

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería Industrial**



**DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
FIBRAS TÉCNICAS DE ICHU USANDO  
DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

**DESIGN OF PRODUCTION PROCESS OF  
TECHNICAL FIBERS FROM ICHU USING  
DESIGN OF EXPERIMENTS**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniera industrial

**Sandra MORI CHUQUIZUTA**

**Código 201210143**

**Asesor**

Samuel CHARCA MAMANI

**Co-asesora**

Maria Belen ORTIZ GARCIA

Lima – Perú

Septiembre 2018

La tesis

**DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FIBRA TÉCNICA DE  
ICHU USANDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

Ha sido aprobada

-----  
[José Gaspar de la Puente Maldonado]

-----  
[Samuel Charca Mamani]

-----  
[Helard Alvarez Sanchez]

*Dedicatoria:*

Dedico la siguiente tesis a mis padres, motor y fuerza de mí día a día, y los responsables de que me convierta en la persona que soy hoy en día.

A mis abuelitos que me enseñaron la importancia de la agricultura, lo cual me inspiró a llevar a cabo este trabajo.

Y a mi hermana que siempre me motiva y me alegra.

*Agradecimientos:*

Esta investigación se realizó como parte del proyecto: “Estudio Comparativo del Potencial de Fibras Naturales Endémicas del Perú para su Uso como Refuerzo en Materiales Compuestos Laminados” financiado por FONDECYT (Convenio: 117:2016).

Mis agradecimientos van hacia los profesores que me ayudaron y me enseñaron a lo largo de la carrera de ingeniería industrial, y en especial a mis asesores Samuel Charca y Maria B. Ortiz, de quienes aprendí bastante durante toda esta etapa de formación como persona y profesional.

# TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>17</b> |
| 1.1. Objetivos.....   | 19        |
| 1.1.1. Objetivo general.....  | 19        |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....  | 19        |
| 1.2. Justificación .....  | 19        |
| 1.3. Hipótesis .....  | 20        |
| 1.3.1. Hipótesis General.....   | 20        |
| 1.3.2. Hipótesis Secundarias .....  | 20        |
| <b>CAPÍTULO I .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>MARCO TEÓRICO.....</b>   | <b>21</b> |
| 2.1. Diseño de Experimentos .....   | 21        |
| 2.1.1. Principios de DOE: .....   | 23        |
| 2.1.2. Tipos de Diseño Experimental.....  | 24        |
| 2.1.3. Impacto de DOE en el diseño de procesos productivos .....                  | 27        |
| 2.1.4. Aplicación de DOE en los procesos de extracción de fibras naturales.       | 28        |
| 2.2. Fibras Naturales .....   | 29        |
| 2.2.1. Composición química de los recursos vegetales .....                        | 30        |
| 2.2.2. Estructura jerárquica de la fibra de origen vegetal .....                  | 31        |
| 2.2.3. Criterios adicionales para la industrialización de las fibras naturales .. | 32        |
| 2.2.4. Ichu: Potencial fibra natural.....   | 34        |
| 2.3. Procesos y metodologías para obtener fibras técnicas naturales .....         | 36        |
| 2.3.1. Siembra/plantación y cosecha: .....  | 36        |

|                                    |   |           |
|------------------------------------|---|-----------|
| 2.3.2.                             | Desfibrilado: .....   | 36        |
| 2.3.3.                             | Enjuague y Secado:.....   | 38        |
| 2.4.                               | Aplicación industrial de fibras técnicas naturales en productos laminados | 39        |
| 2.4.1.                             | Artículos de deporte.....   | 40        |
| 2.4.2.                             | Muebles de alta gama y diseño interior .....                              | 40        |
| 2.4.3.                             | Automóviles.....  | 41        |
| 2.5.                               | Evaluación de la factibilidad técnica de fibras naturales .....           | 42        |
| <b>CAPÍTULO II.....</b>            |   | <b>45</b> |
| <b>METODOLOGÍA Y ALCANCE .....</b> |   | <b>45</b> |
| 3.1.                               | Definición del proyecto: .....  | 45        |
| 3.1.1.                             | Enfoque:.....   | 45        |
| 3.1.2.                             | Alcance y contexto .....  | 45        |
| 3.2.                               | Diseño Experimental.....  | 46        |
| 3.2.1.                             | Definir el objetivo:.....   | 46        |
| 3.2.2.                             | Planificación de los experimentos: .....                                  | 47        |
| 3.2.3.                             | Análisis e interpretación de los resultados.....                          | 48        |
| 3.2.4.                             | Conclusiones.....   | 48        |
| 3.3.                               | Fases de los experimentos secuenciales propuestos: .....                  | 48        |
| 3.3.1.                             | Fase 0: Propuesta de la línea base del proceso .....                      | 50        |
| 3.3.2.                             | Fase 1: Screening o tamizado .....  | 50        |
| 3.3.3.                             | Fase 2: Optimización técnica.....   | 50        |
| 3.3.4.                             | Fase 3: Minimización del costo de producción .....                        | 51        |
| 3.3.5.                             | Fase 4: Evaluación integral del proceso de producción.....                | 51        |
| <b>CAPITULO III .....</b>          |   | <b>52</b> |
| <b>EVALUACIÓN TÉCNICA .....</b>    |   | <b>52</b> |

|  |    |
|--|----|
| 4.1.Fase 0: Propuesta de la línea base del proceso de obtención de fibra técnica de Ichu ..... | 52 |
| 4.1.1. Recepción de materia prima (MP) .....   | 54 |
| 4.1.2. Enriado en agua .....   | 55 |
| 4.1.3. Desfibrilado Mecánico.....  | 55 |
| 4.1.4. Tratamiento alcalino .....  | 55 |
| 4.1.5. Enjuague, secado y empackado .....  | 56 |
| 4.2. Fase 1: Screening .....   | 56 |
| 4.2.1. Objetivo: .....   | 56 |
| 4.2.2. Identificación de las variables a estudiar .....  | 56 |
| 4.2.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de Respuesta                   | 58 |
| 4.2.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento .....                             | 58 |
| 4.2.5. Análisis e interpretación de los resultados.....  | 60 |
| 4.2.6. Conclusiones.....   | 63 |
| 4.3. Fase 2: Optimización considerando aspecto técnico .....                                   | 65 |
| 4.3.1. Objetivo: .....   | 65 |
| 4.3.2. Identificación de las variables a estudiar .....  | 65 |
| 4.3.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de respuesta                   | 65 |
| 4.3.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento .....                             | 66 |
| 4.3.5. Análisis e interpretación .....   | 67 |
| 4.3.6. Afinamiento: .....  | 69 |
| 4.3.7. Conclusiones.....   | 72 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPITULO IV.....</b>  | <b>74</b> |
| <b>EVALUACIÓN DEL COSTO.....</b>   | <b>74</b> |
| 5.1. Fase 3: Minimizar el costo de producción .....                                | 74        |
| 5.1.1. Objetivo: .....   | 74        |
| 5.1.2. Identificación de las variables a estudiar .....                            | 74        |
| 5.1.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de Respuesta<br>74 |           |
| 5.1.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento .....                 | 76        |
| 5.1.5. Análisis e interpretación .....   | 77        |
| 5.1.6. Conclusiones.....   | 78        |
| 5.2. Fase 4: Evaluación Integral de proceso de producción.....                     | 79        |
| 5.2.1. Estimación de la producción diaria.....                                     | 79        |
| 5.2.2. Estudio de localización de la Planta .....                                  | 79        |
| 5.2.3. Balance de Línea.....   | 82        |
| 5.2.4. Costo de producción .....   | 83        |
| <b>CAPITULO V .....</b>  | <b>87</b> |
| <b>EVALUACIÓN FINANCIERA .....</b>   | <b>87</b> |
| 6.1. Estudio económico.....  | 87        |
| 6.1.1. Determinación de los ingresos .....   | 87        |
| 6.1.2. Estimación de los egresos .....   | 88        |
| 6.1.3. Determinación de la inversión .....   | 88        |
| 6.1.4. Estructura financiera.....  | 89        |
| 6.1.5. Capital de Trabajo.....   | 90        |
| 6.1.6. Flujo de caja económico .....   | 90        |
| 6.2. Estudio financiero .....  | 92        |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 6.2.1. | Estado de resultados .....                | 92         |
| 6.2.2. | Flujo de caja financiera.....             | 92         |
| 6.2.3. | Análisis del punto de equilibrio .....    | 94         |
| 6.3.   | Análisis de rentabilidad .....            | 95         |
| 6.3.1. | Valor Actual Neto (VAN) .....             | 95         |
| 6.3.2. | Tasa Interno de Retorno (TIR) .....       | 97         |
| 6.3.3. | Relación de Beneficio – Costo (B/C) ..... | 97         |
| 6.3.4. | Periodo de recuperación .....             | 98         |
| 6.4.   | Análisis de sensibilidad .....            | 98         |
| 6.4.1. | Precio del producto .....                 | 99         |
| 6.4.2. | Demanda del producto .....                | 99         |
| 6.4.3. | Costo de la Materia Prima .....           | 100        |
| 6.4.4. | Gasto Remunerativo .....                  | 100        |
| 6.4.5. | Escenario dinámico.....                   | 101        |
|        | <b>CONCLUSIONES .....</b>                 | <b>102</b> |
| 7.1.   | Conclusiones:.....                        | 102        |
| 7.2.   | Recomendaciones: .....                    | 105        |
|        | <b>TRABAJOS FUTUROS.....</b>              | <b>106</b> |
|        | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>107</b> |
|        | <b>GLOSARIO.....</b>                      | <b>115</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación de la resolución de los Diseño Factoriales Fraccionadas [MINITAB, software].....                                 | 26 |
| <b>Tabla 2.</b> Relación entre los componentes químicos y sus propiedades [Elaboración propia].....  | 30 |
| <b>Tabla 3.</b> Composición Química de Ichu (estado natural) y fibras naturales convencionales de acuerdo a la norma TAPPI [13-14, 66-68]..... | 35 |
| <b>Tabla 4.</b> Aplicaciones de FNC en automóviles [89].....   | 42 |
| <b>Tabla 5.</b> Propiedades Mecánicas en Flexión de Compuestos con Fibras Naturales [93-97].....   | 44 |
| <b>Tabla 6.</b> Especificaciones técnicas de los compuestos laminado (flexión) [Elaboración propia].....                                       | 46 |
| <b>Tabla 7.</b> Pruebas estadísticas según el tipo de variables de respuesta y a controlar (discreta y continua) [99].....                     | 48 |
| <b>Tabla 8.</b> Detalles del diseño experimental.....  | 59 |
| <b>Tabla 9.</b> Matriz experimental de la Fase Screening.....  | 59 |
| <b>Tabla 10.</b> ANOVA de los datos experimentales - Screening.....  | 60 |
| <b>Tabla 11.</b> Detalles del experimento - Fase 2.....  | 66 |
| <b>Tabla 12.</b> Matriz Experimental - Fase 2.....   | 67 |
| <b>Tabla 13.</b> ANOVA y regresión lineal – Fase 2.....  | 67 |
| <b>Tabla 14.</b> Detalles del experimento – Fase 2.Afinamiento.....  | 70 |
| <b>Tabla 15.</b> ANOVA y regresión lineal – Fase 2. Afinamiento.....   | 70 |
| <b>Tabla 16.</b> Presupuesto de la demanda y disponibilidad de Fibra.....  | 75 |
| <b>Tabla 17.</b> Consideraciones para el presupuesto del costo del subproceso de extracción.....   | 76 |
| <b>Tabla 18.</b> Detalles del experimento-Fase 3.....  | 76 |
| <b>Tabla 19.</b> Matriz experimental – Fase 3.....   | 77 |
| <b>Tabla 20.</b> Evaluación de la localización de la Planta.....   | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 21.</b> Cuadro del costo Total de MOD.....                                      | 83  |
| <b>Tabla 22.</b> Cuadro del costo Total de MOI .....                                     | 84  |
| <b>Tabla 23.</b> Cuadro de Costo de Maquinaria, energía eléctrica y Mtto. Correctivo ... | 84  |
| <b>Tabla 24.</b> Cuadro de consumo de agua .....   | 85  |
| <b>Tabla 25.</b> Cuadro de requerimiento de Insumos .....                                | 85  |
| <b>Tabla 26.</b> Cuadro de Costo de infraestructura .....                                | 85  |
| <b>Tabla 27.</b> Resumen de los costos de los elementos de la producción.....            | 86  |
| <b>Tabla 28.</b> Venta totales anuales .....   | 87  |
| <b>Tabla 29.</b> Inversión presupuestada.....  | 88  |
| <b>Tabla 30.</b> Aporte propio y deuda .....   | 89  |
| <b>Tabla 31.</b> Tasa Efectiva anual (TEA) de Bancos en el Perú [112] .....              | 89  |
| <b>Tabla 32.</b> Calendario de pago anual.....   | 89  |
| <b>Tabla 33.</b> Determinación de Capital de trabajo .....                               | 90  |
| <b>Tabla 34.</b> Flujo de caja Económico .....   | 91  |
| <b>Tabla 35.</b> Estado de Ganancias y Pérdidas .....                                    | 92  |
| <b>Tabla 36.</b> Flujo de caja financiero .....  | 93  |
| <b>Tabla 37.</b> Determinación el punto de equilibrio en función de la demanda .....     | 94  |
| <b>Tabla 38.</b> Cálculo del COK y WAAC [113]-[114].....                                 | 96  |
| <b>Tabla 39.</b> VAN del proyecto.....   | 96  |
| <b>Tabla 40.</b> TIR del proyecto .....  | 97  |
| <b>Tabla 41.</b> Periodo de recuperación .....   | 98  |
| <b>Tabla 42.</b> Escenario de variación de precio del producto (COK=28.6 %) .....        | 99  |
| <b>Tabla 43.</b> Escenario de variación de la Demanda del producto (COK=28.6 %) .....    | 99  |
| <b>Tabla 44.</b> Escenario de variación del costo de la Materia Prima (COK=28.6 %) .     | 100 |
| <b>Tabla 45.</b> Escenario de variación del Gasto remunerativo (COK=28.6 %).....         | 100 |
| <b>Tabla 46.</b> Escenario dinámico.....   | 101 |
| <b>Tabla 47.</b> Indicadores de rentabilidad – escenario dinámico (COK=28.6 %) .....     | 101 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Enfoques de DOE según Wu y Hamada [Elaboración propia] .....  | 22 |
| <b>Figura 2.</b> Experimentación secuencial [33] .....   | 24 |
| <b>Figura 3.</b> Clasificación del Diseño de Experimentos [27].....  | 24 |
| <b>Figura 4.</b> Clasificación de fibras [51] .....  | 29 |
| <b>Figura 5.</b> Composición química de la fibra natural [51].....   | 30 |
| <b>Figura 6.</b> Estructura jerárquica de la fibra natural y la comparación de sus costos<br>[Modificado de 55] .....                                    | 31 |
| <b>Figura 7.</b> Criterios de industrialización [Elaboración propia] .....   | 32 |
| <b>Figura 8.</b> Demanda en el 2020 de fibras naturales por continentes [12] .....   | 33 |
| <b>Figura 9.</b> Partes de la planta de Ichu [Modificado de 66].....   | 34 |
| <b>Figura 10.</b> Proceso de obtención de FN.....  | 36 |
| <b>Figura 11.</b> Tipos de extracción de fibra natural (FN) [13] .....   | 37 |
| <b>Figura 12.</b> Aplicaciones industriales de las fibras técnicas naturales [56], [76]-[77]<br>.....  | 39 |
| <b>Figura 13.</b> Índice de material para un panel ligero y rígido (izquierda) o ligero y<br>resistente (derecha) sometido a carga de flexión [89] ..... | 43 |
| <b>Figura 14.</b> Etapas de DOE [29] .....   | 46 |
| <b>Figura 15.</b> Fases de los experimentos secuenciales [Elaboración propia].....   | 49 |
| <b>Figura 16.</b> Sistema de experimentación - Fase 1 .....  | 50 |
| <b>Figura 17.</b> Sistema de Experimentación – Fase 2.....   | 51 |
| <b>Figura 18.</b> Sistema de Experimentación – Fase 3.....   | 51 |
| <b>Figura 19.</b> Diagrama de Operación del proceso (DOP) de producción de Ichu<br>[Elaboración propia] .....  | 53 |
| <b>Figura 20.</b> Apariencia de fibras de Ichu procesadas (tallo, vaina y hoja).....   | 54 |
| <b>Figura 21.</b> Porcentaje en peso de las partes del Ichu .....  | 55 |
| <b>Figura 22.</b> Diagrama de Ishikawa para maximizar la calidad de las fibras (Nivel de<br>Severidad) [Elaboración propia].....                         | 57 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 23.</b> Diagrama Pareto de los efectos estandarizados- Screening .....  | 61 |
| <b>Figura 24.</b> Gráfica de los efectos principales - Fase 1: Screening.....   | 62 |
| <b>Figura 25.</b> Micrografía SEM de la sección transversal de la hoja <i>Stipa obtusa</i> (materia prima utilizada) .....  | 62 |
| <b>Figura 26.</b> Diagrama de Cajas de IM Resistencia a) Longitudinal y b) Transversal, e IM Rigidez c) Longitudinal y d) Transversal. Las líneas rojas representan las especificaciones técnicas. .... | 68 |
| <b>Figura 27.</b> Diagrama de Cajas de IM Resistencia a) Longitudinal y b) Transversal, e IM Rigidez c) Longitudinal y d) Transversal. Las líneas rojas representan las especificaciones técnicas. .... | 71 |
| <b>Figura 28.</b> Gráfica de contornos – Fase 3 [Elaboración propia].....   | 78 |
| <b>Figura 29.</b> Diagrama de operaciones para el proceso de producción de fibras técnicas de Ichu .....  | 80 |
| <b>Figura 30.</b> Mapa de la ubicación de la planta [GoogleMaps].....   | 81 |
| <b>Figura 31.</b> Diagrama de bloques del proceso de extracción de Ichu [Elaboración propia].....   | 82 |
| <b>Figura 32.</b> Balance de la línea de producción [Elaboración propia] .....  | 82 |
| <b>Figura 33.</b> Análisis de Punto equilibrio .....  | 95 |

## INDICE DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| ANEXO 1. Resultados del experimento – Fase 0 [Elaboración Propia] .....                 | 117 |
| ANEXO 2: Resultados del experimento – Fase 1 [Elaboración Propia] .....                 | 118 |
| ANEXO 3: Resultados del experimento – Fase 2 [Elaboración Propia] .....                 | 119 |
| ANEXO 4: Resultados del experimento – Fase 2. Afinamiento [Elaboración Propia]<br>..... | 120 |
| ANEXO 5: Resultados del experimento – Fase 3 [Elaboración Propia] .....                 | 121 |
| ANEXO 6: Layout de la Planta de producción de Ichu.....                                 | 122 |

## **RESUMEN**

La presente tesis tiene como objetivo diseñar un proceso de producción de fibras técnicas a partir del Ichu (recurso vegetal), considerando su pre-factibilidad técnica para productos laminados con poliéster y su costo de producción. Para ello, se da a conocer la oportunidad de desarrollar fibras técnicas a partir de nuevas fuentes naturales como el Ichu, como una alternativa de inversión en fuentes renovables. El diseño del proceso inicia con una propuesta de línea base para el proceso de producción de fibras técnicas de Ichu, en base al estado de arte de los procesos existentes y las características de la materia prima. Seguidamente, esta propuesta es evaluada en términos de las especificaciones técnicas de la fibra en un compuesto polimérico, de forma experimental a nivel de laboratorio a través de la metodología de Diseño de Experimentos (DOE). Luego de identificar los subprocesos que garantizan el cumplimiento de las especificaciones técnicas, sus parámetros fueron optimizados en término de costo de producción, a través de Superficie de Respuesta. Finalmente, se evalúa la rentabilidad proyectada de la producción y comercialización de las fibras de Ichu a nivel industrial con el proceso productivo diseñado. Los indicadores de rentabilidad obtenidos muestran resultados favorables del proyecto de inversión.

### **Palabras Claves:**

Fibras técnicas; Ichu; Compuesto polimérico; Diseño de Experimentos

# INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países que posee gran biodiversidad de recursos naturales [1]; sin embargo, la falta de investigación e innovación en procesos industriales limita el desarrollo de nuevos productos que pueden generen alto valor agregado, a partir de esta biodiversidad [2]. Uno de los recursos naturales que crece abundantemente en las zonas altoandinas es el Ichu (variedad de gramíneas), el cual posee en su interior fibras que pueden ser utilizadas en sofisticadas aplicaciones industriales basados en materiales compuestos poliméricos [3]. Sin embargo, no existen estudios que demuestren la factibilidad de las fibras a partir del Ichu.

Investigaciones alrededor del mundo, han desarrollado procesos de extracción que permiten obtener fibras técnicas a partir de recursos de origen vegetal como el cáñamo, lino, sisal, bambú y otras [4-6]. Ello con el fin de utilizarlas en reemplazo de las fibras de vidrio (sintético), las cuales emiten altos porcentajes de monóxido de carbono (157.67 kg/TN) y energía (12.93 MMBtu/TN) durante su producción [7]. Por ello, el uso de estos recursos biodegradable es una gran oportunidad para aprovechar las ventajas ambientales y económicas frente a las fibras sintéticas.

En la actualidad, estas fibras técnicas naturales son utilizadas como refuerzo en artículos de deportes (tablas de surf, bicicleta), partes internas de automóviles, muebles de alta gama, entre otros [8-10]. Es así que a nivel mundial el mercado de estas fibras ha tenido un gran crecimiento en los últimos años y se estima que su demanda tendrá una tasa de crecimiento de 10% para los próximos años, lo cual generará una brecha respecto a la oferta actual [11-12]. Esto impulsa el desarrollo de un proceso sostenible que permita obtener fibras a partir de nuevas fuentes naturales como el Ichu.

Los procesos de obtención de fibras dependen principalmente de las características de la materia prima, los parámetros del proceso y la aplicación de las mismas [13]. De acuerdo a ello, diversas investigaciones han desarrollado procesos que permiten obtener FN, enfocándose en mejorar sus propiedades mecánicas [14]-[17]. Sin embargo, son escasas las

investigaciones que utilizan una metodología que permita optimizar y diseñar un proceso desde el punto de vista industrial. Por ello, el presente trabajo se enfoca en el diseño y optimización del proceso de obtención de fibras técnicas a partir del Ichu considerando aspectos técnicos y la minimización de costo de producción a través de la metodología de Diseño de Experimentos.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Diseñar un proceso de producción de fibras técnicas a partir de Ichu para su uso industrial como refuerzo en compuesto poliméricos, considerando su pre-factibilidad técnica, además del costo referencial de producción a escala industrial.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Establecer las especificaciones técnicas de los compuestos laminados de matriz polimérica reforzado con fibra natural para aplicaciones industriales, en términos de los Índices de Materiales.
- Identificar las variables significativas del proceso de extracción de fibras técnicas de Ichu, que permitan alcanzar las especificaciones técnicas del proceso de extracción (Nivel de Severidad), a nivel de laboratorio.
- Determinar los parámetros del subproceso (significativo) que minimiza el costo referencial de producción (a nivel industrial).
- Evaluar la rentabilidad de la producción y comercialización de las fibras técnicas de Ichu.

## **1.2. Justificación**

El uso de las fibras técnicas naturales como refuerzo en aplicaciones industriales está en gran crecimiento debido en gran parte a la presión de nuevas legislaciones que impulsan el uso de materiales y procesos más amigables con el medio ambiente [18]. Incluso, las leyes ambientales que regirán a partir del 2020 en los países europeos, exigen automóviles completamente reciclables [19]. Además, el 58% de las personas están dispuestas a pagar más, por productos que generen un impacto social y ambiental positivo [20]. Motivo por el cual, se promueve la búsqueda de nuevas fuentes de materia prima que puedan aportar al uso de materiales biodegradables. Una nueva materia prima con potencial para obtener fibras técnicas naturales es el Ichu.

El Ichu es un pasto natural que puede lograr ser más atractivo que otros recursos vegetales en términos de costo de producción. Esto debido a que el diámetro sus hojas (en estado natural) es pequeño por lo cual necesitará menor intensidad en el proceso para la extracción de fibras, y así también reducir el consumo de energía y emisión de residuos en su producción [21]. Por otro lado, la planta de Ichu crece de manera natural por lo que no necesita fertilizantes (contaminantes de la tierra y el agua) para su crecimiento, en comparación a otras [22-23]. Asimismo, este pasto no compite con los cultivos alimenticios en el uso de tierras, ya que crece en lugares inhóspitos para otras especies (en zonas de gran altura y baja temperatura) [22].

Finalmente, la industrialización a partir de esta materia prima representa una oportunidad de trabajo para las comunidades andinas que lamentablemente viven en condiciones de pobreza y pueden obtener ingresos extras a partir de ello [24]. Por lo tanto, este proyecto puede aportar al desarrollo social y económico, a través de la revaloración de la agricultura y su comercialización.

### **1.3. Hipótesis**

#### **1.3.1. Hipótesis General**

El proceso productivo diseñado logra obtener fibras técnicas a partir del Ichu que puedan ser industrializadas (técnicamente) y competitivas económicamente (costo).

