	11	12	9	8
PROMEDIO	11,7			8,5	

**Nota.** La tabla anterior expone una matriz comparativa entre los dos tipos de métodos de reciclaje textil abordados en el trabajo frente a unos criterios establecidos por el autor.

### 5.3. Selección de la tecnología más eficiente

De acuerdo con la Tabla 2. Matriz de decisión. Se observa que la tecnología con menor calificación corresponde a las nuevas tecnologías, ya que, al tener un menor puntaje se entiende que cumplen con una mayor cantidad de los criterios evaluados. Se encontró que los criterios que presentan una mayor diferencia entre los tipos de tecnologías corresponden al consumo de recursos y el impacto ambiental.

Los criterios de material recuperado y eficiencia presentan la misma complejidad en ambos procesos, puesto que en ambos métodos tanto tradicionales como las nuevas tecnologías presentan la misma variación, el factor determinante se da en las condiciones de operación que se determinan

dependiendo el material a trabajar, el proceso y los insumos, que a su vez afecta el porcentaje de recuperación del producto final. Mientras que los demás presentan variaciones normales que se determinan dependiendo del tipo de proceso evaluado, puesto que en muchos de los casos se obtienen altos porcentajes de recuperación en muchas de las tecnologías comparadas.

También se determinó que cada uno de los procesos presenta limitaciones en cuanto a parámetros como el tipo de materia prima a tratar ya que algunos métodos, como el térmico, el mecánico y en algunas ocasiones el químico, no permiten el reciclaje de todo tipo de fibras debido a factores como el contenido de fibras y los tipos de materiales de los que está hecha la fibra. Otra de las limitaciones de las tecnologías tradicionales corresponde a la pureza con la que entra la materia a tratar ya que eso disminuye la calidad del producto final, así como el rendimiento durante el proceso, lo que implica en muchos casos un proceso adicional para poder ser reincorporadas a la cadena productiva y aumenta los costos de producción y el impacto al ambiente.

Por otra parte, se puede evidenciar que la diferencia de puntaje es tan significativa, puesto que en más de la mitad de los criterios a evaluar afectan de manera significativa a las tecnologías tradicionales o que abre la posibilidad a implementar las nuevas tecnologías para implementar sistemas de economía circular en esta industria.

Si bien existen varios criterios donde una gran mayoría de las tecnologías obtiene una calificación similar, y dado que las nuevas tecnologías aún se encuentran en la fase experimental y tomando como punto de referencia los criterios expuestos previamente se puede determinar que la alternativa que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras corresponde a la Hidrólisis enzimática.

## 6. CONCLUSIONES

Después de realizar todo el análisis documental y recopilar información sobre los métodos de reciclaje de textiles se pueden concluir que en la actualidad existen cinco métodos efectivos para la recuperación de fibras textiles que son: Métodos Mecánicos, químicos, térmicos, por fermentación y por hidrólisis enzimática.

Dentro de las nuevas tecnologías que se están implementando para el reciclaje textil, se encuentran las rutas biológicas entre ellas las que se destacan son la fermentación y la hidrólisis enzimática. En cuanto a la efectividad de estos métodos se encontró que, al realizarse la fermentación los porcentajes de recuperación son inferiores al 70% lo cual no lo hace un método viable, mientras que la hidrólisis enzimática en muchos de los casos resulto ser muy efectiva arrojando porcentajes de efectividad por encima del 80% lo cual abre la posibilidad a que sea un método viable.

Al comparar la eficiencia de las nuevas tecnologías expuestas para el reciclaje textil se pudo evidenciar que, si bien las nuevas tecnologías tienen puntos fuertes y disminuyen el impacto ambiental y el consumo de recursos de los métodos tradicionales, también presentan desventajas en cuando a el tiempo de obtención y el porcentaje de recuperación final que se obtiene.

Teniendo en cuenta lo analizado anteriormente y al realizar las comparaciones de tecnología y la matriz de decisión se puede decir que la tecnología que presenta un mayor beneficio para la recuperación de fibras es la hidrólisis enzimática.