#### **1.3.2. Hipótesis Secundarias**

- H1: Las especificaciones técnicas en base al Índice de Materiales de las fibras de yute en compuestos laminados demuestran la pre-factibilidad técnica de una fibra nueva.
- H2: Las variables identificadas son estadísticamente significativas para obtener fibras técnicas naturales de Ichu que cumplan con las especificaciones técnicas del proceso.
- H3: Los parámetros del proceso de extracción establecidos minimizan los costos de producción.
- H4: Las fibras obtenidas son más competitivas que las fibras naturales existentes en el mercado, en términos de calidad y costo referencial (a nivel industrial)

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

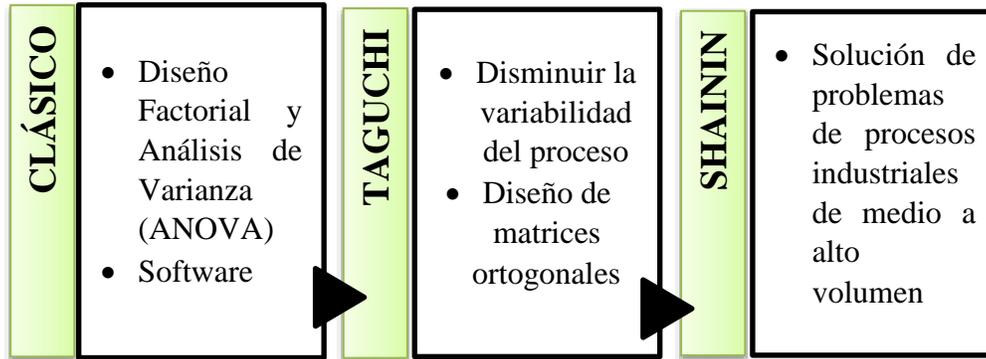
Dado que el objetivo de la presente investigación es diseñar y optimizar un proceso de extracción de fibras técnicas de Ichu, en este capítulo se detalla la importancia de la metodología (aspectos claves) para diseñar los experimentos de manera eficiente. También se dará a conocer las características de la materia prima (Ichu) y los procesos existentes para la obtención de fibras técnicas naturales. Finalmente, se realiza una investigación de las aplicaciones industriales de productos a base de compuestos poliméricos para obtener las especificaciones técnicas de las fibras naturales.

### **2.1. Diseño de Experimentos**

Las industrias e investigaciones realizan una serie de pruebas y experimentos para diseñar y optimizar procesos y/o productos de alta calidad. Para lograr ello, es fundamental que los ingenieros y científicos que desempeñan un rol importante en estas actividades, conozcan y entiendan el proceso como un sistema, en el cual existen factores que influyen en el resultado esperado. A lo largo de los años, se han desarrollado metodologías para llevar a cabo la experimentación que permita encontrar los parámetros óptimos del proceso. Una variable a la vez (acrónimo en inglés One Variable at a time o OVAT) es una estrategia de experimentación atribuida a Francis Bacon (siglo XVII) [25], y consiste en variar un solo factor a la vez manteniendo las otras fijas en el experimento. Sin embargo, este tipo de experimentos en situaciones de cierta complejidad requiere mayor disposición de recursos (tiempo y dinero), ya que se deben ejecutar varias pruebas para obtener precisión [26]. Aun así, solo se obtiene información parcial del proceso, porque no explora el efecto que puede tener la interacción de dos o más variables al mismo tiempo.

Por otro lado, en procesos complejos donde el resultado se ve afectado por varios factores, el método más efectivo para garantizar una buena decisión es el Diseño Estadístico de Experimentos (DOE). Esta metodología provee de herramientas que permiten planificar las pruebas que se deben realizar y cómo ejecutarlas, para obtener datos que al ser analizados

estadísticamente proporcionen evidencias objetivas en corto tiempo, utilizando los recursos eficientemente [27]. La forma de aplicar esta metodología ha sido muy discutida por diferentes autores, por lo cual Wu and Hamada clasificaron esta metodología en tres principales enfoques: Clásico, Taguchi y Shainin, ver Figura 1 [28].



**Figura 1.** Enfoques de DOE según Wu y Hamada [Elaboración propia]

El primer enfoque, fue propuesto por Ronald Fisher en 1920 y aplicó herramientas estadísticas como cuadros latinos para la mejora de la producción de papa. Esta metodología propone la aplicación de Diseños Factorial (completa y fraccionada) y el análisis de varianza (ANOVA) como herramientas eficientes para llevar a cabo la experimentación. Más tarde, estadísticos y científicos contribuyeron con más herramientas a este enfoque, para que su aplicación en DOE sea válido y robusto [29]. Asimismo, la aparición de softwares como MINITAB, SAS, S-Plus, Design-Expert, StatSofts y otros, permitió que esta técnica sea más fácil de usar.

El segundo enfoque, fue desarrollado por Gen'ichi Taguchi en 1940 y consiste en usar las técnicas estadísticas desde una perspectiva ingenieril en la calidad, con el principal objetivo de disminuir la variabilidad de los resultados [30]. También simplificó el uso de DOE a través de Diseño de matrices ortogonales; sin embargo es muy similar al OVAT porque subestima las interacciones, según Nair [31].

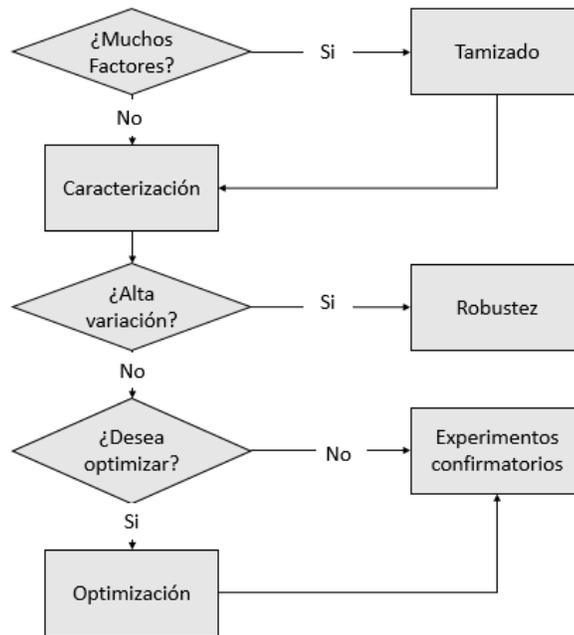
Finalmente, Dorian Shainin se enfocó en las estrategias para solucionar problemas en procesos industriales de mediano a alto volumen, en los cuales ya poseen un nivel alto de calidad [32].

En este trabajo, el enfoque Clásico es seleccionado para la optimización del proceso de extracción debido a que se adapta mejor a este tipo de proceso complejo, en el cual no se tiene estudios preliminares y se realiza a escala de laboratorio. Por otro lado, esta metodología está basada en tres principios que se describen a continuación.

### **2.1.1. Principios de DOE:**

El diseño de experimentos considera los tres siguientes principios básicos: aleatorización, repetición y formación de bloques, que aseguran la validez del análisis de los datos [26]. La aleatorización consiste en realizar los tratamientos (pruebas a realizar en una unidad experimental) en orden aleatorio o al azar y con muestras seleccionadas de la misma manera, con la finalidad de disminuir las diferencias provocadas por los factores no controlables (ruido). La repetición se refiere a ejecutar el mismo tratamiento más de una vez, para poder obtener la variabilidad de los datos, que será utilizado en el ANOVA. Finalmente, el bloqueo o formación de bloques es una técnica que acondiciona los experimentos para reducir el efecto de variables que no se desea estudiar pero que afectan al sistema.

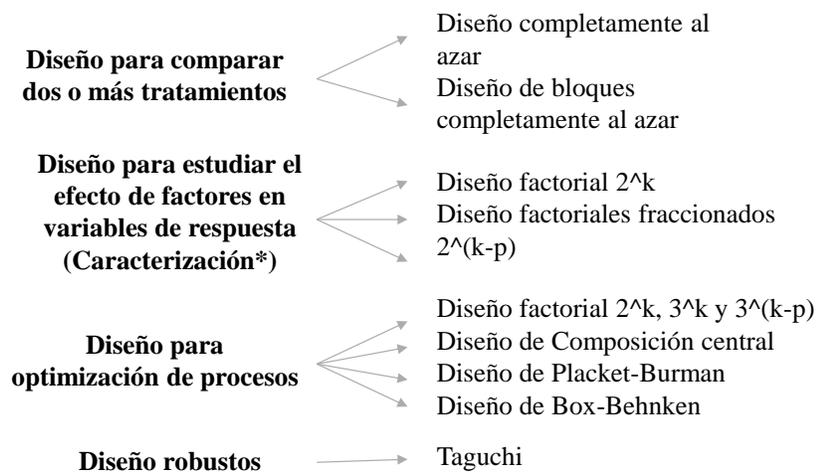
Por otro lado, la secuencialidad de los experimentos es un principio que se adiciona en caso los resultados de la experimentación son obtenidos rápidamente [33]. Esta se refiere a que se ejecuten más de una unidad experimental de tal forma que los conocimientos obtenidos alimenten a las siguientes unidades experimentales [33]. Usando este principio en la planificación del diseño el experimento se logra explorar mejor el comportamiento del proceso y aumenta la probabilidad de encontrar el punto óptimo [28]. Para una experimentación secuencial se puede utilizar las siguientes categorías: tamizado, caracterización, robustez y optimización, ver Figura 2 [33]. Es importante considerar una resolución mínima de IV en las unidades experimentales, para evitar subestimar las variables de interacción de segundo orden (como mínimo) [26]. En la próxima sección se detallan los tipos de diseños experimentales.



**Figura 2.** Experimentación secuencial [33]

### 2.1.2. Tipos de Diseño Experimental

Los diseños experimentales son herramientas de la metodología DOE que permiten planificar los tratamientos de los experimentos, para obtener información del proceso de manera eficiente. Los tipos de diseño experimental se pueden clasificar según el objetivo del experimento, ver Figura 3 [27].



**Figura 3.** Clasificación del Diseño de Experimentos [27]

#### 2.1.2.1. Diseño completamente al azar:

Es un diseño simple que sirve para determinar si hay diferencia significativa entre dos o más tratamientos (procesos, materiales, máquinas u otro factor) [29]. Y está basado en el análisis de varianza (ANOVA), en el cual considera la variabilidad de los tratamientos y el error aleatorio [29]. Las corridas experimentales se realizan de manera aleatoria, para reducir el efecto de las variables no controlables [34].

#### **2.1.2.2. Diseño de bloques completamente al azar:**

Es similar al diseñado mencionado anteriormente, la diferencia es que este diseño considera la influencia de otras fuentes de variabilidad o bloques y se prueba con un análisis de varianza con dos factores [27].

#### **2.1.2.3. Diseño Factorial:**

Se utiliza cuando se desea estudiar el efecto de dos a más factores en una o varias variables de respuesta. Existen dos tipos de diseño factorial el completo (DFC) y fraccionado (DFF), y se representan con  $n^K$  y  $n^{K-p}$ , respectivamente. Donde  $n$  es el número de niveles,  $k$  número de factores estudiados y  $p$  la cantidad de factores ocultos o confundidos. El DFC diseña tratamientos con todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles (mínimo 2) de los factores a investigar. Sin embargo, cuando se estudian más de tres variables a la vez es recomendable usar el DFF, el cual estudia un subconjunto seleccionado del diseño factorial completo, disminuyendo el número de tratamientos a ejecutar. Cabe mencionar que el número fraccional ( $p$ ) seleccionado está relacionado a la resolución del experimento. Davim, recomienda utilizar una resolución mínima de IV ya que los efectos principales se confunden con las interacciones de 3 factores, las que técnicamente son poco probables que tengan mayor efecto que los efectos principales [35]. A este diseño se puede agregar puntos centrales (a un diseño factorial de dos niveles), para confirmar si la relación es lineal o no lineal. El diseño factorial fraccional puede tener diferentes resoluciones según el número de variables a estudiar y la fracción a usar, ver Tabla 1.

| Run | Factores |      |      |      |      |      |    |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----------|------|------|------|------|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     | 2        | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8  | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |
| 4   | Full     | III  |      |      |      |      |    |     |     |     |     |     |     |     |
| 8   |          | Full | IV   | III  | III  | III  |    |     |     |     |     |     |     |     |
| 16  |          |      | Full | V    | IV   | IV   | IV | III |
| 32  |          |      |      | Full | VI   | IV   | IV | IV  | IV  | IV  | IV  | IV  | IV  | IV  |
| 64  |          |      |      |      | Full | VII  | V  | IV  |
| 128 |          |      |      |      |      | Full | VI | V   | V   | V   | IV  | IV  | IV  | IV  |

**Tabla 1.** Clasificación de la resolución de los Diseño Factoriales Fraccionadas [MINITAB, software]

#### 2.1.2.4. Diseño Placket and Burman:

Este diseño es otra alternativa para fraccionar factoriales completos  $2^k$ , donde la cantidad de tratamientos son múltiplos de 4; sin embargo, estos diseños son de baja resolución (III), es decir que los factores principales forman una estructura de alias con las interacciones de 2 factores [33].

#### 2.1.2.5. Diseño Central compuesto:

Es el tipo de experimento que más se utiliza para superficie de respuesta (diseño para optimizar). Los diseños centrales compuestos son un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, en otras palabras ampliado con un grupo de puntos axiales (también denominados puntos de estrella) que permiten estimar la curvatura (modelos no lineales). Este diseño puede utilizarse tanto para estimar eficientemente los términos de primer orden y segundo orden; como para modelar una variable de respuesta con curvatura al agregar puntos centrales y axiales a un diseño factorial previamente ejecutada. Se recomienda usar este diseño en los experimentos secuenciales, porque frecuentemente permite ampliar experimentos factoriales anteriores al agregar puntos axiales y centrales [33].

#### 2.1.2.6. Diseño Box-Behnken:

Un diseño de Box-Behnken es un tipo de diseño de superficie de respuesta, que permite una estimación de los coeficientes de primer y segundo orden. Sin embargo, como no están basados en un diseño factorial, no son adecuados para los experimentos secuenciales en los que previamente se han ejecutado con diseño factorial [36].

### **2.1.2.7. Diseño Taguchi:**

También llamado diseño ortogonal y es utilizado para elegir procesos que funcionen con mayor resistencia al entorno operativo [37]. Este tipo de diseño considera que existen variables no controlables que causan variabilidad (denominado factores de ruido). El objetivo es identificar factores controlables (factores de control) que minimicen el efecto de los factores de ruido.

De todos estos diseños experimentales, el que más ha destacado por su eficiencia en el costo de experimentación y resolución experimental aceptable es el diseño factorial; y ha sido de gran utilidad para muchas industrias como se describe a continuación.

### **2.1.3. Impacto de DOE en el diseño de procesos productivos**

El diseño de experimentos ha logrado resultados altamente satisfactorios en diferentes campos de la industria, así por ejemplos esta metodología fue usada en la industria metalmeccánica aplicada a procesos de soldadura por puntos, cuya implementación permitió identificar los parámetros críticos y la configuración óptima para mejorar el rendimiento y la capacidad del proceso [38]. También, en el proceso de soldadura de envases para alimentos, se logró incrementar el rendimiento en 34% usando esta técnica [39]. Chevron Chemical Co. utilizó Diseño Factorial Fraccionado a dos niveles, lo cual le permitió ahorrar más de 50 millones de dólares en costo de materia prima [40]. BASF utilizó DOE para poner a prueba su agente Trilon M en sus formulaciones de detergentes sin fosfatos, reduciendo significativamente el número de pruebas necesarias para crear detergentes eficaces. Novomer, una fábrica de polímeros ecológicos, tuvo resultados similares usando esta técnica para desarrollar un catalizador de segunda generación [41]. A pesar del éxito que puede obtenerse con esta técnica para mejorar procesos y productos, no es tan utilizada en las industrias y la investigación, esto puede ser debido a la percepción de complejidad de esta metodología [42]. A continuación, se analizan las investigaciones encontradas que mejoran las propiedades de las fibras naturales aplicando esta metodología (DOE).

#### **2.1.4. Aplicación de DOE en los procesos de extracción de fibras naturales**

El uso de DOE para optimizar la calidad de las fibras naturales (para aplicaciones como refuerzo en compuestos poliméricos) es ideal ya que la calidad de las fibras naturales depende de varios factores (sistema complejo) [42]. En la bibliografía se han encontrado algunas referencias, en las que aplicaron el diseño de experimentos para llevar a cabo el proceso de optimización en este tipo de fibras. Kessler y otros (1998) indican que el uso de pretratamientos de NaOH a la técnica Explosion de Vapor para la obtención de fibras de lino mejora el grado de desfibrilización; sin embargo, no muestra la evidencia estadística, es decir qué pruebas estadísticas se usaron y los resultados del mismo [43]. Zafeiropoulos y Baillie (2007) realizaron una caracterización pero no una optimización (basada en la clasificación de Wu y Hamada); ya que solo compararon el efecto de dos tratamientos superficiales en la resistencia a la tracción de las fibras de lino [44], evaluando los resultados de dos maneras; en la primera, analizaron los datos con una distribución normal y en la segunda parte utilizaron las herramientas estadísticas correspondiente a una distribución Weibull (con los mismos datos) [45]; concluyendo que la resistencia de la fibra no posee una distribución Weibull unimodal ni multimodal.

Por otro lado, en varias referencias bibliografías analizan estadísticamente diferentes factores como longitud, diámetro, volumen de fracción y tipo de fibra, en las propiedades mecánicas de las fibras naturales, en sí misma y en compuestos poliméricos [46]-[48]. Sin embargo, no realizan un plan experimental que les permita asegurar que los parámetros y niveles seleccionados sean eficientes en la experimentación; además solo estudian los efectos en función a las propiedades físico-mecánicas y no desde un punto de vista industrial (considerando costo).

Para proceder a la aplicación de esta metodología es importante conocer la materia prima, por ello en la siguiente sección se detallarán las características de las fibras naturales y los procesos existentes para obtener fibras técnicas. Es importante aclarar que el enfoque principal de las fibras naturales no es la biología ni la bioquímica, sino la descripción de los aspectos importantes de las fibras naturales que permitirán realizar el diseño y optimización del proceso de extracción.

## 2.2. Fibras Naturales

Las fibras son filamentos cuyo diámetro varía de 4  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ , pudiendo ser mayor en casos excepcionales. La función básica de este producto es soportar las cargas a las que son sometidos en las aplicaciones a base de un material compuesto [49]. Existen diferentes tipos de fibras, entre ellas están las de origen vegetal que son los materiales más abundantes que existen en el mundo y pueden ser utilizados en aplicaciones industriales [50]. Este material en su estado natural puede encontrarse en las paredes celulares; es decir, en el vástago, hojas y semillas de algunas de la plantas, ver la clasificación general de las fibras en la Figura 4 [51]. Las fibras extraídas a partir del Ichu corresponden a la clasificación pasto, por ello el proceso de obtención de estas fibras debe estar enfocado en este tipo de fibras. Por otro lado, la relación entre la composición química y sus propiedades físico-mecánicas juegan un rol importante para diseñar su proceso de obtención [13].

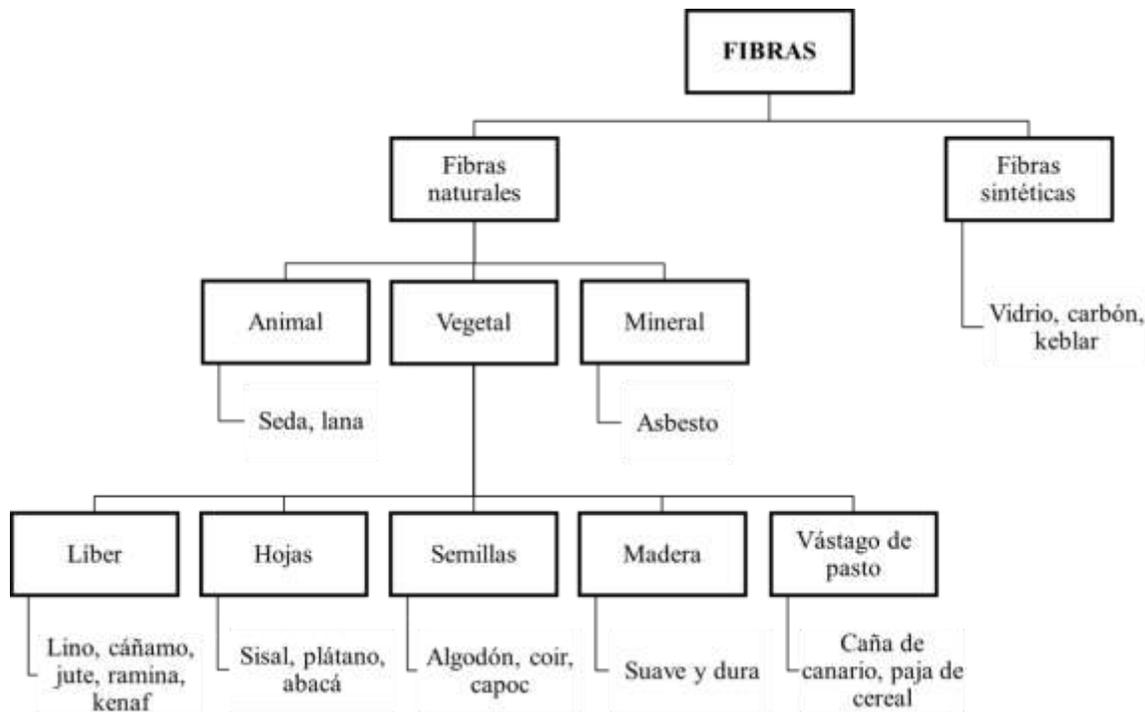
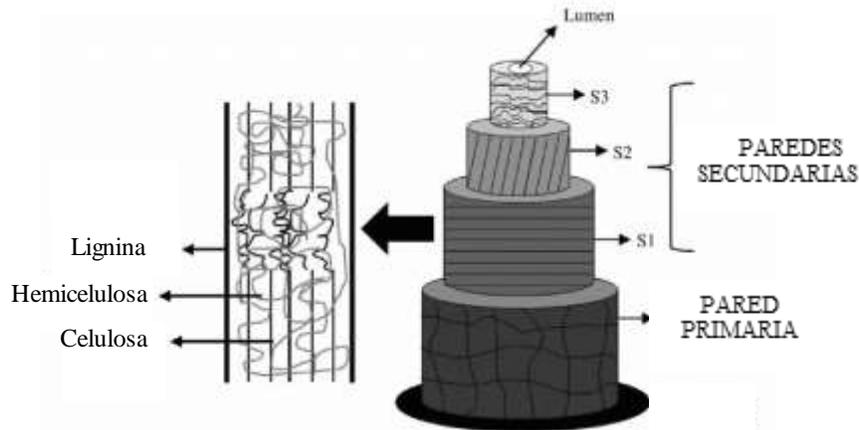


Figura 4. Clasificación de fibras [51]

### 2.2.1. Composición química de los recursos vegetales

Las fibras naturales son considerados un compuesto natural debido a la función que desempeñan sus componentes químicos (celulosa, hemicelulosa y lignina, ver Figura 5) [50]. La celulosa es un polímero lineal de glucosa que desempeña el rol de refuerzo; y los otros componentes químicos (no celulósicos), se comportan como la matriz; por ello, la celulosa posee mayor resistencia y rigidez por unidad de peso [50]. Sin embargo, el contenido de estos componentes de la fibra depende del lugar donde crece, estado de maduración, tejido de la planta y el proceso de extracción [13]. Por lo tanto, maximizar el contenido de celulosa permitirá un mejor desempeño de la fibra en la aplicación, ver Tabla 2 [51].