## BIBLIOGRAFIA

- Acerca del Desarrollo y Control de Microorganismos en la Fabricación de Papel. (2017). *Cervantes-Martínez J, Orihuela-Equihua R, Rutiaga-Quiñones J*. <https://www.redalyc.org/journal/944/94454631001/html/>
- Deopura, B. L., & Padaki, N. v. (2015). Synthetic Textile Fibres: Polyamide, Polyester and Aramid Fibres. *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*, 97–114. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-931-4.00005-2>
- Gholamzad, E., Karimi, K., & Masoomi, M. (2014). Effective conversion of waste polyester-cotton textile to ethanol and recovery of polyester by alkaline pretreatment. *Chemical Engineering Journal*, 253, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.109>
- Hu, Y., Du, C., Leu, S. Y., Jing, H., Li, X., & Lin, C. S. K. (2018). Valorisation of textile waste by fungal solid state fermentation: An example of circular waste-based biorefinery. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.024>
- Li, X., Hu, Y., Du, C., & Lin, C. S. K. (2019). Recovery of Glucose and Polyester from Textile Waste by Enzymatic Hydrolysis. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3763–3772. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0483-7>
- Michelin, M., Ruiz, H. A., Silva, D. P., Ruzene, D. S., Teixeira, J. A., & Polizeli, M. L. T. M. (2015). Cellulose from lignocellulosic Waste. In *Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology* (pp. 475–511). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_52)
- Navone, L., Moffitt, K., Hansen, K. A., Blinco, J., Payne, A., & Speight, R. (2020). Closing the textile loop: Enzymatic fibre separation and recycling of wool/polyester fabric blends. *Waste Management*, 102, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.026>
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 1, Issue 4, pp. 189–200). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>

- Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(2), 112–119. <https://doi.org/10.1177/0734242X18819277>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129325>
- Roos, S., Sandin, G., Peters, G., Spak, B., Schwarz Bour, L., Perzon, E., & Jönsson, C. (2019). white paper on textile recycling. *Mistra Future Fashion*. [www.mistrafuturefashion.com](http://www.mistrafuturefashion.com)
- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 184, pp. 353–365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>
- Shen, F., Xiao, W., Lin, L., Yang, G., Zhang, Y., & Deng, S. (2013). Enzymatic saccharification coupling with polyester recovery from cotton-based waste textiles by phosphoric acid pretreatment. *Bioresource Technology*, 130, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.025>
- Smith, M. J., & Thompson, K. (2017). Forensic Analysis of Textile Degradation and Natural Damage. *Forensic Textile Science*, 41–69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101872-9.00004-2>
- Subramanian, K., Chopra, S. S., Cakin, E., Li, X., & Lin, C. S. K. (2020). Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling – valorizing cotton-polyester textile waste to pet fiber and glucose syrup. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104989>
- Sutaoney, P., Choudhary, R., & Gupta, A. K. (2020). Bioprospecting cellulolytic fungi associated with textile waste and invitro optimization of cellulase production by aspergillus flavus NFCCI-4154. *Rasayan Journal of Chemistry*, 13(1), 64–84. <https://doi.org/10.31788/RJC.2020.1315536>

- Wang, H., Kaur, G., Pensupa, N., Uisan, K., Du, C., Yang, X., & Lin, C. S. K. (2018). Textile waste valorization using submerged filamentous fungal fermentation. *Process Safety and Environmental Protection*, *118*, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.038>
- Wang, Y. (2010). Fiber and textile waste Utilization. *Waste and Biomass Valorization*, *1*(1), 135–143. <https://doi.org/10.1007/s12649-009-9005-y>
- Yoon, L. W., Ang, T. N., Ngoh, G. C., & Chua, A. S. M. (2014). Fungal solid-state fermentation and various methods of enhancement in cellulase production. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 67, pp. 319–338). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.013>
- Zamani, B., Svanström, M., Peters, G., & Rydberg, T. (2015). A Carbon Footprint of Textile Recycling: A Case Study in Sweden. *Journal of Industrial Ecology*, *19*(4), 676–687. <https://doi.org/10.1111/jiec.12208>