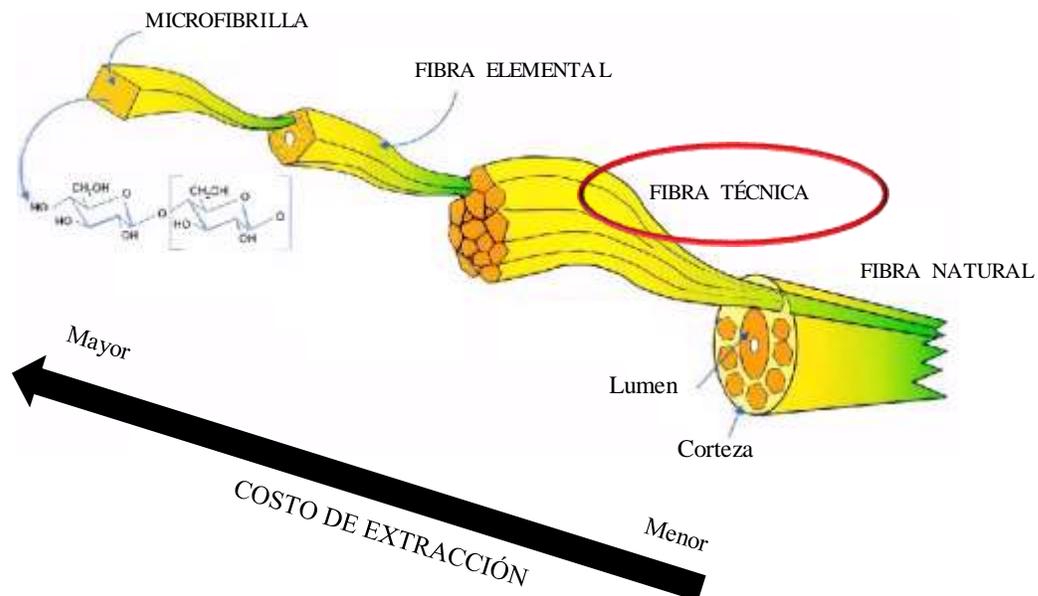
**Figura 5.** Composición química de la fibra natural [51]

| Propiedades                            | Componentes químicos |              |         |
|--|----------------------|--------------|---------|
|  | Celulosa             | Hemicelulosa | Lignina |
| Resistencia mecánica                   | Bueno                | Malo         | Malo    |
| Resistencia a la degradación térmica   | Bueno                | Bueno        | Malo    |
| Resistencia a la degradación biológica | Bueno                | Malo         | Malo    |
| Resistencia a la absorción de humedad  | Bueno                | Malo         | Malo    |
| Resistencia a la degradación UV        | Bueno                | Malo         | Malo    |

**Tabla 2.** Relación entre los componentes químicos y sus propiedades [Elaboración propia]

### 2.2.2. Estructura jerárquica de la fibra de origen vegetal

La estructura jerárquica de estas fibras nos ayudará a entender el nivel de extracción que necesitan, para obtener fibras que puedan ser usadas en aplicaciones industriales en materiales compuestos (ver, Figura 6). La unidad mínima de las fibras son las microfibrillas de celulosa que poseen diámetros a escala de nanómetros y poseen las mejores propiedades mecánicas; sin embargo, su obtención implica tecnologías y procesos más complejos que incrementan su costo [52]. El conjunto de estas microfibrillas se denominan fibras elementales (10 a 20  $\mu\text{m}$  de diámetro), las cuales a su vez forman las fibras técnicas (50 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro) [53]. Finalmente, las fibras técnicas se encuentran empaquetadas unidos a través de hemicelulosa y lignina. Dentro de esta jerarquía, las fibras técnicas son las más utilizadas en aplicaciones industriales debido a sus buenas propiedades mecánicas en relación al costo de producción [54]. Sin embargo, es importante considerar otros criterios para su escalabilidad.



**Figura 6.** Estructura jerárquica de la fibra natural y la comparación de sus costos [Modificado de 55]

### 2.2.3. Criterios adicionales para la industrialización de las fibras naturales

Las fibras naturales usadas en compuestos poliméricos a escala industrial deben no solo alcanzar las especificaciones técnicas, sino también otros requisitos importantes que permitan su comercialización a nivel industrial de manera sostenible. Los criterios que se consideran fundamentales para su industrialización son los siguientes: la disponibilidad de la planta (materia prima, MP), costo de su producción, bajo impacto ambiental en su ciclo de vida y mercado, ver Figura 7 [56].



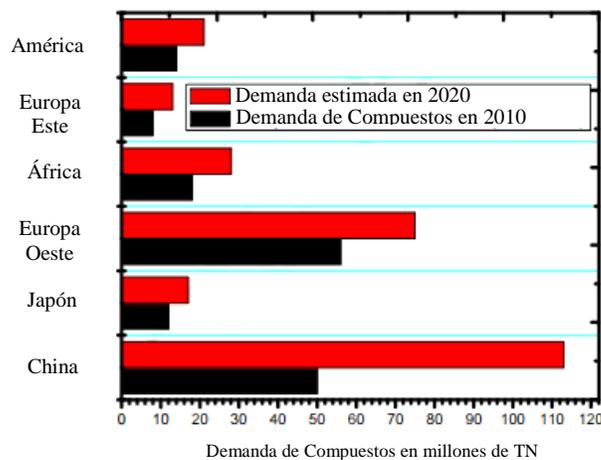
Figura 7. Criterios de industrialización [Elaboración propia]

La disponibilidad de la planta, hace referencia al área existente de terreno que puede usarse en la producción del cultivo, de tal manera que pueda satisfacer la demanda. Ello implica, que el nuevo uso de estos cultivos no afecte la vital utilización a la que comúnmente son destinadas las plantas (alimentos, medicina, textil u otros); ya que puede crear un impacto negativo en el entorno económico y social de los consumidores. Por ello, las fibras que se encuentran en residuos agrícolas, o que son de baja explotación y utilización, son más atractivas para las industrias y las investigaciones [57-58].

Por otro lado, el aspecto económico es un factor importante para lograr un producto sostenible en el mercado, por ello la reducción de los costos en la obtención de fibras puede lograr que sean más atractivas que otras, en términos de industrialización. Por lo general, el costo más alto para la obtención de estas fibras es el costo de extracción y tratamiento superficial; ya que involucra un alto consumo de energía [58]. El precio de las fibras naturales industrializadas (sisal, jute, coco) en el mercado de China varía de 3 a 6 USD el kilogramo (FOB) según la calidad de estos [59-61].

Las fibras naturales por lo general son biodegradables ya que se descomponen en corto tiempo, por ello tienen un menor impacto ambiental que las fibras sintéticas. Sin embargo, las fibras extraídas de principales plantas como el sisal, lino y cáñamo utilizan pesticidas y fertilizantes que afectan negativamente el ambiente y eleva el costo de obtención [62].

El mercado de las fibras técnicas naturales para aplicaciones como refuerzo en el desarrollo de productos fue estimada en el 2012 en un valor de 77 billones de euros y un volumen de 8.7 millones de toneladas [12]. Incluso se predice que la tasa de crecimiento de este mercado será de 10.2% durante los próximos 2 años [12]. Además, la demanda de esas fibras por continente aumentará en gran medida; solo en China la demanda se incrementará en más de la mitad, ver Figura 8. Estos pronósticos incentivan a estudiar la factibilidad de nuevas fibras naturales que puedan cerrar esta futura brecha.

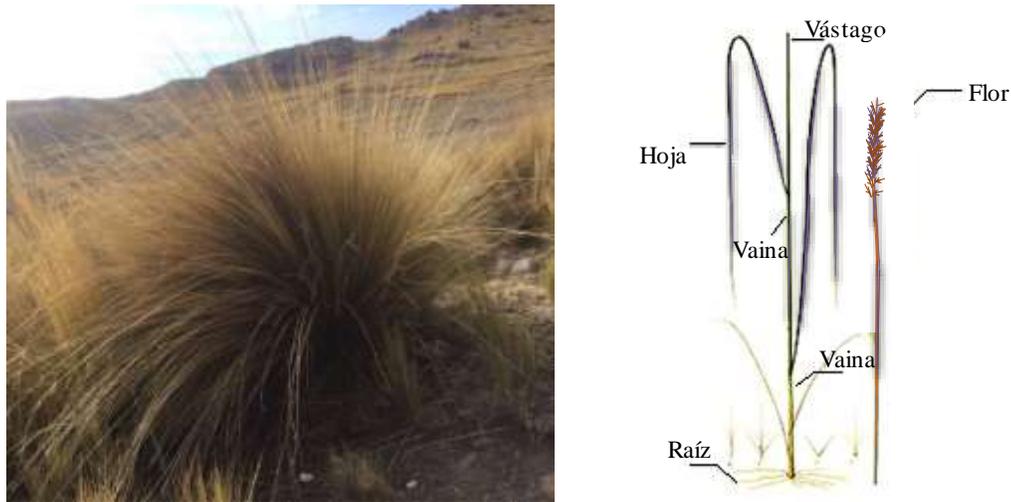


**Figura 8.** Demanda en el 2020 de fibras naturales por continentes [12]

#### 2.2.4. Ichu: Potencial fibra natural

El Ichu es un pasto que crece en las zonas altoandinas del Perú y es un recurso vegetal que puede ser aprovechado para la extracción de fibras técnicas [21]. Estudios recientes estimaron la disponibilidad de esta planta en territorio peruano, obteniendo 262 295,39 hectáreas y un rendimiento promedio de 1725 kg por hectárea [63]. Además de su alta disponibilidad, esta planta alcanza su madurez solo entre 4 a 6 meses

*Stipa obtusa* es una especie de Ichu que es dominante en las regiones de gran altitud (3800 - 4900 m.s.n.m.) y de baja palatabilidad (no deseable para alimento de animales) [64]-[65]. Esta especie posee hojas finas que pueden llegar a medir entre 0.8 a 1 metro, y están sujetas por una vaina que une a los tallos, los cuales poseen flores en forma de espigas, ver Figura 9 [64]. La Tabla 3 muestra su composición química, la cual es similar a otras fibras naturales en el contenido de celulosa, lo cual supone un buen rendimiento en el proceso de extracción de sus fibras técnicas [14, 66-68].



**Figura 9.** Partes de la planta de Ichu [Modificado de 66]

| Composición           | Cellulose    | Hemicellulose    | Lignin       | Extractives  |
|-----------------------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| <b>TAPPI standard</b> | T 203 cm-99  | Herbst technique | T 222 om-02  | T 204 cm-97  |
| <i>Stipa obtusa</i>   | 38.07 ± 0.91 | 26.52 ± 1.21     | 15.56 ± 0.72 | 14.57 ± 0.06 |
| Bamboo                | 41.54 ± 0.70 | 25.51 ± 1.1      | 22.06 ± 0.88 | 6.27 ± 1.53  |
| Coir                  | 39.5 ± 3.5   | 0.2              | 43 ± 2       | 1.8          |
| Kenaf                 | 53.8         | 33.9-            | 21.2         | 6.4          |

**Tabla 3.** Composición Química de Ichu (estado natural) y fibras naturales convencionales de acuerdo a la norma TAPPI [13-14, 66-68]

En el Perú, a pesar de su gran disponibilidad esta planta es poco utilizada. Actualmente se utiliza para la fabricación del puente Queswachaca, ubicada en Cusco que anualmente es renovado desde la época incaica. También es usado como alimento de emergencia para los animales (en épocas de sequía), en algunas construcciones de muros como material de refuerzo, y como material del techo [3]. Sin embargo, cada vez estos usos se reducen más, debido a la baja palatabilidad del Ichu, la tecnificación de la ganadería y al desarrollo de los materiales sintéticos, de esta manera esta planta se acumula año a año en el terreno [66].

El Ichu crece de manera natural y no utiliza fertilizantes, pesticidas ni sistemas de riego, y soporta las sequías; por lo cual no intensifica la competencia por el uso de agua y terrenos destinados a cultivos alimenticios. Por lo tanto, aporta ventajas ambientales que no tienen otras fibras naturales, como el lino, sisal, jute, cáñamo, entre otras [12]. Adicionalmente, el desarrollo industrial del Ichu puede aportar a la revaloración de los agricultores de estas zonas a través de nuevas oportunidades de trabajo, cuyos ingresos económicos representan los más bajos del Perú [24].

Por otro lado, el diámetro de sus hojas en estado natural es pequeño, lo cual supone bajo consumo de energía en el proceso de extracción mecánica, disminuyendo en gran medida el costo de esta fibra. Incluso, la materia prima (Ichu) es de bajo costo (aproximadamente 0.5 soles por kilogramos, en la plaza de Sicuani, Cusco) y puede llegar a menor costo en el campo (zona agrícola).

Según las características mencionadas del Ichu, esta planta tiene gran potencial para ser industrializada. En vista de ello, a continuación se realiza un estado de arte de los procesos existentes para obtener fibras técnicas naturales de especies similares.

### 2.3. Procesos y metodologías para obtener fibras técnicas naturales

Por lo general, las fibras técnicas naturales (industrializadas) son obtenidas a través de los siguientes subprocesos: plantación, cosecha, selección de la parte de la planta a utilizar, desfibrilado, lavado y secado, ver Figura 10. El subproceso de desfibrilado es el de mayor complejidad (influyen gran número de factores) e implica mayor uso de la ingeniería de procesos para obtener las fibras técnicas (refuerzo) [69]. Por ello, en esta sección este subproceso adquirirá mayor énfasis.

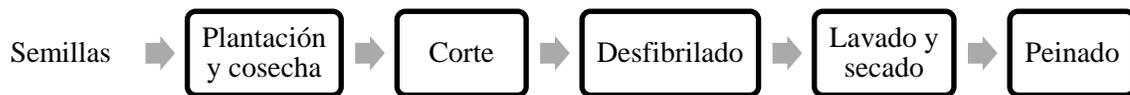


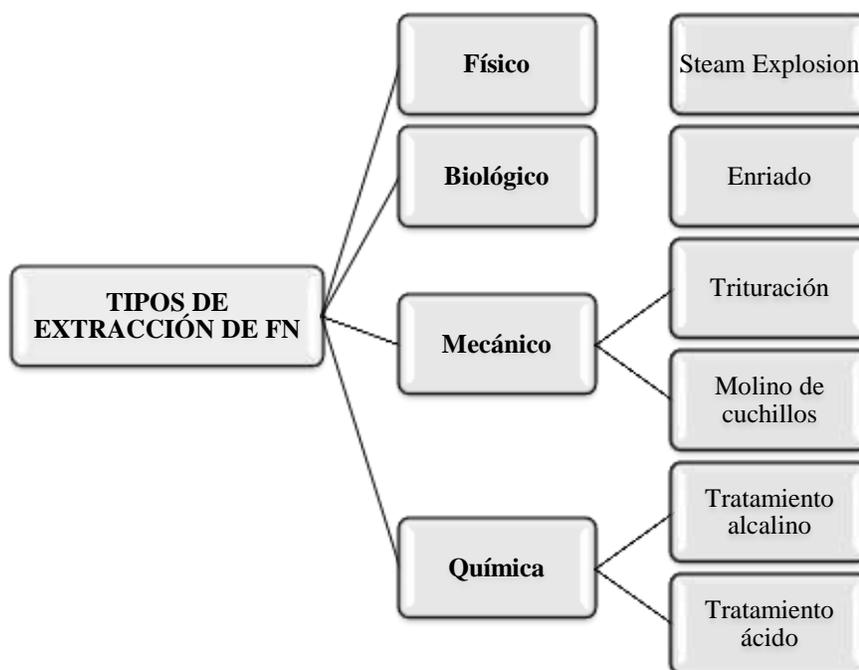
Figura 10. Proceso de obtención de FN

#### 2.3.1. Siembra/plantación y cosecha:

La siembra consiste en difundir las semillas en las zonas agrícolas para posteriormente cosechar la materia prima a utilizar, de las cuales se obtendrá las fibras técnicas. En este proceso, es muy común que se utilice productos químicos para incrementar el rendimiento de las plantas y/o protegerlas de algunas enfermedades [62]. La zona de plantación y el estado de maduración de la planta cosechada son factores que influyen en su estructura y su composición química de las plantas [51].

#### 2.3.2. Desfibrilado:

Este proceso consiste en reducir el contenido de componentes no celulósicos (lignina, hemicelulosa, pectina y otras sustancias) de la materia prima (recurso vegetal) para mejorar el funcionamiento de las fibras en su aplicación industrial (compuestos poliméricos) [69]. Los tipos de desfibrilado más utilizados para las plantas tipo pasto (como el Ichu, ver Figura 4) son: físico, mecánico, biológicos y químicos, ver la clasificación en la Figura 11 [13]. A pesar de la similitud con otras especies, los parámetros de desfibrilado son diferentes; ya que depende exclusivamente de cada especie y la composición química que posee. A continuación se describe los diferentes tipos de procesos de desfibrilado:



**Figura 11.** Tipos de extracción de fibra natural (FN) [13]

### 2.3.2.1. Explosión a vapor (Steam Explosion):

Este método es utilizado para extraer la lignina de las paredes celulares, sometiendo la materia prima a una autoclave (alta temperatura y presión). Este proceso es usado comúnmente en las industrias de pulpa de papel a partir de madera. Sin embargo, Zakikhani y Parnia afirman que este método no es efectivo para la extracción de fibras de origen no maderera, ya que no remueve completamente la lignina y se necesita procesos adicionales. Además el equipo necesario para su realización es de alto costo [70].

### 2.3.2.2. Enriado:

Este proceso consiste en remojar las fibras en agua por un determinado tiempo, para extraer fibras finas a través de la degradación microbiana de la hemicelulosa. Existen dos diferentes tipos de enriado, aeróbico o anaeróbica. Sin embargo, este proceso puede tardar meses para separar completamente las fibras. Por ello, se suele combinar con otros procesos y así reducir el tiempo de extracción [71].

### **2.3.2.3. Molino de cuchillos:**

Este mecanismo consiste en un desgarramiento mecánico a través de cuchillas giratorias que desfibra las fibras con el fin de reducir su diámetro (conminución). Este proceso no elimina los componentes no celulósicos; sin embargo a través de la conminución facilita el proceso químico posterior, permitiendo el ingreso de la solución alcalina y/o ácida [70].

### **2.3.2.4. Tratamiento alcalino:**

Este tratamiento es el más utilizado para extraer fibras por su eficiencia-costo y consiste en sumergir la materia prima en un recipiente de acero inoxidable con soluciones alcalinas (como hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, hidróxido de calcio u otros) [72]-[73]. Se utiliza este tipo de soluciones básicas ( $\text{pH} > 7$ ) ya que eliminan en gran medida los componentes no celulósicos (lignina Klason y hemicelulosa, principalmente). Además, elevar la temperatura del proceso permite reducir el tiempo de solubilización de la lignina.

A nivel industrial, para realizar los tratamientos químicos (alcalino) se necesitan dos equipos principalmente, basado en la producción de papel (proceso similar) [74]. El primer equipo es el reactor y se usa para preparar y mezclar la solución (reactivo químico y agua); y el otro es el digestor que puede ser continuo o por lotes; en el cual se realiza el tratamiento de las fibras con la solución.

### **2.3.3. Enjuague y Secado:**

Las fibras técnicas que han sido sometidas a los diferentes procesos de extracción deben ser libres de cualquier residuo químico para su aplicación; por ello las fibras son enjuagadas. Generalmente, para el enjuague se utiliza agua o una solución ácida para ayudar a neutralizar y reducir el uso de agua [75]. Finalmente, las fibras son secadas a una temperatura no mayor a  $70^{\circ}\text{C}$  por un tiempo de 16 horas.

## 2.4. Aplicación industrial de fibras técnicas naturales en productos laminados

El desarrollo de nuevos materiales amigables con el medio ambiente ha experimentado una gran expansión en diferentes campos de la industria. Las fibras técnicas de origen vegetal, es un claro ejemplo de esta tendencia, ya que están siendo utilizadas en diversos campos de la industria, en especial como refuerzo en materiales compuestos poliméricos para artículos de deportes, partes internas de automóviles, muebles de alta gama, entre otros, ver Figura 12 [56], [76]-[77].



**Figura 12.** Aplicaciones industriales de las fibras técnicas naturales [56], [76]-[77]

#### **2.4.1. Artículos de deporte**

La primera aplicación que marcó tendencia en el uso de fibras naturales en compuestos poliméricos para artículos de deporte fueron las raquetas de tenis Artengo en 2009, donde se combinó la alta capacidad de amortiguación de las fibras de lino con la alta rigidez y resistencia de las fibras de carbono [78]. Una de las ventajas resaltantes del uso de fibras naturales en este tipo de productos es que aumenta el factor de amortiguación en un 20 a 30% reduciendo con eficacia las vibraciones y, por lo tanto, el riesgo de lesiones musculares [79-80]. Además, la amortiguación de vibraciones aumenta el control del atleta sobre su equipo. Investigaciones demostraron que añadir fibra natural de lino en la fabricación de skis mejoró la precisión de maniobras de esquiadores profesionales [81]. Otros artículos similares como bastones de esquí, cañas de pescar, las laminillas de los arqueros de competición y marcos de bicicletas de carreras de alta gama presentaron reducción de la vibración al incluir estas fibras [82-84].

En otros productos, la relación más estrecha entre la naturaleza y el deporte impulsa la reducción del impacto ecológico, como las tablas de surf. Empresas como NSP, US Hemp y Samsara comercializan tablas de surf reemplazando los materiales sintéticos por materiales biodegradables [85-87]. Las fibras técnicas naturales como bambú, lino y cáñamo son utilizados como refuerzo en este producto y reemplazan la fibra de vidrio en más de 50% en volumen.

#### **2.4.2. Muebles de alta gama y diseño interior**

El uso de fibras naturales en el diseño de muebles está siendo atractivo en un contexto tecnológico y al mismo tiempo clave para proporcionar opciones únicas y creativas en términos de formas, texturas y aplicaciones innovadoras. Un ejemplo revelador son “Katra Chair” (2011) realizado de fibra de lino que se caracteriza por su estricta geometría y elegancia [56]. Otros diseñadores también han desarrollado diversos productos innovadores en base a compuestos de fibras naturales tales como Hemp chair (Werner Aisselinger), Compos Cafe Chair (Samuli Naamanka), Layered Chair (Jorrit Takema), Lighthness Table

(David Derksen), Low Chair by Pastoe (Maarten van Severen y Fabian Shwaerzler), Biocomposite outdoor furniture (Studio Ineke Hans) y muchos más [56].

### **2.4.3. Automóviles**

La producción de automóviles se ha incrementado rápidamente en el último siglo, debido a la modernización del sistema de transporte y el desarrollo económico en los países desarrollados [88]. Hoy en día, estas industrias han tenido que emplear nuevas tecnología para hacer frente a regulaciones ambientales, las cuales exigen que sus vehículos sean más amigables con el medio ambiente sin afectar su rentabilidad [19]. Las fibras naturales en compuestos poliméricos (FNC) son una alternativa que están optando estas industrias, para reemplazar las fibras de vidrio en las partes internas y externas del vehículo (paneles de la puerta, respaldares de los asientos, forro de arranque, tablero, entre otros), ver Tabla 4 [89].

En la actualidad, la cantidad de fibras naturales utilizada en un vehículo alcanzó aproximadamente 15 kg, permitiendo reducir el peso del vehículo hasta en un 30% y también el costo en un 20% [89]-[90]. La aplicación de las fibras naturales está incrementando rápidamente en este sector con una tasa de 20%, debido a su biodegradabilidad, resistencia aceptable, manipulación segura, mejora en la recuperación energética, bajo consumo de energía en su producción, etc [89]. Entre las fibras más utilizadas en esta aplicación destacan las fibras de jute, sisal y lino son las fibras naturales más utilizadas en esta aplicación.

| Compañía      | Modelo   | Parte aplicada con FNC  |
|---------------|--|---|
| Audi          | A2,A3, A4, Avant, A6, A8, Roadster Coupe 3,5 y7 seres y otros C5 | Respaldos del asiento, el lado y el panel trasero de la puerta, revestimiento de arranque y perchero                                      |
| BMW           | Series 3, 5 y 7 y otros  | Paneles de puerta, panel de revestimiento del techo, revestimiento de arranque, los respaldos de asiento, paneles de aislamiento de ruido |
| Ford          | Mondeo CD 162, Focus   | Los paneles de las puertas, el pilar B y el revestimiento del maletero  |
| Mercedes-Benz | Trucks   | Cubierta interna del motor, aislamiento del motor, visera solar, aislamiento interior, parachoques, caja de rueda y cubierta de techo     |
| TOYOTA        | Brevis, Harrier, Celsior, RAUM                                   | Paneles de las puertas, respaldos de los asientos y cubierta de las llantas de repuesto   |
| Peugeot       | New model 406  | Parte posterior del asiento y el estante de la maletera   |
| Volkswagen    | Golf, Passar, Vriant, Bora, Fox, Polo                            | Panel de la puerta, respaldo del asiento, panel del final de la tapa de la bota y forro de arranque                                       |

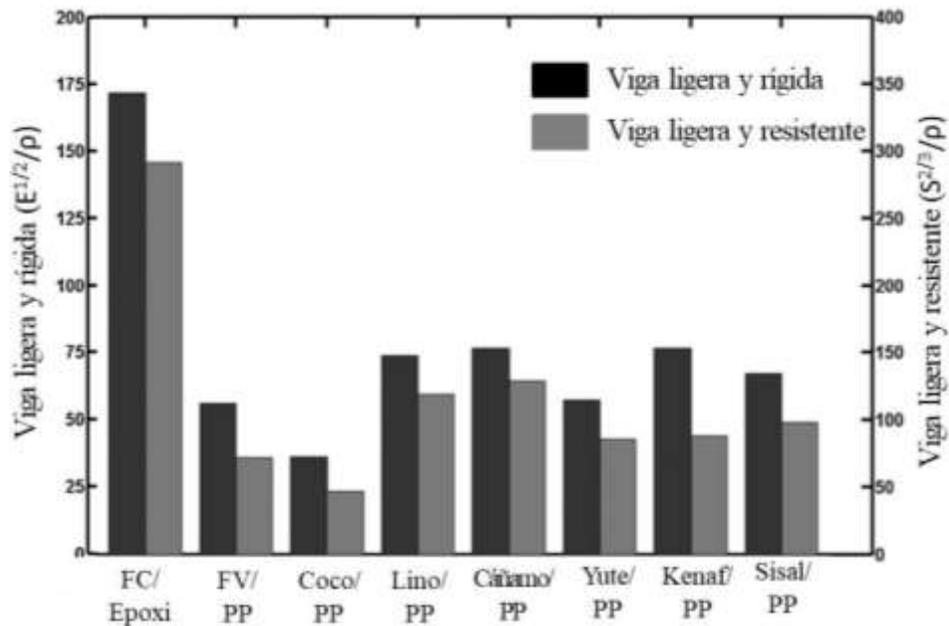
**Tabla 4.** Aplicaciones de FNC en automóviles [89]

Por otra parte, los pronósticos de crecimiento de este mercado exceden la oferta actual, lo cual incentiva investigar la factibilidad de nuevas fibras naturales [12]. Por ello, en la siguiente sección, se determina las especificaciones técnicas que debe cumplir la fibra de Ichu procesada para su aplicación industrial.

## **2.5. Evaluación de la factibilidad técnica de fibras naturales**

La evaluación de la calidad de las fibras naturales para su uso como refuerzo en compuestos poliméricos, se puede realizar: a) nivel de fibra y b) nivel de compuestos. El análisis solo en fibra está sujeto a mucho ruido (variables no controlables del sistema de medición) y no estudia el efecto de la compatibilidad entre la fibra y la matriz polimérica, siendo un factor clave en su aplicación industrial [89]. En cambio, el análisis a nivel de compuesto es más completo ya que evalúa la compatibilidad y el sistema de medición es más confiable.

La evaluación de la calidad de las fibras en un compuesto se mide a través de sus propiedades mecánicas y está muy relacionado a la aplicación industrial. Investigaciones de F. Ahmad y Natalia et., utilizan el índice de materiales (IM) como un indicador para evaluar si las fibras naturales pueden reemplazar a las fibras sintéticas en compuestos poliméricos para paneles y/o vigas de componentes automovilístico, ver Figura 13 [89-91]. Los IM dependen de la resistencia, rigidez y densidad del compuesto laminado reforzado con las fibras (en forma de viga) sometido a un esfuerzo a flexión [92]. Sin embargo, las condiciones en las que fueron evaluados estos compuestos, tales como utilizar fibras cortas y en dirección aleatorias, no son adecuadas para un análisis comparativo. Esto debido a la presencia de variables no controlables, como el efecto del alineamiento de las fibras y variación en su longitud que alteran los resultados. Además, al comparar los resultados obtenidos de diferentes fibras naturales y sintéticas, utilizan los datos máximos obtenido, lo cual incrementa la incertidumbre del error.



**Figura 13.** Índice de material para un panel ligero y rígido (izquierda) o ligero y resistente (derecha) sometido a carga de flexión [89]

Otras investigaciones, evalúan las fibras naturales a nivel de compuestos determinando sus propiedades de resistencia y rigidez en flexión y tracción, en condiciones más homogéneas (unidireccional y fibras continuas), ver Tabla 5 [93-97]. Sin embargo, para la selección de materiales para una aplicación industrial en específico se suele usar el índice de materiales, ya que representa una combinación de las propiedades que necesitan para funcionar adecuadamente en las condiciones a las que son sometidas, según su aplicación [92].

| Compuesto<br>(fibra +<br>matriz) | Propiedades en Flexión               |                                     |                                  |                                 |                                  | Ref. |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------|
|                                  | Resistencia<br>Longitudinal<br>(MPa) | Resistencia<br>Transversal<br>(MPa) | Rigidez<br>Longitudinal<br>(GPa) | Rigidez<br>Transversal<br>(GPa) | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |      |
| Curaua + PE                      | 130 ±10                              | 16 ±1.00                            | 7.8 ±3.00                        | 1.7±0.50                        | 1.45                             | [93] |
| Jute + Epoxi                     | 158 ±18.90                           | 25.7 ±2.17                          | 18 ±1.92                         | 2.73±0.28                       | 1.32                             | [94] |
| Jute + PE                        | 145+-21.94                           | -                                   | 10.64±1.41                       | -                               | 1.35                             | [95] |
| Lino + Epoxi                     | 218                                  | 17.7                                | 8                                | 0.36                            | 1.5                              | [96] |
| Bambú + PP                       | 170 ±10                              | -                                   | 20 ±3.5-                         | -                               | 1.56                             | [97] |

Dónde: PE: Poliéster PP: Polipropileno

**Tabla 5.** Propiedades Mecánicas en Flexión de Compuestos con Fibras Naturales [93-97]

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA Y ALCANCE**

Según la teoría descrita, existen diversos estudios que soportan la oportunidad de desarrollar un proceso que permita extraer nuevas fibras técnicas naturales a partir del Ichu. Por ello, en este capítulo se definirá el alcance y la metodología utilizada para llevar a cabo el diseño de dicho proceso.

#### **3.1. Definición del proyecto:**

##### **3.1.1. Enfoque:**

La finalidad de esta investigación es diseñar un proceso de producción de fibras técnicas a partir del Ichu desde una perspectiva industrial, considerando la pre-factibilidad técnica y optimización de los costos de producción de esta fibra. Para alcanzar ello, se manipularán los parámetros principales del proceso de extracción, buscando el balance entre los costos referenciales de producción y el cumplimiento técnico.

Los experimentos a nivel de laboratorio permitieron obtener resultados para así compararlos con las especificaciones técnicas, de este modo el enfoque es cuantitativo.

##### **3.1.2. Alcance y contexto**

Basado en la literatura revisada, existen varios procesos diseñados para obtener una fibra técnica a partir de otras materias primas. En esta investigación, se desarrollará un proceso diseñado exclusivamente para la obtención de fibras de Ichu que cumplan con las especificaciones técnicas de los índices de materiales de compuestos poliméricos reforzado con la fibra natural industrializada (fibra de yute) y en condiciones de una viga en flexión. En la Tabla 6, se muestran los índices de materiales de compuestos laminados reforzados con fibras de yute. Estos resultados fueron calculados en base a las propiedades mecánicas de la Tabla 5 [93-94]. Por otro lado, la evaluación del costo de producción en planta (EXW) de las

fibras de Ichu considerarán los elementos de producción basados en la estructura de costos (No incluye el costo de innovación, ni de patentes) [98].

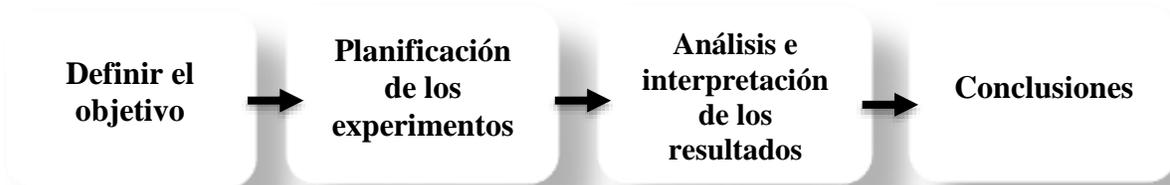
| Índice de Material (IM)                       | Unidad                   | Límite Inferior | Objetivo |
|---|--------------------------|-----------------|----------|
| Resistencia Longitudinal ( $S_L^{1/2}/\rho$ ) | MPa/(Mg/m <sup>3</sup> ) | 18.33           | 20.45    |
| Resistencia Transversal ( $S_T^{1/2}/\rho$ )  | MPa/(Mg/m <sup>3</sup> ) | 6.22            | 6.60     |
| Rigidez Longitudinal ( $E_L^{2/3}/\rho$ )     | GPa/(Mg/m <sup>3</sup> ) | 2.25            | 2.42     |
| Rigidez Transversal ( $E_T^{2/3}/\rho$ )      | GPa/(Mg/m <sup>3</sup> ) | 1.19            | 1.25     |

S: Resistencia a la flexión (L: longitudinal o T: transversal), E: Modulo de elasticidad y  $\rho$ : densidad

**Tabla 6.** Especificaciones técnicas de los compuestos laminado (flexión) [Elaboración propia]

### 3.2. Diseño Experimental

La metodología experimental a utilizar es Diseño de experimentos (DOE) y su implementación contemplará una experimentación secuencial, es decir se realizará más de una unidad experimental; así, alcanzar una búsqueda completa del punto óptimo (combinación óptima de los parámetros del proceso). Además, cada unidad experimental será desarrollada de acuerdo a las etapas de DOE, según Montgomery [29]. A continuación se describe las etapas de DOE, que será utilizado en cada unidad experimental (Figura 14).



**Figura 14.** Etapas de DOE [29]

#### 3.2.1. Definir el objetivo:

En esta etapa se pretende establecer una meta de forma cuantificable, es decir, plantear un valor que debe alcanzar la(s) variable(s) de respuesta. Este valor puede ser un rango o simplemente uno de los límites (superior e inferior). También, el objetivo puede ser la evaluación y cuantificación del efecto de una o más variables en la(s) variable(s) de respuesta.

### **3.2.2. Planificación de los experimentos:**

Esta etapa es la más importante, debido a que en ella se decide todo lo referente a las pruebas, las cuales son punto clave para obtener resultados de manera eficaz y eficiente. El plan experimental se divide en las siguientes sub-etapas: identificar las variables a estudiar, especificar el sistema de medición de las variables de respuesta y desarrollar las matrices, las cuales son descritas a continuación.

#### **3.2.2.1. Identificación de las variables a estudiar:**

En esta primera sub-etapa, se usará la herramienta de Ishikawa (diagrama de causa-efecto) y el conocimiento de procesos similares; para identificar aquellas variables que serán manipuladas (variables o factores a estudiar) en el experimento. Estas variables deben ser controlables, es decir que a través de un mecanismo pueda manipularse su nivel (valor numérico o categórico).

#### **3.2.2.2. Especificar el sistema de medición de las variables de resultado:**

El sistema de medición permitirá obtener el valor de las variables de respuesta de los experimentos diseñados. Este sistema debe ser estandarizado para poder reducir el error provocado por ruidos del proceso.

#### **3.2.2.3. Diseño de las matrices experimentales**

Esta subetapa consiste en definir las matrices o la lista de los tratamientos a ejecutar, según el tipo de diseño experimental que mejor se adapte al objetivo definido, ver Figura 3. También, se deben seleccionar la resolución experimental, el número de repeticiones, los niveles de las variables a estudiar, entre otros.

### 3.2.3. Análisis e interpretación de los resultados

En esta etapa, los resultados obtenidos (ejecución de los experimentos) son analizados a través de herramientas estadísticas (Tabla 7), con el fin de inferir objetivamente la magnitud de los efectos (variables estudiadas) en la(s) variable(s) de respuesta; así mismo, cuantificar la relación entre ellas. Las pruebas estadísticas se realizarán usando el software MINITAB 17. Asimismo, el análisis estadístico será respaldado e interpretado por una justificación técnica que explique los resultados del análisis.

|                       |  | Distribución Normal |           |                     |          | Distribución no Normal |        |                     |                |
|-----------------------|--|---------------------|-----------|---------------------|----------|------------------------|--------|---------------------|----------------|
|                       |  | CONTINUA            | T-Student | 2T-Student          | ANOVA    | Correlación / Pearson  | Signos | Man Withney         | Kruskal wallis |
| DISCRETA              |  | Chi2                |           | Regresión Logística |          | Chi2                   |        | Regresión Logística |                |
|                       |  | 1                   | 2         | 3 a 30              | 31 a más | 1                      | 2      | 3 a 30              | 31 a más       |
|                       |  | Discreta            |           | Continúa            |          | Discreta               |        | Continúa            |                |
| VARIABLES A CONTROLAR |  |                     |           |                     |          |                        |        |                     |                |

**Tabla 7.** Pruebas estadísticas según el tipo de variables de respuesta y a controlar (discreta y continua) [99]

### 3.2.4. Conclusiones

Finalmente, se realiza las conclusiones comparando los resultados obtenidos con los objetivos planteados. También, se mencionarán las decisiones y/o acciones a realizar.

Las etapas de DOE mencionadas serán aplicadas a cada unidad experimental, las cuales han sido organizadas en cinco fases y se describen a continuación.

### 3.3. Fases de los experimentos secuenciales propuestos:

Los experimentos secuenciales han sido ordenados y clasificados en cinco fases, ver Figura 15 y son descritas en líneas posteriores.

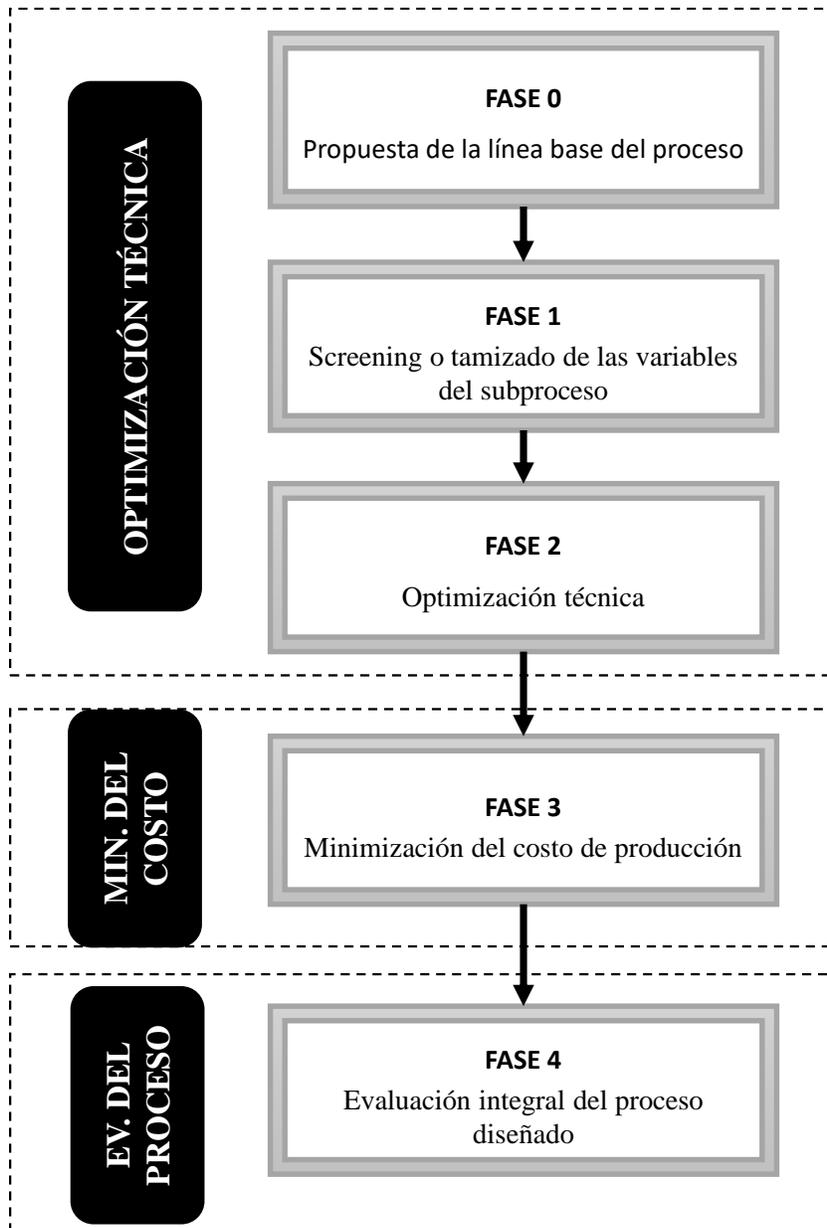


Figura 15. Fases de los experimentos secuenciales [Elaboración propia]

### 3.3.1. Fase 0: Propuesta de la línea base del proceso

En esta primera fase, se seleccionarán y se describirán los procesos para obtener fibras técnicas a partir del Ichu, basado en el estado de arte de los procesos de extracción de otras fibras naturales. Los criterios de selección son: tipo de fibra (pastos), costos, escalabilidad, y disponibilidad de los equipos en el laboratorio. En esta fase también se seleccionarán las características de la materia prima, con el objetivo de reducir la variabilidad de sus propiedades.

### 3.3.2. Fase 1: Screening o tamizado

En esta fase se aplicará DOE para evaluar el proceso propuestos en la Fase 0 e identificar aquellos procesos de extracción que permiten alcanzar las especificaciones técnicas del proceso. Basado en ello, la capacidad para eliminar componentes no celulósicos de la fibra de Ichu, denominado Nivel de Severidad, la cual será utilizada como la variable de respuesta, ver Figura 16. Sin embargo, es necesario establecer el mínimo Nivel de Severidad, en el cual las fibras obtenidas alcanzan las especificaciones técnicas en un compuesto (Índice de Materiales en flexión, Tabla 6), como se detalla en la siguiente fase.

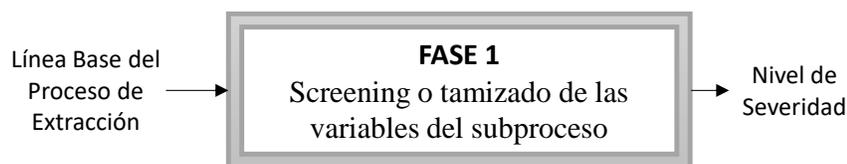
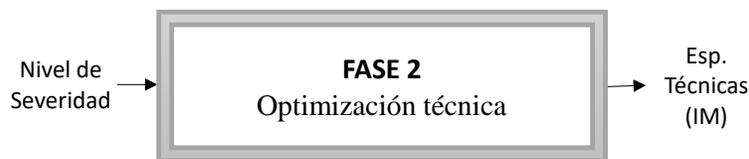


Figura 16. Sistema de experimentación - Fase 1

### 3.3.3. Fase 2: Optimización técnica

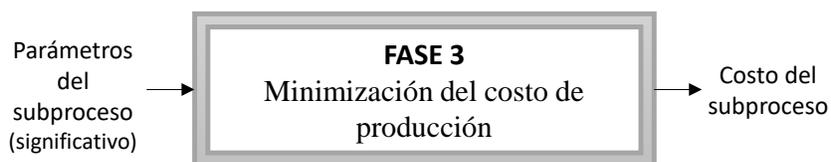
En esta fase se determinará el Nivel de Severidad óptimo (mínimo) del proceso que cumplan las especificaciones técnicas establecidas en el alcance de la investigación (Alcance y contexto), aplicando DOE. De esta manera, encontrar un balance que minimice el Nivel de severidad, es decir la pérdida de la materia prima (Ichu); y al mismo tiempo cumpla con las especificaciones de las fibras (Índice de materiales en compuesto polimérico), ver Figura 17.



**Figura 17.** Sistema de Experimentación – Fase 2

### 3.3.4. Fase 3: Minimización del costo de producción

En base al Nivel de Severidad óptimo del proceso de extracción a partir del Ichu, se determinarán los parámetros óptimos del subproceso significativo, en términos de su costo referencial de producción a escala industrial (afecta al subproceso significativo), aplicando DOE, ver Figura 18.



**Figura 18.** Sistema de Experimentación – Fase 3

### 3.3.5. Fase 4: Evaluación integral del proceso de producción

Finalmente, en esta fase se calcularán los costos referenciales para producir un kilo de Ichu, en base al proceso diseñado a nivel industrial; así comparar la competitividad económica con otras fibras naturales comerciales.

En base al diseño de producción definido se evaluará la rentabilidad económica y financiera de la producción y comercialización de las fibras técnicas de Ichu. Para ello, se determinará los siguientes indicadores de rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Tasa de Interés de Retorno (TIR), la relación beneficio costo y periodo de recuperación. Además, se realizará un análisis de sensibilidad de las variables críticas en los presupuestos del proyecto.

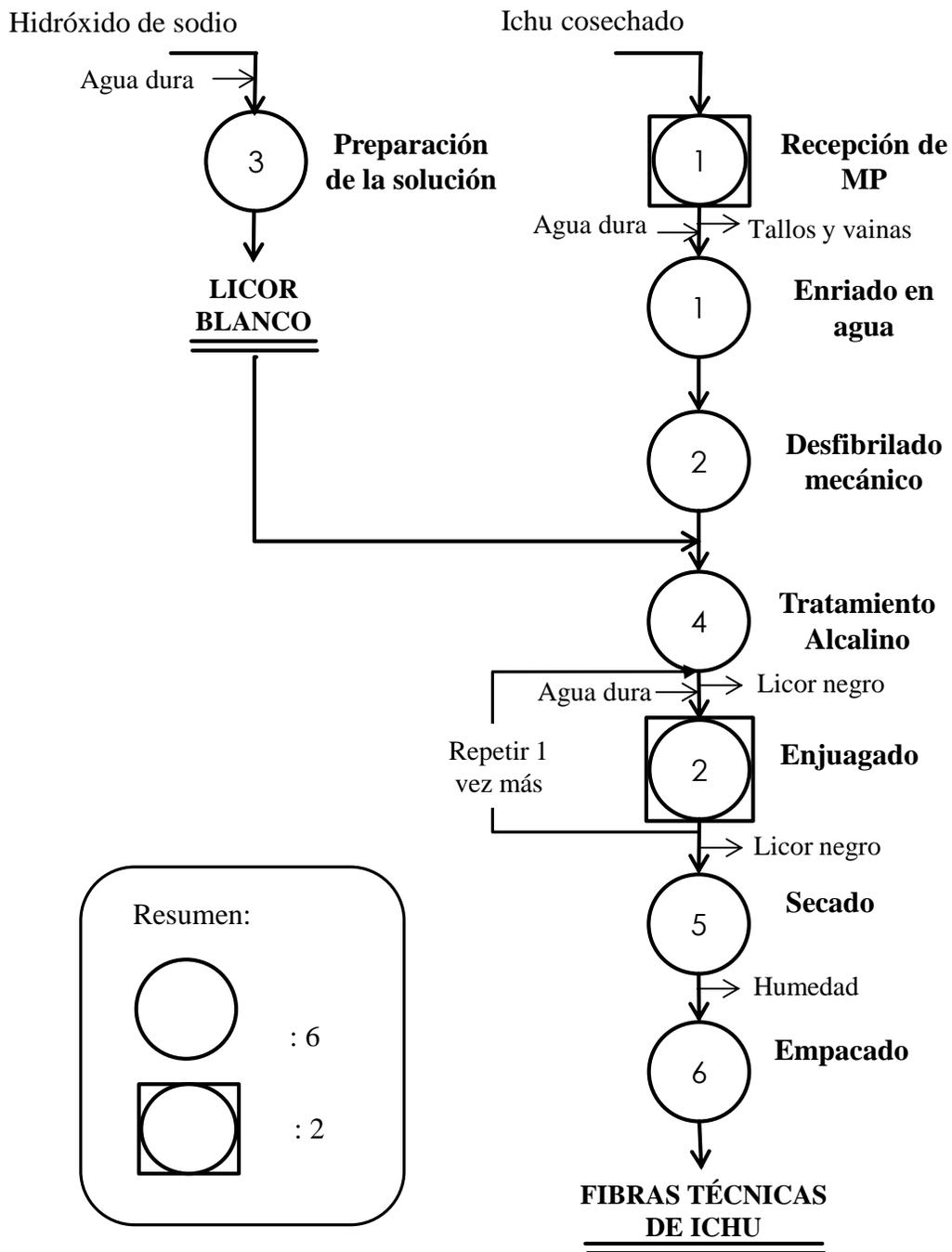
## **CAPITULO III**

### **EVALUACIÓN TÉCNICA**

En este capítulo, se desarrollarán las tres primeras fases de los experimentos secuenciales que permitirán definir los subprocesos de extracción (Figura 15). En la Fase 0, se desarrollará la línea base del proceso a partir de la recopilación bibliográfica y pruebas preliminares. En la Fase 1, se evaluará el proceso propuesto (línea base) para identificar y filtrar los subprocesos significativos que permitirán alcanzar las especificaciones técnicas del proceso (Nivel de Severidad). Finalmente, en la Fase 2 se establecerá el indicador de proceso denominado Nivel de Severidad mínimo para alcanzar las especificaciones técnicas de la fibra en compuesto polimérico (Índice de Materiales, flexión). En resumen, en este capítulo se establecerá el proceso de obtención de fibras técnicas de Ichu en función a su factibilidad técnica.

#### **4.1. Fase 0: Propuesta de la línea base del proceso de obtención de fibra técnica de Ichu**

En base a la revisión bibliográfica y las características de la materia prima, se propone el proceso de obtención de fibra de Ichu a nivel industrial, que consiste en los siguientes subprocesos: recepción de la materia prima (MP), enriado de agua, desfibrilado mecánico, tratamiento alcalino (soda cáustica), enjuague, peinado y secado, ver Figura 19. En las siguientes secciones se detallará cada subproceso propuesto:



**Figura 19.** Diagrama de Operación del proceso (DOP) de producción de Ichu [Elaboración propia]

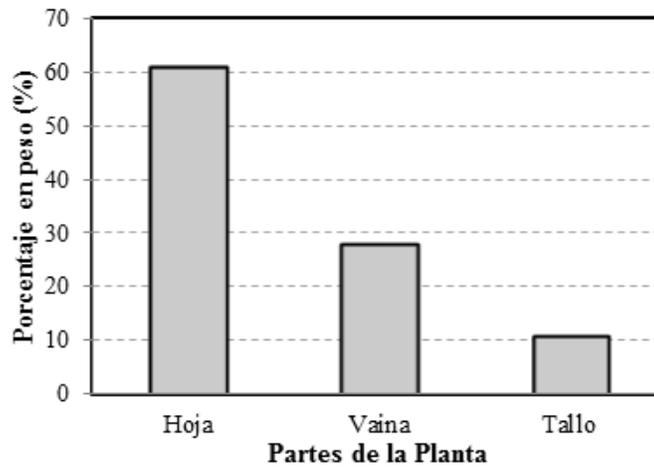
#### 4.1.1. Recepción de materia prima (MP)

En este subproceso se establecerán los requerimientos técnicos de la materia prima a utilizar, con el fin de reducir la variabilidad de la calidad de la fibra. La especie de Ichu seleccionada es *Stipa obtusa*, por su gran disponibilidad y fácil procesamiento en comparación a otras especies (según pruebas preliminares) [63]. El reconocimiento visual de la especie es a través de la forma transversal de las hojas de esta planta (forma cerrada) y la forma de sus flores tipo espiga, Figura 9.

Por otro lado, en las pruebas preliminares se observó que las fibras obtenidas del proceso de extracción varían de acuerdo a la parte de la planta (hoja, tallo o vaina). Como se observa en la Figura 20, después de someter la planta de Ichu a un mismo proceso de extracción (tratamiento alcalino), las fibras obtenidas a partir de las hojas presentan una mayor desfibrilación, es decir son más fáciles de procesar. En cambio, la parte de la vaina y aún más el tallo necesitan procesos más severos para obtener fibras técnicas con diámetro 50 a 100  $\mu\text{m}$ , debido a que son más gruesos y su corteza es más compacta. Por lo tanto, se decide establecer el proceso utilizando las hojas de la planta, así reducir la variabilidad en sus propiedades. Esta decisión también se ajusta a los criterios de disponibilidad de materia prima ya que la proporción en masa de las hojas es mayor en la planta en comparación al resto de sus partes, ver Figura 21.



**Figura 20.** Apariencia de fibras de Ichu procesadas (tallo, vaina y hoja)



**Figura 21.** Porcentaje en peso de las partes del Ichu

#### **4.1.2. Enriado en agua**

En este subproceso, la MP seleccionada es sumergida en agua por un determinado tiempo (en condiciones ambientales). El objetivo es ablandar las fibras internamente, de esta forma facilitar los tratamientos posteriores. A nivel industrial, es importante considerar que el tiempo de este subproceso no afecte la flexibilidad de la producción (máximo 24 horas).

#### **4.1.3. Desfibrilado Mecánico**

Seguido del enriado en agua, la MP es desfibrilada mecánicamente a través de un molino (a escala industrial). Este subproceso tiene la finalidad de facilitar el tratamiento alcalino a través de la reducción del diámetro de la fibra para aumentar el área de contacto.

#### **4.1.4. Tratamiento alcalino**

Las fibras obtenidas son sumergidas en una solución alcalina a base NaOH (escamas de soda cáustica a 98% de pureza) previamente preparada en un reactor (a escala industrial). La concentración, la temperatura y el tiempo serán establecidos en las siguientes fases de experimentación.

#### **4.1.5. Enjuague, secado y empaçado**

Las fibras son enjuagadas con agua (dura) hasta que el agua residual tenga color claro. Seguidamente, se procede a medir el pH, para comprobar que las fibras hayan sido neutralizadas. Finalmente, las fibras son peinadas y secadas a 60°C por 12 horas para procederlas a empaçado, según el requerimiento del cliente.

Los procesos propuestos de enriado en agua, desfibrilado mecánico y tratamiento alcalino serán evaluados en la siguiente fase con el fin de establecer los parámetros óptimos técnicamente.

### **4.2. Fase 1: Screening**

En esta fase se evaluará el proceso propuesto en la fase 0 a través de una serie de experimentos a nivel de laboratorio, basado en la metodología de Diseño de Experimentos.

#### **4.2.1. Objetivo:**

Esta fase tiene como objetivo identificar las variables significativas del proceso de extracción en función de la capacidad de remover la mayor cantidad de componentes no celulósicos o Nivel de Severidad (término asignado).

#### **4.2.2. Identificación de las variables a estudiar**

Los factores o variables que pueden influir en el subproceso de extracción son determinadas en el Diagrama de Ishikawa, ver la Figura 22. A partir de este diagrama se decide estudiar el efecto de las siguientes variables:

- Tiempo de Enriado en agua
- Tiempo de Desfibrilado mecánico
- Temperatura, tiempo y concentración del tratamiento alcalino.

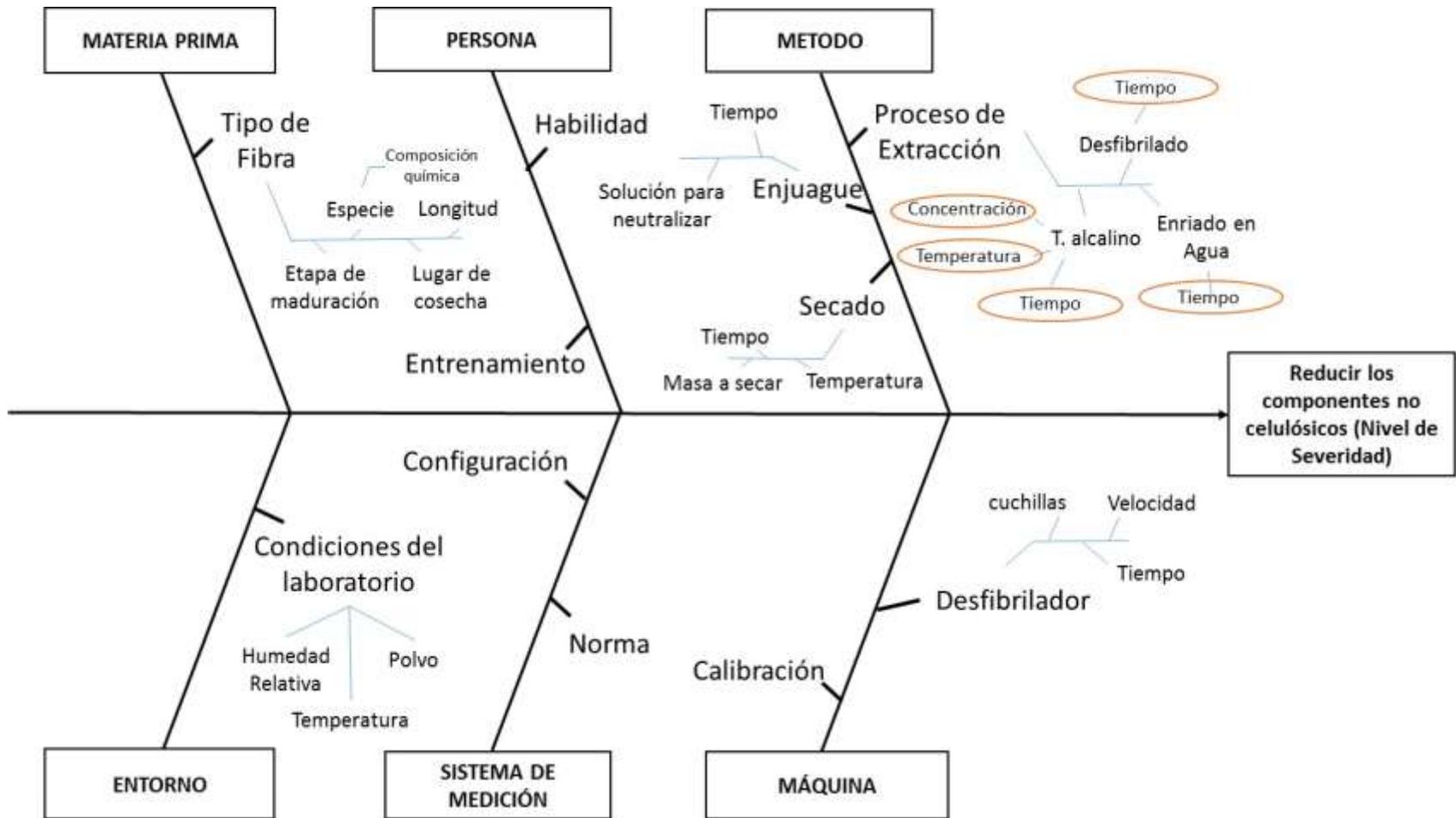


Figura 22. Diagrama de Ishikawa para maximizar la calidad de las fibras (Nivel de Severidad) [Elaboración propia]

### 4.2.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de Respuesta

El Nivel de Severidad es denominado al grado que tiene el proceso para disolver componentes no celulósicos y se mide por gravimetría (técnica). Este método determina el porcentaje de masa perdida de las fibras en el proceso de extracción a base seca (sin humedad), mediante la ecuación (1) (donde: NS: Nivel de Severidad,  $M_o$ : masa inicial, h: humedad y  $M_f$ : masa final).

$$NS = \frac{M_o(1 - h) - M_f}{M_o(1 - h)} \quad (1)$$

Las muestras de Ichu están basadas en los requerimientos de la MP (especie *Stipa obtusa* y parte hoja de la planta) con una masa inicial de 8 gramos. Para el desfibrilado mecánico, se usa una licuadora (marca Oster BLSTVB-P00-51) graduada a velocidad media (2000 RPM, aproximadamente) y usando una proporción de 1L de agua para 12.5 gramos de MP (establecido en base a observación). La medición de los pesos se realiza utilizando una balanza digital de dos dígitos de precisión.

### 4.2.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento

Los experimentos ejecutados fueron planificados de acuerdo al diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ . Se eligió este diseño para reducir en 50 % la cantidad de experimentos a realizar, ya que la cantidad de variables a estudiar son más de 3 (5 variables). Los detalles de los experimentos y matriz experimental se muestran en la Tabla 8 y 9.

Tipo de diseño: Diseño factorial 2<sup>5-1</sup>

Detalles del diseño

Número de factores: 5  
 Número de respuesta (s): 1  
 Número de repetición(es): 2  
 Número de corridas: 32  
 Número de bloques: 1  
 Número de puntos centrales: 0  
 Resolución: V

| <u>Factores</u>  | <u>Alto (+)</u> | <u>Bajo (-)</u> | <u>Unidad de medición</u> |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Temperatura TA   | 30              | 60              | Celsius                   |
| Concentración TA | 0.5             | 1               | Molar                     |
| Tiempo TA        | 30              | 60              | Minutos                   |
| Tiempo E.        | 2               | 24              | Horas                     |
| Tiempo M.        | 8               | 30              | Segundos                  |

Respuestas

Nivel de Severidad Porcentaje (%)

\*E: Enriado en agua

\*M: Desfibrilado mecánico

\*TA: Tratamiento alcalino

**Tabla 8.** Detalles del diseño experimental

| <b>Muestras</b> | <b>Temperatura TA</b> | <b>Concentración TA</b> | <b>Tiempo TA</b> | <b>Tiempo E.</b> | <b>Tiempo M</b> |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| IH-PS-01        | +                     | +                       | +                | +                | +               |
| IH-PS-02        | +                     | +                       | +                | -                | -               |
| IH-PS-03        | +                     | +                       | -                | +                | -               |
| IH-PS-04        | +                     | +                       | -                | -                | +               |
| IH-PS-05        | +                     | -                       | +                | +                | -               |
| IH-PS-06        | +                     | -                       | +                | -                | +               |
| IH-PS-07        | +                     | -                       | -                | +                | +               |
| IH-PS-08        | +                     | -                       | -                | -                | -               |
| IH-PS-09        | -                     | +                       | +                | +                | -               |
| IH-PS-10        | -                     | +                       | +                | -                | +               |
| IH-PS-11        | -                     | +                       | -                | +                | +               |
| IH-PS-12        | -                     | +                       | -                | -                | -               |
| IH-PS-13        | -                     | -                       | +                | +                | +               |
| IH-PS-14        | -                     | -                       | +                | -                | -               |
| IH-PS-15        | -                     | -                       | -                | +                | -               |
| IH-PS-16        | -                     | -                       | -                | -                | +               |

\*E: Enriado en agua, \*M: Desfibrilado mecánico, \*TA: Tratamiento alcalino

“+”: valor Alto y “-” el valor Bajo que tomaran las variables a estudiar (Tabla 8).

**Tabla 9.** Matriz experimental de la Fase Screening

#### 4.2.5. Análisis e interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos se muestran en Anexo 2 y son analizados con la herramienta de Análisis de Varianza (ANOVA). Según este análisis, las variables estadísticamente significativas (Valor-p < 0.05) son: Temperatura, concentración y tiempo del subproceso alcalino, y el tiempo de enriado (ver Tabla 10). La regresión lineal obtiene un adecuado coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  estadístico= 98.74 %), es decir la variación obtenida en el Nivel de Severidad puede ser explicado en casi 99% por las variables consideradas en el diseño, descartando el efecto de variables no controlables (no consideradas en el diseño).

| <b>Factor a estudiar</b> | <b>GL</b> | <b>Aj. SC</b> | <b>Valor F</b> | <b>Valor p</b> |
|--------------------------|-----------|---------------|----------------|----------------|
| A: Temperatura TA        | 1         | 948.040       | 59.860         | 0.000          |
| B: Concentración TA      | 1         | 358.740       | 22.650         | 0.000          |
| C: Tiempo TA             | 1         | 141.570       | 8.940          | 0.009          |
| D: Tiempo E              | 1         | 113.120       | 7.140          | 0.017          |
| E: Tiempo M              | 1         | 30.120        | 1.900          | 0.187          |
| AB + CDE                 | 1         | 1.04          | 0.07           | 0.801          |
| AC + BDE                 | 1         | 9.07          | 0.57           | 0.46           |
| AD + BCE                 | 1         | 5.9           | 0.37           | 0.55           |
| CE + BCD                 | 1         | 1.85          | 0.12           | 0.737          |
| BC + ADE                 | 1         | 3.06          | 0.19           | 0.666          |
| BD + ACE                 | 1         | 37.44         | 2.36           | 0.144          |
| BE + ACD                 | 1         | 1.14          | 0.07           | 0.792          |
| CD + ABE                 | 1         | 13.980        | 0.880          | 0.361          |
| CE + ABD                 | 1         | 28.020        | 1.770          | 0.202          |
| DE + ABC                 | 1         | 0.020         | 0.000          | 0.971          |

Nota:  $R^2 = 99.49\%$ ;  $R^2$  ajustado = 98.74% y GL: Grado de libertad

**Tabla 10.** ANOVA de los datos experimentales - Screening

El diagrama de Pareto, también identificó a estas variables significativas (Temperatura, concentración y tiempo del subproceso alcalino, y el tiempo de enriado) como el 20% de las variables que causan el 80% de los efectos estandarizados, y se observa que el efecto de la temperatura logra destacar en mayor medida respecto a las demás variables (Figura 23). Este comportamiento se debe al principio de la reacción química, ya que a altas temperaturas aumenta la cinética de la reacción del tratamiento alcalino, es decir acelera la solubilización de los componentes no celulósicos, ver Figura 24.

En segundo lugar, del Pareto de los efectos, se obtiene el efecto de la concentración, el cual proporciona la cantidad de moles de NaOH que reaccionará con los componentes no celulósicos solubilizándolos; por ello a concentraciones altas, el Nivel de Severidad del proceso aumenta. Seguido se encuentra el efecto del tiempo del proceso alcalino, ya que depende de la concentración y temperatura como se observa en la Figura 24. Finalmente, en el límite de significancia se obtiene el tiempo de enriado en agua, el cual afloja las fibras internas facilitando el proceso alcalino. Sin embargo, su efecto es menor comparado los parámetros del tratamiento alcalino, implica 24 horas y alto consumo de agua. Por otro lado, este análisis no mostró evidencias de que el efecto de las interacciones entre las variables estudiadas sea significativos para aumentar el NS.

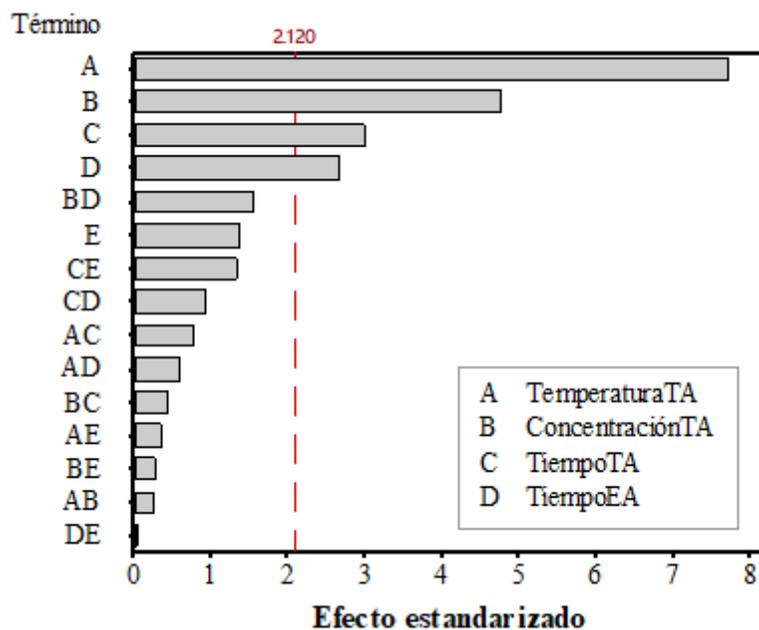
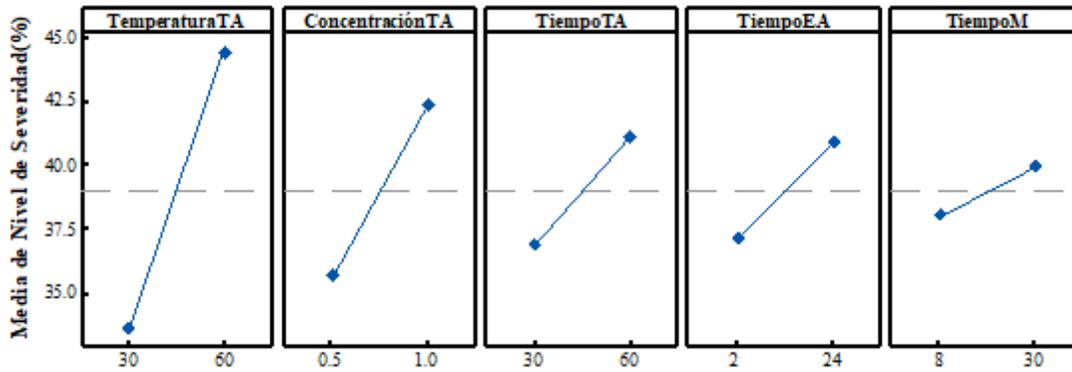
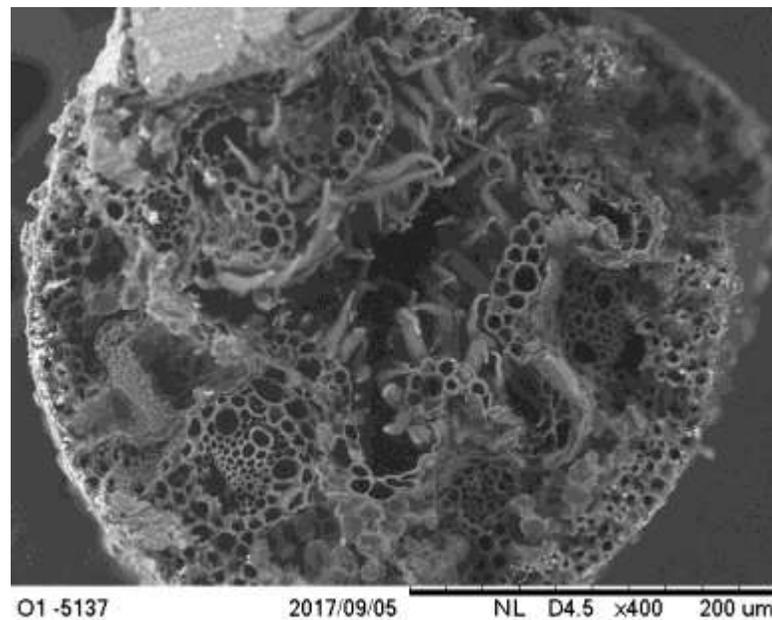


Figura 23. Diagrama Pareto de los efectos estandarizados- Screening



**Figura 24.** Gráfica de los efectos principales - Fase 1: Screening

Asimismo, estos resultados descartan la efectividad del tratamiento de desfibrilado mecánico en el Nivel de Severidad, lo cual contradice los resultados obtenidos en otras FN. No obstante, la materia prima utilizada (*Stipa obtusa*) tiene menor diámetro y más poroso, por lo cual estos procesos no facilitan el tratamiento alcalino, y por ende no afecta al Nivel de severidad, ver Figura 25. Por lo tanto, en base a estos análisis se decide descartar los procesos de enriado en agua y desfibrilado mecánico.



**Figura 25.** Micrografía SEM de las sección transversal de la hoja *Stipa obtusa* (materia prima utilizada)

#### 4.2.6. Conclusiones

Los requerimientos de la materia prima definidos, tales como especies *Stipa obtusa* y parte hojas permitió garantizar la reducción de la variabilidad en los resultados, ya que la variación obtenida en el proceso propuesto fue explicada en un 98% por el Nivel de Severidad. Además, estos requerimientos consideraron la disponibilidad de la materia y la facilidad de desfibrilado (reducción de diámetro), por lo tanto garantizan la viabilidad de la producción a escala industrial.

El diseño factorial fraccionado utilizado en esta fase (Screening) permitió reducir en 50% la cantidad de experimentos a ejecutar, ya que para evaluar el efecto de las cinco variables solo fue necesario ejecutar 32 experimentos y no 64 (diseño factorial completo). Además, el Nivel de Severidad como indicador (variable de respuesta) fue eficiente en términos de costo y tiempo de experimentación ya que permitió evaluar el proceso propuesto a bajo costo y de manera rápida a través de una técnica sencilla (gravimetría).

A partir del análisis de los resultados, se concluye que el desfibrilado mecánico es ineficaz para reducir los componentes no celulósicos (Nivel de Severidad). Debido a las características de la materia prima cuyo diámetro de hojas son más finas en comparación a otras FN, por lo cual no necesita ser desfibrilado. Por lo tanto, se comprobó que la obtención de fibras técnicas de Ichu necesita menor intensidad en el proceso. Por consiguiente, este subproceso es descartado del diseño propuesto.

Asimismo, se verificó que el efecto del tratamiento alcalino (concentración, temperatura y tiempo) es el más significativo para reducir el contenido de componentes no celulósicos de manera significativa. En particular, el efecto de la temperatura del tratamiento alcalino alcanza a explicar en un 60% en la variación del Nivel de severidad. Por lo tanto, el efecto del enriado en agua queda en segundo lugar, por lo cual también es descartado del proceso y así reducir el consumo de agua y aumentar la flexibilidad al proceso.

La evaluación del proceso propuesto permitió ajustar el diseño para eliminar los procesos que no agregan valor a la obtención de esta fibra. Además, se obtuvo un proceso

más flexible (eliminación del tiempo de enriado en agua) y menos costoso (ahorro de energía en el desfibrilado mecánico, y consumo de agua).

Por otro lado, si bien el proceso puede remover más del 50% de sustancias no deseables (componentes no celulósicos), es importante establecer el mínimo Nivel de Severidad del proceso de extracción para que las fibras obtenidas alcancen las especificaciones técnicas correspondientes, y así reducir la pérdida de masa de la MP. A continuación, dicho análisis es realizado.

### **4.3. Fase 2: Optimización considerando aspecto técnico**

En esta fase se implementará la metodología DOE para establecer el indicador del proceso (Nivel de Severidad) en base a las especificaciones técnicas de la fibra en el compuesto polimérico.

#### **4.3.1. Objetivo:**

El objetivo en esta fase es determinar el Nivel de Severidad adecuado para encontrar un balance entre la reducción de la masa de la materia prima y el cumplimiento de las especificaciones técnicas de las fibras (en compuestos) establecidas en la Tabla 6.

#### **4.3.2. Identificación de las variables a estudiar**

En esta unidad experimental se estudiará específicamente el efecto del Nivel de Severidad del proceso, denominado a la capacidad del proceso para reducir los componentes no celulósicos de la fibra.

#### **4.3.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de respuesta**

En base a la literatura revisada, las especificaciones técnicas se definieron a los 4 Índices de Materiales (IM) de rigidez y resistencia a la flexión (dirección, longitudinal y transversal) [89-97]. Estas variables de respuesta se determinan a través de  $E^{1/2}/\rho$  y  $S^{2/3}/\rho$ , respectivamente (donde  $E$  es el módulo de rigidez,  $S$  es la resistencia a la flexión y  $\rho$  es la densidad) [92]. Los componentes de los IM ( $E$ ,  $S$  y  $\rho$ ) son determinados como se describe a continuación.

La resistencia a la flexión o  $S$  (MPa) y el módulo de la rigidez o  $E$  (GPa) son determinados a través del ensayo de flexión en tres puntos (destrutivo), basado en la norma ISO 14125 [100]. Las probetas con dimensiones 8 cm x 1.5 cm x 0.04 cm son compuestos laminados reforzados con fibras obtenidas del proceso (Nivel de Severidad de acuerdo al plan experimental, etapa posterior) y con matriz poliéster no saturada. La técnica utilizada para la fabricación de compuesto es Resina Transferida por vacío (acrónimo en Inglés de Vacuum assisted resin transfer moulding, VARTM). La cantidad de fibras en la muestra son similares y están alineadas, para reducir el efecto de variables que no se desean estudiar.

El equipo para realizar el ensayo a flexión es un Servo-hidráulico MTS Landmark con una celda de carga de 100 kN y sensor de desplazamiento (LCDT). Las condiciones a las que se realizarán las pruebas serán a 21°C y 70% de humedad relativa.

La densidad de las probetas fue determinado usando el Picnómetro Ultrapyc 1200-e. Este picnómetro mide el volumen y densidad de materiales sólidos empleando el principio de Arquímedes y Ley de Boyle [101]. El gas utilizado para los ensayos fue el helio ya que sus pequeñas dimensiones atómicas aseguran la penetración dentro de intersticios y poros de hasta 0,2 nm de diámetro, aproximadamente.

#### 4.3.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento

El experimento es desarrollado para comparar el índice de materiales de tres muestras con diferentes niveles de severidad. Los detalles del experimento y matriz experimental se muestran en la Tabla 11 y 12. Los niveles seleccionados establecidos fueron 43.52, 53.29 y 59.45%, los cuales se obtuvieron con el tratamiento alcalino de 1.5 molar de NaOH a 70°C durante 10, 30 y 60 minutos, respectivamente.

| <b>Tipo de diseño: Diseño para comparar 3 tratamientos</b> |             |              |             |  |
|--|-------------|--------------|-------------|--|
| <u>Detalles del diseño</u>                                 |             |              |             |  |
| Número de factores:  |             |              |             | 1  |
| Número de respuesta (s):                                   |             |              |             | 4  |
| Número de repetición(es):                                  |             |              |             | 5  |
| Número de corridas:  |             |              |             | 15                                       |
| Número de bloques:   |             |              |             | 1  |
| Número de puntos centrales:                                |             |              |             | 0  |
| Resolución:  |             |              |             | V  |
| <u>Factores</u>  | <u>Bajo</u> | <u>Medio</u> | <u>Alto</u> | <u>Unidad</u>                            |
| Nivel de Severidad   | 43.52       | 53.29        | 59.45       | %  |
| <u>Respuestas</u>  |             |              |             |  |
| IM-Resistencia (longitudinal)                              |             |              |             | MPa <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM-Resistencia (transversal)                               |             |              |             | MPa <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM-Rigidez (longitudinal)                                  |             |              |             | GPa <sup>1/2</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM -Rigidez (transversal)                                  |             |              |             | GPa <sup>1/2</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |

**Tabla 11.** Detalles del experimento - Fase 2

| Muestras | Nivel de Severidad (%) |
|----------|------------------------|
| IH-PM-01 | -1                     |
| IH-PM-02 | -1                     |
| IH-PM-03 | -1                     |
| IH-PM-04 | -1                     |
| IH-PM-05 | -1                     |
| IH-PM-06 | 0                      |
| IH-PM-07 | 0                      |
| IH-PM-08 | 0                      |
| IH-PM-09 | 0                      |
| IH-PM-10 | 0                      |
| IH-PM-11 | +1                     |
| IH-PM-12 | +1                     |
| IH-PM-13 | +1                     |
| IH-PM-14 | +1                     |
| IH-PM-15 | +1                     |

**Tabla 12.** Matriz Experimental - Fase 2

#### 4.3.5. Análisis e interpretación

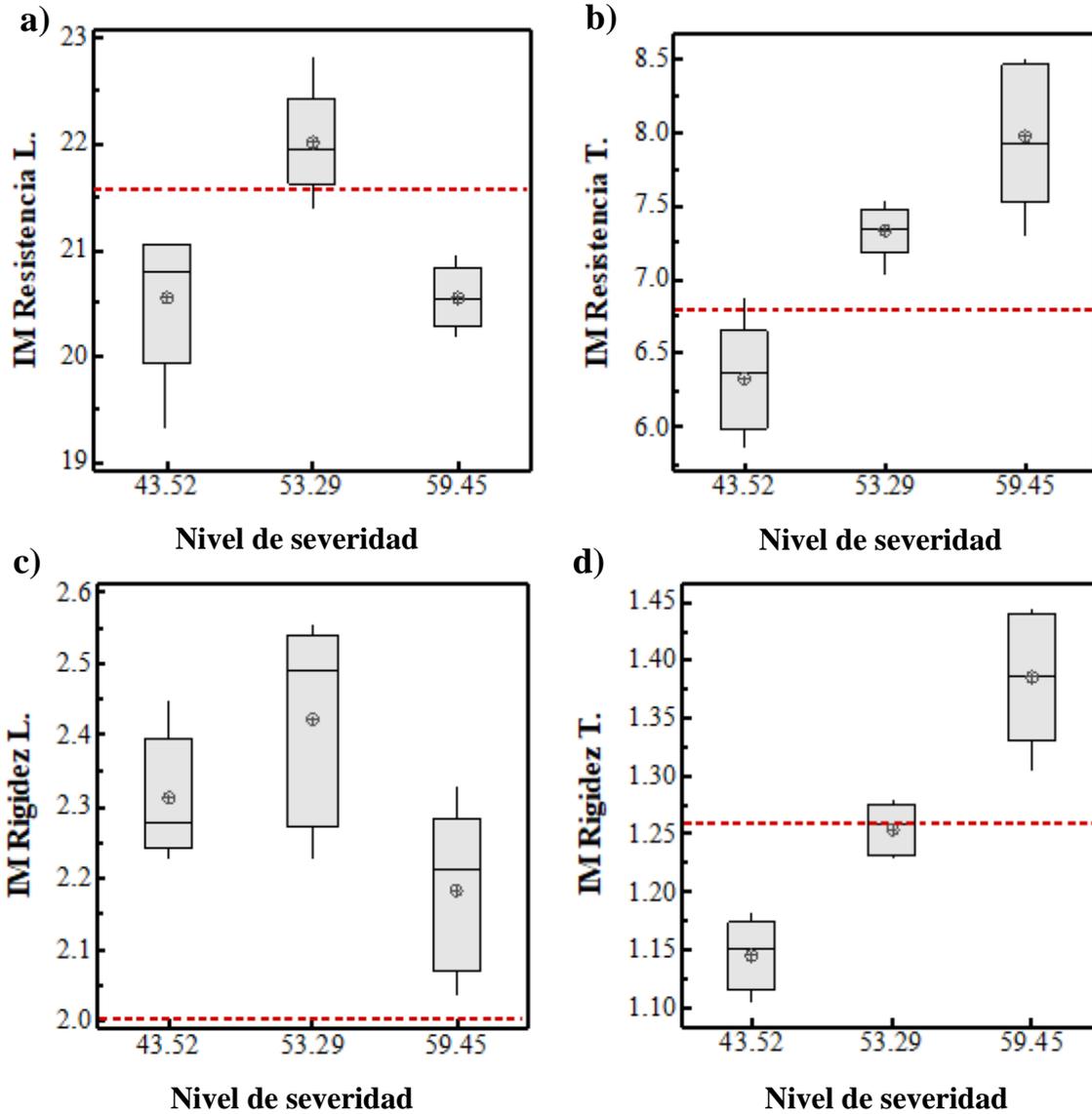
Los resultados de los índices de materiales (Anexo 3) son analizados con la herramienta Análisis de Varianza (ANOVA). Este análisis identifica al Nivel de Severidad como una variable estadísticamente significativa (nivel de confianza de 95%), para dos de las variables de respuesta: IM-Resistencia transversal e IM-Rigidez transversal; y obtiene un ajuste lineal adecuado ( $R^2$  mayor a 80%), ver Tabla 13.

| V. de Respuesta   | SC Ajust. | Valor F | Valor p | R2 (%) |
|-------------------|-----------|---------|---------|--------|
| IM-Resistencia L. | 0.12      | 0.14    | 0.711   | 1.09   |
| IM-Resistencia T. | 6.91      | 52.55   | 0.000   | 80.17  |
| IM-Rigidez L.     | 0.25      | 1.17    | 0.299   | 8.24   |
| IM-Rigidez T.     | 0.14      | 74.30   | 0.000   | 85.11  |

**Tabla 13.** ANOVA y regresión lineal – Fase 2

La interpretación técnica de estos resultados se debe a las propiedades mecánicas de los compuestos poliméricos. Para los IM de resistencia y rigidez mecánica en dirección transversal, la compatibilidad entre la fibra y la matriz juegan un rol importante para transferir las cargas transversales desde la matriz a las fibras. Por ello, los compuestos con fibras procesadas con alto Nivel de Severidad obtienen mejores resultados en términos del IM

transversal, ya que la fibras tienen menor cantidad de sustancias no celulósicas mejorando la compatibilidad con la matriz poliéster (calidad de la fibra), ver Figura 26 b. y d.



**Figura 26.** Diagrama de Cajas de IM Resistencia a) Longitudinal y b) Transversal, e IM Rigidez c) Longitudinal y d) Transversal. Las líneas rojas representan las especificaciones técnicas.

En cambio, los IM que dependen de la resistencia y rigidez longitudinal, las fibras contenidas en el compuesto soportan la carga a lo largo de su longitud, aumentando su resistencia de tal forma que el efecto de su calidad no pueda ser diferenciado. Por lo tanto, el Nivel de Severidad no es significativo para el IM en dirección longitudinal, ver Figura 26 a y c.

Por otro lado, comparando estos resultados con las especificaciones técnicas establecidas, se observa que los compuestos solo logran alcanzar todos los IM en 43.52%. Además, los resultados alcanzados en los **IM Rigidez longitudinal** logran superar en mayor magnitud a las especificaciones técnicas establecidas. Además, se observa que el comportamiento entre el Nivel de severidad y **IM Resistencia longitudinal**, no es lineal. Esto puede deber a que las fibras aumentan su resistencia hasta cierto Nivel de Severidad para luego descender a consecuencia de los daños que empieza a sufrir las fibras por el tratamiento alcalino.

En base al principio de secuencialidad de DOE, se continúa la búsqueda del punto óptimo ampliando el rango del Nivel de Severidad en la siguiente sección.

#### **4.3.6. Afinamiento:**

En esta etapa se utiliza los conocimientos obtenidos en los experimentos anteriores para diseñar eficientemente los próximos experimentos, y así ampliar la búsqueda del punto óptimo. De esta manera se decide evaluar NS a 49.69 y 56.89 %, ya que se acercan al NS óptimo obtenido en la sección anterior (53.29 %). Los detalles de la experimentación se muestran en la Tabla 14.

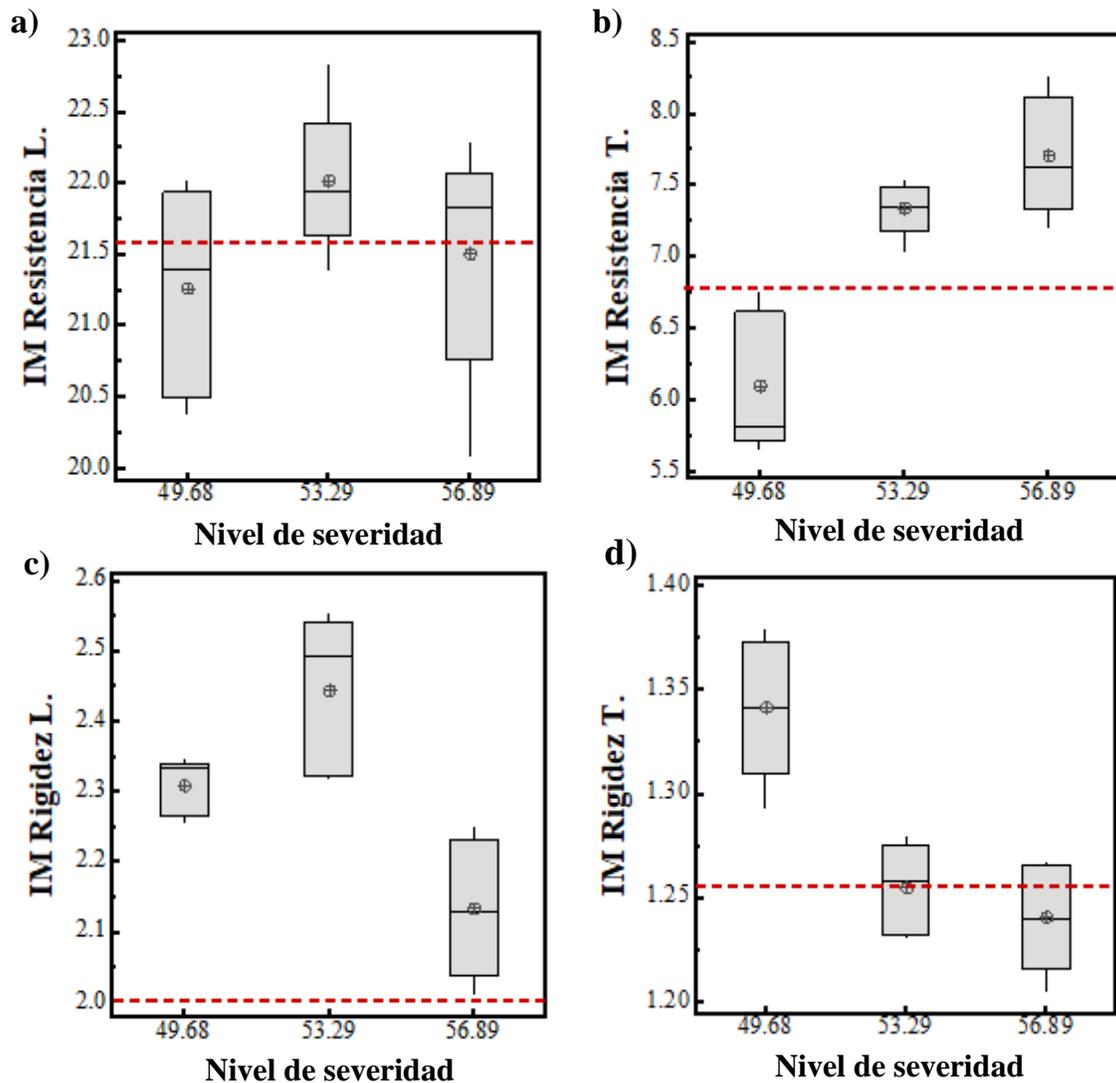
|   |             |              |             |  |
|---|-------------|--------------|-------------|--|
| Tipo de diseño: Diseño para comparar 3 tratamientos |             |              |             |  |
| <u>Detalles del diseño</u>                          |             |              |             |  |
| Número de factores:                                 | 1           |              |             |  |
| Número de respuesta (s):                            | 4           |              |             |  |
| Número de repetición(es):                           | 5           |              |             |  |
| Número de corridas:                                 | 15          |              |             |  |
| Número de bloques:                                  | 1           |              |             |  |
| Número de puntos centrales:                         | 0           |              |             |  |
| Resolución:   | V           |              |             |  |
| <u>Factores</u>                                     | <u>Bajo</u> | <u>Medio</u> | <u>Alto</u> | <u>Unidad</u>                            |
| Nivel de Severidad                                  | 49.68       | 53.29        | 56.89       | %  |
| <u>Respuestas</u>                                   |             |              |             |  |
| IM-Resistencia (longitudinal)                       |             |              |             | MPa <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM-Resistencia (transversal)                        |             |              |             | MPa <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM-Rigidez (longitudinal)                           |             |              |             | GPa <sup>1/2</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| IM -Rigidez (transversal)                           |             |              |             | GPa <sup>1/2</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> ) |

**Tabla 14.** Detalles del experimento – Fase 2.Afinamiento

Los resultados del experimento se muestran en el Anexo 4. El análisis estadístico, indica que el Nivel de Severidad es significativo para los IM en dirección transversal (nivel de confianza igual a 95%); y también se obtiene un coeficiente de determinación alto, ver Tabla 15. Caso contrario, se observa para los otros IM en el cual el Nivel de Severidad no es significativo. Estos resultados son similares a la Fase 2 y se interpretan de la misma manera.

| <b>V. de Respuesta</b> | <b>SC Ajust.</b> | <b>Valor F</b> | <b>Valor p</b> | <b>R2 (%)</b> |
|------------------------|------------------|----------------|----------------|---------------|
| IM-Resistencia L.      | 0.15             | 0.26           | 0.62           | 0.00          |
| IM-Resistencia T.      | 6.44             | 34.27          | 0.00           | 72.5          |
| IM-Rigidez L.          | 0.08             | 3.77           | 0.07           | 22.5          |
| IM-Rigidez T.          | 0.03             | 24.00          | 0.00           | 64.87         |

**Tabla 15.** ANOVA y regresión lineal – Fase 2. Afinamiento



**Figura 27.** Diagrama de Cajas de IM Resistencia a) Longitudinal y b) Transversal, e IM Rigidez c) Longitudinal y d) Transversal. Las líneas rojas representan las especificaciones técnicas.

En la Figura 27, se observa que los compuestos solo logran alcanzar todos las especificaciones en 43.52% de Nivel de severidad. Además, los resultados alcanzados en los **IM Rigidez longitudinal** destacan entre los IM, ya que logra superar las especificaciones técnicas. Además se observa que el comportamiento entre el Nivel de severidad y los IM es lineal, excepto para la **IM Resistencia longitudinal**. Esta relación no lineal, se puede deber a que las fibras aumentan su resistencia hasta cierto Nivel de Severidad para luego descender a consecuencia de los daños que empieza a sufrir las fibras por el tratamiento alcalino. Por lo tanto el punto óptimo del Nivel de severidad sigue siendo 53.29%.

#### 4.3.7. Conclusiones

En esta fase se logró establecer el indicador del proceso en un Nivel de Severidad (pérdida de masa) igual a 53.29 %, para encontrar un balance entre el rendimiento de la materia prima y alcanzar las especificaciones técnicas.

Las especificaciones técnicas definidas como los Índices de Materiales de las fibras en compuesto permitieron evaluar la capacidad de las fibras para soportar cargas importantes (flexión) dentro de su aplicación y la compatibilidad entre la fibra y la matriz (poliéster), factor clave en su funcionamiento. Además, al realizar la medición de los IM unidireccionalmente (longitudinal y transversal) permitió estudiar el efecto del Nivel de severidad adecuadamente con un ajuste mayor a 80% ( $R^2$ , coeficiente de Pearson), así evitar que variables no controlables (alineamiento, volumen de fracción, entre otros) modifiquen el resultado. Por lo tanto, el Índice de materiales fue un adecuado parámetro para evaluar la calidad de las fibras en función a su prefactibilidad técnica.

Los experimentos con el principio de la secuencialidad de DOE, permitieron obtener información eficientemente en relación a la cantidad de experimento. Para ello, los experimentos se dividieron en dos pequeñas subfases, principal y el afinamiento. En la primera subfase se obtuvo una tendencia de la dirección del punto óptimo realizando solo tres corridas diferentes (NS: 43.32 %, 53.29% y 59.45%). Luego, esta tendencia obtenida fue útil para diseñar los siguientes experimentos con Niveles de severidad más cercanos al punto óptimo, y así reducir la cantidad de experimentos.

Por otra parte, la interpretación técnica de los datos obtenida permitió entender el comportamiento de las fibras de Ichu. La mecánica de materiales permitió explicar que el grado de Nivel de Severidad mejora la resistencia a la flexión, ya que al remover los componentes no celulósicos de la superficie de la fibra mejora la compatibilidad con la matriz logrando trasladar adecuadamente la carga. Sin embargo esto se cumple hasta cierto Nivel de Severidad ya que las fibras a partir de 56 % aproximadamente empiezan a sufrir daños severos lo cual reduce su resistencia a la flexión. Basado en ello, se decidió definir el Nivel de Severidad del proceso en  $53.29 \pm 0.5\%$ .

Las fibras naturales obtenidas a este Nivel de Severidad óptimos ( $53.29\% \pm 1$ ) no solo cumplen con las especificaciones establecidas, sino también obtienen resultados con poca variación en comparación a los compuestos reforzados con las fibras de Yute, lo cual resuelve una de las grandes desventajas del uso de las fibras naturales [51]. También, estas fibras son mucho más rígidas ya que obtienen valores superiores a las fibras referenciales en su IM de Rigidez, lo cual añade una ventaja técnica al Ichu.

Por otro lado, en pruebas preliminares se observó que el Nivel de Severidad óptimo (NS=53.28%) puede ser obtenido a altas concentraciones y bajas temperaturas, o a bajas concentraciones y altas temperaturas. Por ello, en el siguiente capítulo, se optimizarán estos parámetros, en términos del costo de producción.

## **CAPITULO IV**

### **EVALUACIÓN DEL COSTO**

En este capítulo, los parámetros del subproceso alcalino son optimizados, en término del costo estimado de producción (Fase 3) a escala industrial.

#### **5.1. Fase 3: Minimizar el costo de producción**

En esta fase se implementará la metodología DOE, con el fin de establecer los parámetros del tratamiento alcalino que minimizan el costo estimado del tratamiento alcalino a escala industrial.

##### **5.1.1. Objetivo:**

El objetivo en esta fase es establecer los parámetros del subproceso de tratamiento alcalino que permitan minimizar su costo de producción (soles/kg de fibras de Ichu producida FI) y al mismo tiempo cumplir con el indicador del proceso óptimo (Nivel de severidad igual a 53.29%).

##### **5.1.2. Identificación de las variables a estudiar**

Las variables a estudiar son solo dos de los tres parámetros del tratamiento alcalino (temperatura, concentración y tiempo), ya que el otro parámetro se ajusta para obtener el Nivel de Severidad óptimo. Indiferentemente, se seleccionó a la concentración y temperatura como las variables a estudiar en esta fase.

##### **5.1.3. Establecimiento del sistema de medición de las variables de Respuesta**

El sistema de medición se basa en el presupuesto de costos de producción (Materia prima MP, mano de obra directa MOD, costos de indirectos de fabricación CIF) que varían de acuerdo a las variables a estudiar del tratamiento alcalina para producir 1 kilogramo de fibras técnicas de ichu. Los costos de MOD incluyen el salario neto del operario y los CIF corresponden a los costos por consumo de energía, depreciación de digestor por lotes e

hidróxido de sodio. No se incluye el costo de materia prima ya que este afecta a otro subproceso (recepción de MP).

Los costos son determinados a partir de una producción igual a 74.7 kilogramos de fibra técnica de Ichu (FI) por hora. Esta cantidad de producción fue determinada a partir del balance entre la demanda de fibras en el sector más amplio (automovilístico) y disponibilidad de MP. Los datos y los cálculos del rendimiento del proceso se muestran en la Tabla 16.

| <b>Presupuestos</b>                     | <b>Unidad</b> | <b>Ctd.</b> | <b>REF</b> |
|---|---------------|-------------|------------|
| Demanda de autos                        | autos/año     | 10000       |            |
| Fibra Naturales en auto                 | kg de FN/auto | 15          | [74]       |
| Demanda de FN al año                    | kg de FN/años | 150000      |            |
| Día hábiles                             | días /año     | 251         |            |
| Demanda diaria de FN                    | kg de FN/día  | 597.61      |            |
| Disponibilidad de MP                    | kg de MP/día  | 1276        | [63]       |
| Rendimiento (100% - Nivel de Severidad) | %             | 46.7        |            |
| Disponibilidad de Ichu Técnico          | kg de FI/día  | 597.60      |            |
| Producción de Ichu                      | kg de FI/hora | 74.7        |            |

**Tabla 16.** Presupuesto de la demanda y disponibilidad de Fibra

Los costos unitarios estimados de los componentes de la producción son mostrados en la Tabla 17. Estas consideraciones serán utilizadas para determinar el costo unitario de producción en función de los parámetros del tratamiento alcalino. Asimismo, se deberán determinar el tiempo del tratamiento alcalino para cierta concentración y tiempo que cumplan con el Nivel de severidad. Óptimo (53.3%), a través de pruebas preliminares.

| Presupuestos                           |                               | Unidad        | Valor    | REF   |
|--|-------------------------------|---------------|----------|-------|
| CMO                                    | Costo de Operario             | S./hora       | 15.00    |       |
| Costo de Energía                       | Rendimiento energético        | %/hora        | 0.20     |       |
|  | Costo de energía              | S./kW-hora    | 0.26     |       |
|  | Tasa de cambio de USD a soles | S/. a USD     | 3.28     |       |
|  | Costo de energía              | \$/kW-hora    | 0.08     | [102] |
| C-NaOH                                 | Costo de NaOH (kg con IGV)    | S./kg de NaOH | 1        | [103] |
| Costo de depreciación de equipos (DDP) | Años de depreciación          | año           | 10       | -     |
|  | Horas hábiles al año          | Horas/año     | 20080.00 | -     |
|  | Maquinaria (marmita)          | S./m3         | 30000.00 | [104] |

DDP: Costos puesto en planta

**Tabla 17.** Consideraciones para el presupuesto del costo del subproceso de extracción

#### 5.1.4. Diseño de las matrices y los detalles del experimento

En esta etapa se definió determinar los costos unitarios del subproceso de extracción a diferentes concentraciones y temperaturas, en base al Diseño de Superficie de Respuesta. En base a este diseño, se decide seleccionar los niveles máximos de concentraciones y temperaturas a 1 molar y 50°C, respectivamente. Los detalles del experimento y matriz experimental se muestran en la Tabla 18 y 19, respectivamente.

| Tipo de diseño: Diseño Superficie de respuesta – D. Puntos centrales (cubo) |             |             |               |
|---|-------------|-------------|---------------|
| <u>Detalles del diseño</u>  |             |             |               |
| Número de factores:   | 2           |             |               |
| Número de respuesta (s):  | 1           |             |               |
| Número de repetición(es):   | 2           |             |               |
| Número de corridas:   | 28          |             |               |
| Número de bloques:  | 2           |             |               |
| Número de puntos centrales:   | 6           |             |               |
| <u>Factores</u>   | <u>Bajo</u> | <u>Alto</u> | <u>Unidad</u> |
| Temperatura   | 30          | 50          | °C            |
| Concentración   | 0.5         | 1.0         | Mol           |
| <u>Respuestas</u>   |             |             |               |
| CU-Extracción   |             |             | Soles/kg      |

**Tabla 18.** Detalles del experimento-Fase 3

| Muestras       | Concentración (mol) | Temperatura (°C) |
|----------------|---------------------|------------------|
| PTQ-0.5m30     | 0.50                | 30.00            |
| PTQ-1m30       | 1.00                | 30.00            |
| PTQ-0.5m50     | 0.50                | 50.00            |
| PTQ-1m50       | 1.00                | 50.00            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |
| PTQ-0.39m40    | 0.40                | 40.00            |
| PTQ-1.10m40    | 1.10                | 40.00            |
| PTQ-0.75m25.88 | 0.75                | 25.86            |
| PTQ-0.75m54.14 | 0.75                | 54.14            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |
| PTQ-0.75m40    | 0.75                | 40.00            |

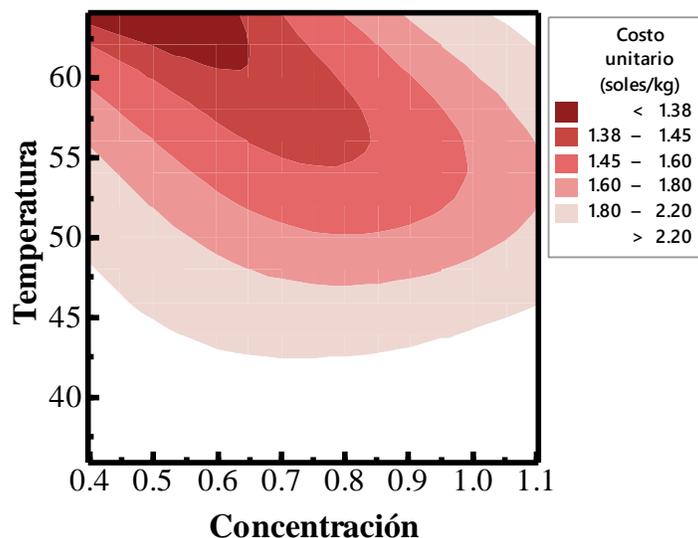
**Tabla 19.** Matriz experimental – Fase 3

### 5.1.5. Análisis e interpretación

Los resultados del costo unitario se muestran en Anexo 5. En esta etapa no se realizará el Análisis de Varianza (ANOVA), ya que en los cálculos realizados no se consideró la variabilidad de las estimaciones del costo unitario de producción.

La gráfica de contornos (Figura 28) es usada para ubicar el punto óptimo y observar la relación entre las variables a estudiar y el costo de producción. Según ello, se observa que a baja temperatura (menor a 50°C) el costo es alto, ya que para alcanzar la especificación técnica del proceso (NS=53.29%), el tiempo de tratamiento es mayor (>10 horas) lo cual incrementa el costo de energía y costo de maquinarias y MOD (alto volumen a procesar).

Por otro lado, a alta temperatura se observa el punto óptimo (costo mínimo), donde la concentración ejerce un balance entre el costo de NaOH y los otros costos (MOD, depreciación y energía), ya que a altas concentraciones (mayor a 0.8 molar), el costo de NaOH aumenta en gran magnitud, y al disminuir la concentración el costo de NaOH se reduce pero al mismo tiempo se va incrementando los otros costos. Por lo tanto, este balance obtiene el costo mínimo a una concentración y temperatura, igual a 0.4 y 65 °C, respectivamente.



**Figura 28.** Gráfica de contornos – Fase 3 [Elaboración propia]

### 5.1.6. Conclusiones

En esta fase, el método de Diseño de Superficie de Respuesta y la gráfica de contornos utilizados permitieron determinar que los parámetros del tratamiento alcalino a una concentración de 0.4 molar a 65 °C por 3.5 horas, alcanzan el mínimo costo estimado del tratamiento alcalino (a nivel industrial) a  $1.36 \pm 0.3$  soles por kilogramo de fibra producida.

En esta etapa, utilizar el Nivel de Severidad óptimo para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas al optimizar los costos de producción, permitió reducir el costo y tiempo de experimentación. Debido a que, si se hubiese realizado directamente en función de los Índices de Materiales, los costos de experimentación que implican la realización de pruebas en flexión serían más altos. Por lo tanto, utilizar al Nivel de Severidad óptimo fue eficiente en término de costo de experimentación. Sin embargo, la obtención de los resultados no fue tan simple, ya que antes de estimar los costos de producción de las matrices experimentales se necesitó determinar los tiempos del tratamiento alcalino para cada concentración y temperatura que alcancen el Nivel de Severidad óptimo, a través de una serie de pruebas.

En el análisis del costo de producción se observó que el costo de hidróxido de sodio es alto, por lo que la reducción de este fue clave para la minimización del costo del tratamiento alcalino.

En esta fase solo se logró estimar el costo del tratamiento alcalino, por ello, en la siguiente sección, se realizará una estimación del costo de producción a nivel industrial de todo el proceso de extracción, para evaluar la competitividad económica de la fibra del Ichu con otras fibras naturales del mercado.

## **5.2. Fase 4: Evaluación Integral de proceso de producción**

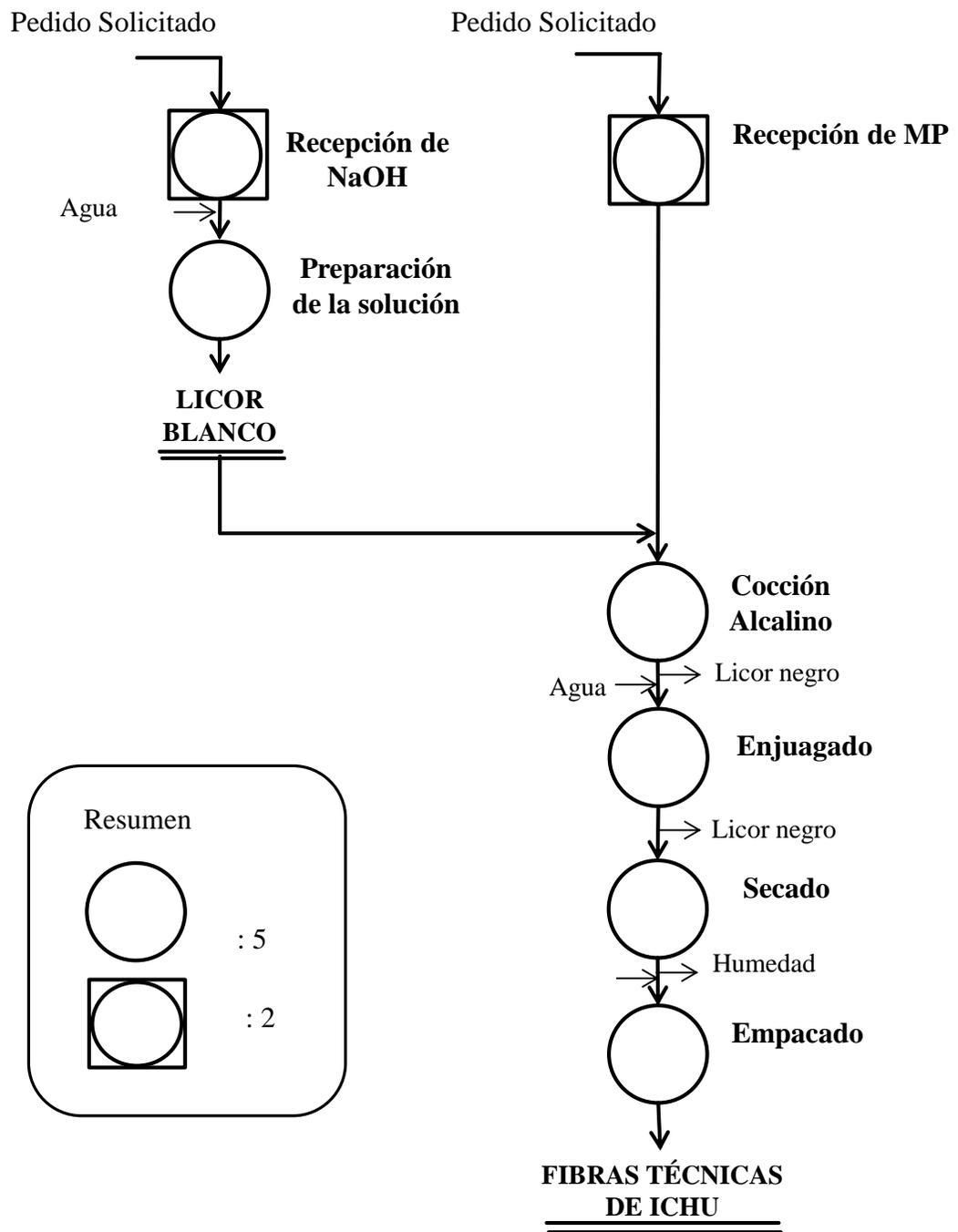
En esta fase se estima el costo de la producción de Ichu en base a los tres elementos de la producción: materia prima (MP), mano de obra directa (MOD) y costos de indirectos de fabricación (CIF), para el proceso diseñado (ver Figura 29). Para ello, se realizará un estudio técnico en el cual se estima la producción diaria, localización de la planta y balance de línea.

### **5.2.1. Estimación de la producción diaria**

En la Fase 3, la producción diaria fue estimada, en 700 kg (8 horas). Para esta fase, se decide realizar una producción múltiplo de 50 kg (tamaño de empaque) obteniendo una estimación de 600 kg de Fibra procesada al día (8 horas)

### **5.2.2. Estudio de localización de la Planta**

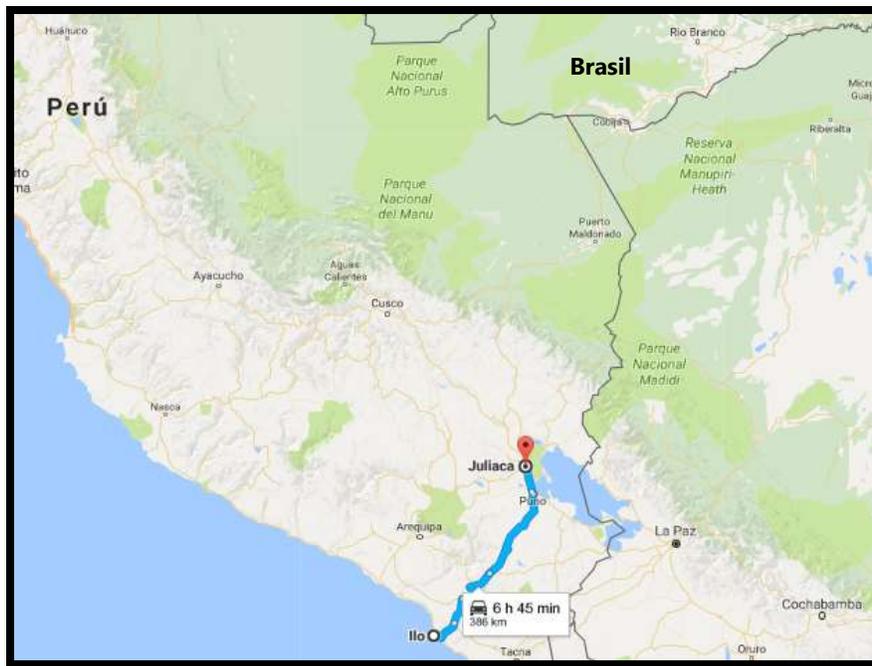
En base a los siguientes criterios cercanía de la materia prima, disponibilidad de servicios e insumos (agua, energía y otros suministros), costos de terreno y cercanía al cliente; se decide localizar la planta en el departamento de Puno (cerca de Juliaca). En la Tabla 20 se muestra la descripción del lugar seleccionado según los criterios seleccionados.



**Figura 29.** Diagrama de operaciones para el proceso de producción de fibras técnicas de Ichu

| Criterios  | Evaluación de Puno como localización de la planta  |
|--|--|
| <b>Cercanía a la Materia prima</b>                         | Puno y su límite con Cusco, representan los lugares con mayor disponibilidad de materia prima, Ichu [63].  |
| <b>Disponibilidad de agua, terreno y otros suministros</b> | Juliaca (provincia de Puno) cuenta con un Parque industrial, por lo cual dispone de servicios básicos y suministros (construcción y maquinaria).                               |
| <b>Cercanía del mercado</b>                                | La ubicación, se encuentra a menos de 7 horas del puerto de Ilo, puerto principal para exportación. También, cerca de Brasil (mercado potencial en Sudamérica), ver Figura 30. |
| <b>Costos de terreno</b>                                   | Los costos de terreno son relativamente bajos ya que aún cuenta con zonas no urbanizadas (Figura 30).  |

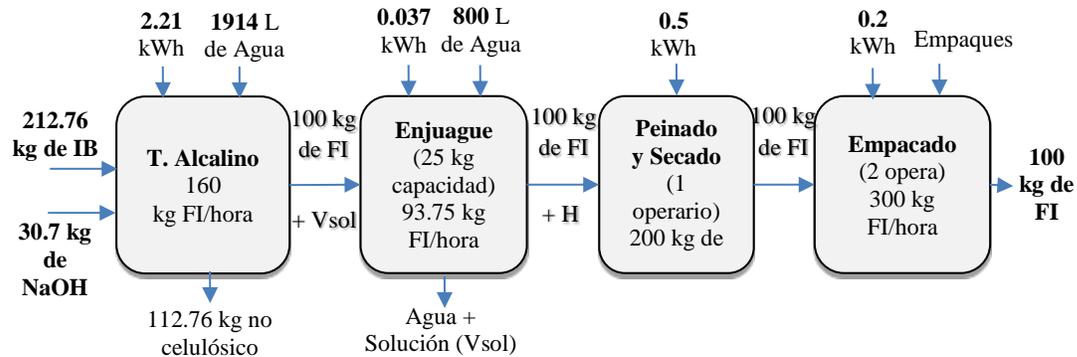
**Tabla 20.** Evaluación de la localización de la Planta



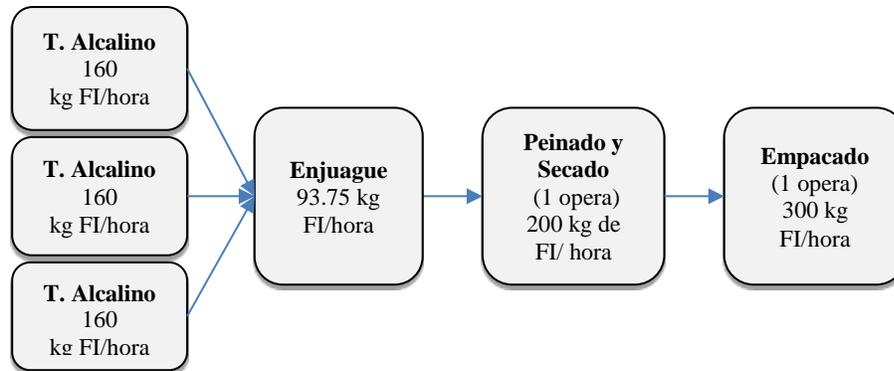
**Figura 30.** Mapa de la ubicación de la planta [GoogleMaps]

### 5.2.3. Balance de Línea

El balance de líneas fue realizado usando el diagrama de bloque, con el fin de identificar las entradas, salidas y los rendimientos de los subprocesos diseñados (Figura 31). A partir de este diagrama se realiza el balance de línea, en el cual se crean dos estaciones de trabajo más para el subproceso de enjuague, ver Figura 32.



**Figura 31.** Diagrama de bloques del proceso de extracción de Ichu [Elaboración propia]



**Figura 32.** Balance de la línea de producción [Elaboración propia]

Luego de realizar el balance, se determina los costos de cada elemento de la producción, como se muestran en las siguientes secciones.

#### 5.2.4. Costo de producción

En base al balance de línea, se determina los costos de cada elemento de la producción.

##### 5.2.4.1. Materia Prima (MP)

Actualmente, la materia prima que utilizaremos no tiene un precio en el mercado; sin embargo se estima a través del costo incurridos si se contratará a un personal (6 soles/hora) con capacidad (8 kg de FI/hora), el costo de transporte (0.1 soles/kg FI) y contrato con la comunidad (0.2 soles/kg FI). En base a ello, se determina que el costo de la MP es igual a **1.05 soles para producir 1 kg de fibra procesada.**

##### 5.2.4.2. Personal a utilizar (MOD) y sus costos:

Según las estaciones creadas en el balance de línea, serán necesario siete personas que realicen las funciones de operario de equipos, ver Tabla 21. En base a ello, el costo de MOD es **0.454 soles por kg de FI.**

| Subproceso  | Cantidad de Personal | Sueldo por c/u (soles/mes) | Sueldo anual por c/u | ESSALUD (9%, en soles) | CTS (soles) | Gratificación (soles) | Total anual por c/u (soles) | Total anual (soles/año) |
|-------------|----------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| T. Alcalino | 1                    | 1200                       | 14400                | 1296                   | 1200        | 2400                  | 19296                       | 19296                   |
| Enjuague    | 1                    | 1200                       | 14400                | 1296                   | 1200        | 2400                  | 19296                       | 19296                   |
| Peinado     | 1                    | 1200                       | 14400                | 1296                   | 1200        | 2400                  | 19296                       | 19296                   |
| Empacado    | 1                    | 1200                       | 14400                | 1296                   | 1200        | 2400                  | 19296                       | 19296                   |
| Total       | 4                    |                            |                      |                        |             |                       |                             | 77184                   |

**Tabla 21.** Cuadro del costo Total de MOD

##### 5.2.4.3. Costos Indirectos de Fabricación y sus costos

Los CIF a considerar son los costos de Mano de obra indirecta, servicios básicos (agua), insumos, depreciación de maquinaria, electricidad, mantenimiento e infraestructura.

Mano de Obra Indirecta (MOI) y sus costos:

La planta de producción al ser pequeña, contratará como poco personal en la administración (Tabla 22), obteniendo un costo de MOI igual a **1.0139 soles por kg de FI** (producción 170000 FI al año).

| Puesto                       | Ctd.     | Sueldo mensual por c/u (soles) | Sueldo anual por c/u (soles) | ESSALUD (9%, en soles) | CTS (soles) | Gratificación (soles) | Total anual por c/u (soles) | Total anual (soles) |
|------------------------------|----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|
| Administrador Comercial      | 1        | 3500                           | 42000                        | 3780                   | 3500        | 7000                  | 56280                       | 56280               |
| Ingeniero Químico Industrial | 1        | 3500                           | 42000                        | 3780                   | 3500        | 7000                  | 56280                       | 56280               |
| Personal de seguridad        | 3        | 930                            | 11160                        | 1004.4                 | 930         | 1860                  | 14954.4                     | 44863.2             |
| Limpieza                     | 1        | 930                            | 11160                        | 1004.4                 | 930         | 1860                  | 14954.4                     | 14954.4             |
| <b>Total</b>                 | <b>5</b> |                                |                              |                        |             |                       |                             | <b>172377.6</b>     |

**Tabla 22.** Cuadro del costo Total de MOI

Maquinaria, energía eléctrica y mantenimiento correctivo y sus costos:

La maquinaria y la cantidad en la producción se establecen en base al balance de línea. Para este análisis se considera que la vida útil de los equipos y/o maquinarias es de 10 años, excepto el del sistema de calefacción que tiene 15 años; y su valor residual es de 10 % de su valor inicial, como se muestra en la Tabla 23.

| Maquina           | Ctd. | Precio unitario DDP (soles) | Costo Total (soles) | Depreciación (soles/kg FI)* | E. eléctrica (soles/ kg de IF)** | Mtto. Correctivo (soles/ kg de IF)*** | REF   |
|-------------------|------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------|
| Balanza           | 2    | 300.00                      | 600.00              | < 0.000                     | < 0.000                          | < 0.000                               |       |
| Reactor           | 1    | 20000.00                    | 9000.00             | 0.005                       | 0.020                            | 0.000                                 | [104] |
| Digestor          | 1    | 80000.00                    | 60000.00            | 0.032                       | 0.050                            | 0.003                                 | [104] |
| Centrifuga        | 2    | 4000.00                     | 8000.00             | 0.004                       | 0.050                            | 0.000                                 | [105] |
| Peinado           | 1    | 65400.00                    | 65400.00            | 0.035                       | 0.037                            | 0.003                                 | [106] |
| S. de calefacción | 1    | 40000.00                    | 40000.00            | 0.014                       | 0.005                            | 0.001                                 | [107] |
| Empacado          | 1    | 9000.00                     | 9000.00             | 0.005                       | 0.005                            | 0.000                                 | [108] |
| <b>TOTAL</b>      |      |                             |                     | <b>0.095</b>                | <b>0.1671</b>                    | <b>0.009</b>                          |       |

\*Vida útil es 10 años, excepto para el s. Calefacción que es 15 años y residual 10%

\*\*0.256 soles /kW-hora [102] \*\*\*10% de depreciación

**Tabla 23.** Cuadro de Costo de Maquinaria, energía eléctrica y Mtto. Correctivo

### Servicios Básicos y sus costos:

El consumo de agua y servicio de alcantarillado es utilizado en los subprocesos de tratamiento alcalino y enjuague, y son estimadas en la Tabla 24.

| Suboperaciones                                      | Volumen de agua (L/kg de FI procesada) | REF   |
|---|--|-------|
| T. Alcalino   | 9                                      | -     |
| Enjuagado   | 8                                      | -     |
| Total (L)   | 17                                     | -     |
| - Costo de agua y alcantarillado (soles/L)          | 0.003                                  | [109] |
| <b>Costo de agua y alcantarillado (soles/kg FI)</b> | <b>0.051</b>                           |       |

**Tabla 24.** Cuadro de consumo de agua

### Insumos y sus costos

Los principales insumos requeridos en el proceso son el hidróxido de sodio y lo referente al embalaje (plástico y sogas), cuyos costos son estimados en la Tabla 25.

| Insumos                               | Costos       | REF   |
|---------------------------------------|--------------|-------|
| Cantidad de NaOH por kg de FI         | 0.307        | -     |
| - Costo de NaOH por kg                | 1            | [103] |
| Costo de NaOH (soles/kg de FI)        | 0.307        | -     |
| Costo de embalaje (soles/kg de FI)    | 0.005        | -     |
| <b>Costo de Insumos (soles/kg FI)</b> | <b>0.312</b> | -     |

**Tabla 25.** Cuadro de requerimiento de Insumos

### Infraestructura y sus costos

La infraestructura es realizada en base al Layout (Anexo 6), en el cual se estima que la producción de fibras de Ichu requiere un terreno de 1500 m<sup>2</sup>, como se muestra en la Tabla 26.

| Infraestructura                                       | Unidad                | Costos        |
|---|-----------------------|---------------|
| Terreno   | m <sup>2</sup>        | 1500          |
| - Precio [110]  | soles/m <sup>2</sup>  | 50            |
| Costo de terreno Total                                | soles                 | 75000         |
| C. de deprec. por terreno (C <sub>T</sub> )           | soles/kg de FI        | 0.0441        |
| C. de deprec. por construcción (1.5* C <sub>T</sub> ) | soles/kg de FI        | 0.0662        |
| <b>Costo Total por Infraestructura (deprec.)</b>      | <b>soles/kg de FI</b> | <b>0.1103</b> |

**Tabla 26.** Cuadro de Costo de infraestructura

En la siguiente Tabla 27, se resumen todos los costos de los elementos de la producción, determinando que el costo de producción es  $3.6 \pm 0.5$  soles. Además, muestra que los costos indirectos de fabricación (sueldos del staff administrativo) y el costo de la Materia prima representa casi el 60 % del costo total.

| <b>Elementos de la producción</b>           | <b>Costos</b> | <b>Representa del Total</b> |
|---|---------------|-----------------------------|
| MP  | 1.051         | 32%                         |
| MOD   | 0.452         | 14%                         |
| MOI   | 1.014         | 31%                         |
| Agua  | 0.051         | 2%                          |
| Insumos                                     | 0.312         | 10%                         |
| Maquinaria                                  | 0.095         | 3%                          |
| Energía eléctrica                           | 0.167         | 5%                          |
| Mtto. correctivo                            | 0.009         | 0%                          |
| Infraestructura                             | 0.110         | 3%                          |
| <b>COSTO TOTAL DE PRODUCCION (soles/FI)</b> | <b>3.262</b>  |                             |

**Tabla 27.** Resumen de los costos de los elementos de la producción

## CAPITULO V

### EVALUACIÓN FINANCIERA

En este capítulo se determina las inversiones, presupuesto y estados financieros proyectados para la producción y comercialización de fibras técnicas a partir del Ichu. Además, se realiza la evaluación económica y financiera de la factibilidad del proyecto, la cual se complementa con un análisis de sensibilidad que considera cambios en las variables de mayor impacto para el proyecto.

#### 6.1. Estudio económico

##### 6.1.1. Determinación de los ingresos

La fuente de ingreso del presente proyecto para los 10 años (desde el 2018 al 2028), será la venta de fibra técnica de Ichu para su aplicación en el mercado automovilístico (10 kg de fibra por automóvil), ver la Tabla 28. Se estima el precio de venta de la Fibra de Ichu igual a 4.5 USD por kilogramo, basado en el precio de la fibra de lino/sisal (FOB) [60]. Además se considera un incremento de la demanda de 3.13% al año, en los primero cinco años (basado en el crecimiento del mercado automovilístico, 5%) [111].

| Año  | Venta (kg) | Precio unitario (USD/kg) | Venta (USD) |
|------|------------|--------------------------|-------------|
| 2019 | 170,000.0  | 1.7                      | 289,000.0   |
| 2020 | 170,000.0  | 1.7                      | 289,000.0   |
| 2021 | 170,000.0  | 1.7                      | 289,000.0   |
| 2022 | 170,000.0  | 1.7                      | 289,000.0   |
| 2023 | 170,000.0  | 1.7                      | 289,000.0   |
| 2024 | 175,000.0  | 1.7                      | 297,500.0   |
| 2025 | 175,000.0  | 1.7                      | 297,500.0   |
| 2026 | 175,000.0  | 1.7                      | 297,500.0   |
| 2027 | 175,000.0  | 1.7                      | 297,500.0   |
| 2028 | 175,000.0  | 1.7                      | 297,500.0   |

**Tabla 28.** Venta totales anuales

### 6.1.2. Estimación de los egresos

Los principales costos son los referidos a la materia prima, insumos, energía eléctrica y otros que corresponden a los costos variables, y se muestran en la Tabla 27. Por el lado del costo fijo se tiene el costo por mano de obra (personal) y los gastos administrativos correspondientes a energía eléctrica, agua, servicio telefónico, economato, material de limpieza y otros. Se estima que estos gastos administrativos representan el 5% del costo variable para los dos primeros años y posteriormente se representará el 1%, ya que los primeros años se realizarán gastos en viaje para negociación con clientes y proveedores, y gastos de honorarios de asesoramiento legal de la empresa, como parte del inicio. Los gastos indirectos de fabricación que corresponden al tratamiento de agua, mantenimiento de equipos y otros costos, son estimados en 5% del costo total en el primer año y luego 2%, para los años posteriores.

### 6.1.3. Determinación de la inversión

De la información obtenida en la Fase 4, se resume las inversiones presupuestadas en la Tabla 29. En esta tabla se considera un terreno de 1,500 m<sup>2</sup> a un costo de US\$ 50 por m<sup>2</sup> [110]. Asimismo se considera la depreciación de los equipos de producción y equipos de oficina, muebles a adquirir para un tiempo de vida útil de 10 años y un residual de 10%. Este último valor (residual) será uno de los ingresos en el flujo de caja, denominado liquidación de activos. Además, se considera la inversión relacionada a la instalación y montaje de la infraestructura y equipos, tales como costo de la labor de montaje, e ingeniería y supervisión de este proceso.

| Tipo de Inversión                        | Costo Total (en US\$) | Depreciación anual (USD) | Residual (10%, USD) |
|--|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| Terreno [110]                            | 75,000                | 6,750                    | 7,500               |
| Labor de montaje y materiales            | 45,000                | 4,500                    |                     |
| Ingeniería y supervisión para el montaje | 15,000                | 1,500                    |                     |
| Equipos de producción                    | 61,440                | 5,530                    | 6,144               |
| Equipos de Oficina/mueble                | 3,160                 | 284                      | 316                 |
| <b>TOTAL</b>                             | <b>199,600</b>        | <b>12,564</b>            | <b>13,960</b>       |

Tabla 29. Inversión presupuestada

#### 6.1.4. Estructura financiera

La estructura de financiación estará compuesta por un porcentaje de la inversión total de US\$ 199,600.1 considerando cuotas iguales durante los 10 años. El siguiente cuadro muestra el aporte propio y la deuda:

| Tipo de aporte | Porcentaje | Monto     |
|----------------|------------|-----------|
| Aporte propio  | 30%        | 59,880.0  |
| Deuda          | 70%        | 139,720.0 |
| Total          | 100%       | 199,600.0 |

**Tabla 30.** Aporte propio y deuda

Para la determinación de la tasa de interés, se muestra a continuación la tasa activa de las principales entidades financieras (Tabla 31).

| Banco            | TEA |
|------------------|-----|
| Scotiabank       | 17% |
| Interbank        | 30% |
| BCP              | 25% |
| BBVA Continental | 32% |
| Banbif           | 40% |

**Tabla 31.** Tasa Efectiva anual (TEA) de Bancos en el Perú [112]

Se decide optar por el Banco Scotiabank para financiar el monto de 139,720 USD, que como ya se mencionó, representa el 70% de la inversión. En la Tabla 32 se muestra el detalle de los pagos a realizar.

| Período | Saldo Inicial | Intereses | Amortización | Cuota  | Saldo Final |
|---------|---------------|-----------|--------------|--------|-------------|
| 1       | 139,720       | 23,752    | 6,239        | 29,992 | 133,481     |
| 2       | 133,481       | 22,692    | 7,300        | 29,992 | 126,180     |
| 3       | 126,180       | 21,451    | 8,541        | 29,992 | 117,639     |
| 4       | 117,639       | 19,999    | 9,993        | 29,992 | 107,646     |
| 5       | 107,646       | 18,300    | 11,692       | 29,992 | 95,954      |
| 6       | 95,954        | 16,312    | 13,680       | 29,992 | 82,275      |
| 7       | 82,275        | 13,987    | 16,005       | 29,992 | 66,269      |
| 8       | 66,269        | 11,266    | 18,726       | 29,992 | 47,543      |
| 9       | 47,543        | 8,082     | 21,909       | 29,992 | 25,634      |
| 10      | 25,634        | 4,358     | 25,634       | 29,992 | 0           |

**Tabla 32.** Calendario de pago anual

### 6.1.5. Capital de Trabajo

En esta sección, también se determina el capital de trabajo mediante el método del déficit acumulado. Para ello, se necesita primero definir la política de crédito de las ventas, la cual será a 60 días calendario (ó 2 meses). Asimismo, se considerará las ventas del primer año del proyecto (dividido en meses), el costo variable, costo fijo y los gastos indirectos de fabricación. El capital de trabajo será aquel donde el acumulado del saldo sea el de mayor déficit, para este caso se obtiene 23,784 USD (Tabla 33). Este valor será presentado en el flujo de caja en el periodo de apertura, como un flujo negativo.

| Mes | Ingresos | Costos Directos | Gastos indirectos de Fabricación | Intereses | Amortización | Saldo   | Acumulado      |
|-----|----------|-----------------|----------------------------------|-----------|--------------|---------|----------------|
| 1   | 0        | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | -11,892 | -11,892        |
| 2   | 0        | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | -11,892 | <b>-23,784</b> |
| 3   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | -6,776         |
| 4   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 10,231         |
| 5   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 27,239         |
| 6   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 44,247         |
| 7   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 61,255         |
| 8   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 78,263         |
| 9   | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 95,271         |
| 10  | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 112,278        |
| 11  | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 129,286        |
| 12  | 28,900   | 13,706          | 685                              | 1,979     | 520          | 17,008  | 146,294        |

**Tabla 33.** Determinación de Capital de trabajo

### 6.1.6. Flujo de caja económico

El siguiente flujo de caja económico fue elaborado a partir de los ingresos, egresos presentados anteriormente, inversiones y el impuesto a la renta de 30%. La Tabla 34 muestra para los años del proyecto un flujo positivo, cuyos resultados son favorable para el proyecto.

| Recursos                                | Año 0             | Año 1            | Año 2            | Año 3            | Año 4            | Año 5            | Año 6            | Año 7            | Año 8            | Año 9            | Año 10           |
|---|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>INGRESOS</b>                         |                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Precio (USD por kg)                     |                   | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              | 1.7              |
| Demanda (kg)                            |                   | 170,000.0        | 170,000.0        | 170,000.0        | 170,000.0        | 170,000.0        | 175,000.0        | 175,000.0        | 175,000.0        | 175,000.0        | 175,000.0        |
| <b>Venta Total</b>                      |                   | <b>289,000.0</b> | <b>289,000.0</b> | <b>289,000.0</b> | <b>289,000.0</b> | <b>289,000.0</b> | <b>297,500.0</b> | <b>297,500.0</b> | <b>297,500.0</b> | <b>297,500.0</b> | <b>297,500.0</b> |
| <b>EGRESOS</b>                          |                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Ichu                                    |                   | 53,550.0         | 53,550.0         | 53,550.0         | 53,550.0         | 53,550.0         | 55,125.0         | 55,125.0         | 55,125.0         | 55,125.0         | 55,125.0         |
| NaOH                                    |                   | 15,657.0         | 15,657.0         | 15,657.0         | 15,657.0         | 15,657.0         | 16,117.5         | 16,117.5         | 16,117.5         | 16,117.5         | 16,117.5         |
| Insumos                                 |                   | 255.0            | 255.0            | 255.0            | 255.0            | 255.0            | 262.5            | 262.5            | 262.5            | 262.5            | 262.5            |
| Electricidad                            |                   | 8,522.1          | 8,522.1          | 8,522.1          | 8,522.1          | 8,522.1          | 8,772.8          | 8,772.8          | 8,772.8          | 8,772.8          | 8,772.8          |
| Agua                                    |                   | 2,601.0          | 2,601.0          | 2,601.0          | 2,601.0          | 2,601.0          | 2,677.5          | 2,677.5          | 2,677.5          | 2,677.5          | 2,677.5          |
| <b>COSTO TOTAL VARIABLE</b>             |                   | <b>80,585.1</b>  | <b>80,585.1</b>  | <b>80,585.1</b>  | <b>80,585.1</b>  | <b>80,585.1</b>  | <b>82,955.3</b>  | <b>82,955.3</b>  | <b>82,955.3</b>  | <b>82,955.3</b>  | <b>82,955.3</b>  |
| Personal                                |                   | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         | 79,859.7         |
| Gastos administrativos                  |                   | 4,029.3          | 4,029.3          | 805.9            | 805.9            | 805.9            | 829.6            | 829.6            | 829.6            | 829.6            | 829.6            |
| <b>COSTO TOTAL FIJO</b>                 |                   | <b>83,889.0</b>  | <b>83,889.0</b>  | <b>80,665.6</b>  | <b>80,665.6</b>  | <b>80,665.6</b>  | <b>80,689.3</b>  | <b>80,689.3</b>  | <b>80,689.3</b>  | <b>80,689.3</b>  | <b>80,689.3</b>  |
| <b>COSTO TOTAL DIRECTO</b>              |                   | <b>164,474.1</b> | <b>164,474.1</b> | <b>161,250.7</b> | <b>161,250.7</b> | <b>161,250.7</b> | <b>163,644.5</b> | <b>163,644.5</b> | <b>163,644.5</b> | <b>163,644.5</b> | <b>163,644.5</b> |
| <b>GASTOS INDIRECT. DE</b>              |                   | <b>8,223.7</b>   | <b>3,289.5</b>   |
| <b>COSTO TOTAL</b>                      |                   | <b>172,697.8</b> | <b>167,763.5</b> | <b>164,540.1</b> | <b>164,540.1</b> | <b>164,540.1</b> | <b>166,934.0</b> | <b>166,934.0</b> | <b>166,934.0</b> | <b>166,934.0</b> | <b>166,934.0</b> |
| <b>CAPITAL DE TRABAJO E INVERSIONES</b> |                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| <b>Capital de trabajo</b>               | 23,784.3          |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Terreno                                 | 75,000            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Equipos, maquinaria y soportes          | 45,000            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Labor de montaje o instalación y        | 15,000            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Ingeniería y supervisión                | 61,440            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Equipos de oficina, muebles y           | 3,160             |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| <b>Inversión Total</b>                  | <b>199,600.0</b>  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| <b>FLUJO CAJA ECONÓMICA AI</b>          |                   | <b>116,302.2</b> | <b>121,236.5</b> | <b>124,459.9</b> | <b>124,459.9</b> | <b>124,459.9</b> | <b>130,566.0</b> | <b>130,566.0</b> | <b>130,566.0</b> | <b>130,566.0</b> | <b>144,526.0</b> |
| Impuesto a la renta (30%)               |                   | 34,890.7         | 36,370.9         | 37,338.0         | 37,338.0         | 37,338.0         | 39,169.8         | 39,169.8         | 39,169.8         | 39,169.8         | 43,357.8         |
| <b>FLUJO CAJA ECONÓMICA DI</b>          | <b>-223,384.3</b> | <b>81,411.6</b>  | <b>84,865.5</b>  | <b>87,121.9</b>  | <b>87,121.9</b>  | <b>87,121.9</b>  | <b>91,396.2</b>  | <b>91,396.2</b>  | <b>91,396.2</b>  | <b>91,396.2</b>  | <b>101,168.2</b> |

Tabla 34. Flujo de caja Económico

## 6.2. Estudio financiero

En este punto se presentarán el Estado de Ganancias y Pérdidas, los Flujos de Caja Económico y Financiero y el análisis del Punto de Equilibrio de la demanda para el horizonte de proyección.

### 6.2.1. Estado de resultados

El estado de resultados será definido por el estado de ganancias y pérdidas, que se muestra en la Tabla 35, en donde el costo de ventas está representado por los costos variables definidos anteriormente. Asimismo, los gastos financieros están determinados por los intereses a partir de la estructura de financiación, luego de la cual se obtiene la utilidad neta después de impuestos. Esta utilidad es positiva durante los 10 años del proyecto y, además, va en aumento, pues hace favorable al proyecto para obtener resultados positivos.

| <b>Estado de Ganancia y Pérdidas</b> | <b>Año 1</b>   | <b>Año 2</b>   | <b>Año 3</b>   | <b>Año 4</b>   | <b>Año 5</b>   | <b>Año 6</b>   | <b>Año 7</b>   | <b>Año 8</b>   | <b>Año 9</b>   | <b>Año 10</b>  |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Venta Netas                          | 289,000        | 289,000        | 289,000        | 289,000        | 289,000        | 297,500        | 297,500        | 297,500        | 297,500        | 297,500        |
| Costo de Ventas                      | 80,585         | 80,585         | 80,585         | 80,585         | 80,585         | 82,955         | 82,955         | 82,955         | 82,955         | 82,955         |
| Depreciación                         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         | 12,564         |
| <b>Utilidad Bruta</b>                | <b>195,851</b> | <b>195,851</b> | <b>195,851</b> | <b>195,851</b> | <b>195,851</b> | <b>201,981</b> | <b>201,981</b> | <b>201,981</b> | <b>201,981</b> | <b>201,981</b> |
| Gastos remunerativos                 | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         | 79,860         |
| Gastos administrativos               | 4,029          | 4,029          | 806            | 806            | 806            | 830            | 830            | 830            | 830            | 830            |
| Gastos indirectos de Fabricación     | 8,224          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          | 3,289          |
| <b>Utilidad Operativo</b>            | <b>103,738</b> | <b>108,672</b> | <b>111,896</b> | <b>111,896</b> | <b>111,896</b> | <b>118,002</b> | <b>118,002</b> | <b>118,002</b> | <b>118,002</b> | <b>118,002</b> |
| Gastos financiero (intereses)        | 23,752         | 22,692         | 21,451         | 19,999         | 18,300         | 16,312         | 13,987         | 11,266         | 8,082          | 4,358          |
| <b>Utilidad antes IR</b>             | <b>79,986</b>  | <b>85,981</b>  | <b>90,445</b>  | <b>91,897</b>  | <b>93,596</b>  | <b>101,690</b> | <b>104,015</b> | <b>106,736</b> | <b>109,920</b> | <b>113,644</b> |
| Impuesto a la renta (IR)             | 23,996         | 25,794         | 27,134         | 27,569         | 28,079         | 30,507         | 31,205         | 32,021         | 32,976         | 34,093         |
| <b>Utilidad después IR</b>           | <b>55,990</b>  | <b>60,187</b>  | <b>63,312</b>  | <b>64,328</b>  | <b>65,517</b>  | <b>71,183</b>  | <b>72,811</b>  | <b>74,715</b>  | <b>76,944</b>  | <b>79,551</b>  |

Tabla 35. Estado de Ganancias y Pérdidas

### 6.2.2. Flujo de caja financiera

El siguiente flujo de caja financiero fue elaborado considerando la estructura financiera presentada anterior.

| Recursos                                | Año 0             | Año 1           | Año 2           | Año 3           | Año 4           | Año 5           | Año 6           | Año 7           | Año 8           | Año 9           | Año 10           |
|---|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| <b>INGRESOS</b>                         |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| Precio (USD por kg)                     |                   | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7             | 1.7              |
| Demanda (kg)                            |                   | 170,000.0       | 170,000.0       | 170,000.0       | 170,000.0       | 170,000.0       | 175,000.0       | 175,000.0       | 175,000.0       | 175,000.0       | 175,000.0        |
| <b>Venta Total</b>                      |                   | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 297,500.0        |
| Venta de Activo fijos                   |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 13,960           |
| <b>INGRESOS</b>                         |                   | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 289,000.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 297,500.0       | 311,460.0        |
| <b>EGRESOS</b>                          |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| Ichu                                    |                   | 53,550.0        | 53,550.0        | 53,550.0        | 53,550.0        | 53,550.0        | 55,125.0        | 55,125.0        | 55,125.0        | 55,125.0        | 55,125.0         |
| NaOH                                    |                   | 15,657.0        | 15,657.0        | 15,657.0        | 15,657.0        | 15,657.0        | 16,117.5        | 16,117.5        | 16,117.5        | 16,117.5        | 16,117.5         |
| Insumos                                 |                   | 255.0           | 255.0           | 255.0           | 255.0           | 255.0           | 262.5           | 262.5           | 262.5           | 262.5           | 262.5            |
| Electricidad                            |                   | 8,522.1         | 8,522.1         | 8,522.1         | 8,522.1         | 8,522.1         | 8,772.8         | 8,772.8         | 8,772.8         | 8,772.8         | 8,772.8          |
| Agua                                    |                   | 2,601.0         | 2,601.0         | 2,601.0         | 2,601.0         | 2,601.0         | 2,677.5         | 2,677.5         | 2,677.5         | 2,677.5         | 2,677.5          |
| <b>COSTO TOTAL VARIABLE</b>             |                   | 80,585.1        | 80,585.1        | 80,585.1        | 80,585.1        | 80,585.1        | 82,955.3        | 82,955.3        | 82,955.3        | 82,955.3        | 82,955.3         |
| Personal                                |                   | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7        | 79,859.7         |
| Gastos administrativos                  |                   | 4,029.3         | 4,029.3         | 805.9           | 805.9           | 805.9           | 829.6           | 829.6           | 829.6           | 829.6           | 829.6            |
| <b>COSTO TOTAL FIJO</b>                 |                   | 83,889.0        | 83,889.0        | 80,665.6        | 80,665.6        | 80,665.6        | 80,689.3        | 80,689.3        | 80,689.3        | 80,689.3        | 80,689.3         |
| <b>COSTO TOTAL DIRECTO</b>              |                   | 164,474.1       | 164,474.1       | 161,250.7       | 161,250.7       | 161,250.7       | 163,644.5       | 163,644.5       | 163,644.5       | 163,644.5       | 163,644.5        |
| <b>GASTOS INDIRECTOS DE F.</b>          |                   | 8,223.7         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5         | 3,289.5          |
| <b>COSTO TOTAL</b>                      |                   | 172,697.8       | 167,763.5       | 164,540.1       | 164,540.1       | 164,540.1       | 166,934.0       | 166,934.0       | 166,934.0       | 166,934.0       | 166,934.0        |
| <b>CAPITAL DE TRABAJO E INVERSIONES</b> |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| Capital de trabajo                      | 23,784.3          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| Inversión Total                         | 199,600.0         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| <b>FLUJO CAJA ECONÓMICA</b>             |                   | 116,302.2       | 121,236.5       | 124,459.9       | 124,459.9       | 124,459.9       | 130,566.0       | 130,566.0       | 130,566.0       | 130,566.0       | 144,526.0        |
| Impuesto a la renta (30%)               |                   | 34,890.7        | 36,370.9        | 37,338.0        | 37,338.0        | 37,338.0        | 39,169.8        | 39,169.8        | 39,169.8        | 39,169.8        | 43,357.8         |
| <b>FLUJO CAJA ECONÓMICA</b>             | <b>-223,384.3</b> | <b>81,411.6</b> | <b>84,865.5</b> | <b>87,121.9</b> | <b>87,121.9</b> | <b>87,121.9</b> | <b>91,396.2</b> | <b>91,396.2</b> | <b>91,396.2</b> | <b>91,396.2</b> | <b>101,168.2</b> |
| Préstamo                                | 139,720.0         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| Interés                                 |                   | 23,752.4        | 22,691.7        | 21,450.7        | 19,998.7        | 18,299.9        | 16,312.2        | 13,986.7        | 11,265.8        | 8,082.4         | 4,357.8          |
| Amortización                            |                   | 6,239.4         | 7,300.1         | 8,541.1         | 9,993.1         | 11,692.0        | 13,679.6        | 16,005.1        | 18,726.0        | 21,909.4        | 25,634.0         |
| Escudo financiero                       |                   | 7,125.7         | 6,807.5         | 6,435.2         | 5,999.6         | 5,490.0         | 4,893.7         | 4,196.0         | 3,379.7         | 2,424.7         | 1,307.3          |
| <b>FLUJO DE FINANCIAMIENTO</b>          | 139,720.0         | -22,866.1       | -23,184.3       | -23,556.6       | -23,992.2       | -24,501.9       | -25,098.2       | -25,795.8       | -26,612.1       | -27,567.1       | -28,684.5        |
| <b>FLUJO DE CAJA FINANCIERO</b>         | <b>-83,664.3</b>  | <b>58,545.5</b> | <b>61,681.2</b> | <b>63,565.3</b> | <b>63,129.7</b> | <b>62,620.0</b> | <b>66,298.0</b> | <b>65,600.4</b> | <b>64,784.1</b> | <b>63,829.1</b> | <b>72,483.7</b>  |

**Tabla 36.** Flujo de caja financiero

### 6.2.3. Análisis del punto de equilibrio

Para analizar el punto de equilibrio, se determinará la cantidad mínima que se necesita vender para que la utilidad anual antes del impuesto a la renta sea igual a cero, es decir, para que los ingresos sean iguales a los egresos. Para los egresos se considera los costos variables, depreciación, gastos remunerativos, gastos administrativos (promedio anual), gastos indirectos de fabricación (promedio anual) y gastos financieros (intereses). Además, el ingreso total considera el monto de ingreso por ventas totales del primer año, asumiendo a su vez que no hay un crecimiento por parte de la demanda, por lo tanto las ventas totales se mantienen por el resto del periodo. Se iterará para varios valores de demanda (en kg), partiendo desde 50,000 kg hasta 170,000, aumentando de 10,000 kg. En la Tabla 37, se resumen los montos utilizados y se obtiene que a alrededor de 100,000 kg de demanda se obtiene el punto de equilibrio, puesto que la utilidad es cero. Por otro lado, la Figura 33 muestra gráficamente el punto de equilibrio a través de las líneas de ingresos y egresos en función de la demanda; las cuales se cruzan en el punto de equilibrio igual a 100,000 kg, aproximadamente. Por lo tanto, desde este punto de vista, la comercialización de fibras de Ichu es factible.

| <b>Demanda (kg)</b> | <b>Ingresos Totales (USD)</b> | <b>Costos Variables (USD)</b> | <b>Depreciación (USD)</b> | <b>Gastos Remunerativos. (USD)</b> | <b>Gastos Administrativos (en USD)</b> | <b>Gastos indirectos de Fabricación (USD)</b> | <b>Gastos Financieros (USD)</b> | <b>Utilidad antes impuestos (USD)</b> |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|---|---------------------------------|---------------------------------------|
| 50,000              | 85,000                        | 23,702                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | -60,123                               |
| 60,000              | 102,000                       | 28,442                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | -47,863                               |
| 70,000              | 119,000                       | 33,182                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | -35,603                               |
| 80,000              | 136,000                       | 37,922                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | -23,344                               |
| 90,000              | 153,000                       | 42,663                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | -11,084                               |
| <b>100,000</b>      | <b>170,000</b>                | <b>47,403</b>                 | <b>12,564</b>             | <b>79,860</b>                      | <b>1,462</b>                           | <b>3,783</b>                                  | <b>23,752</b>                   | <b>1,176</b>                          |
| 110,000             | 187,000                       | 52,143                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 13,435                                |
| 120,000             | 204,000                       | 56,884                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 25,695                                |
| 130,000             | 221,000                       | 61,624                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 37,955                                |
| 140,000             | 238,000                       | 66,364                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 50,214                                |
| 150,000             | 255,000                       | 71,105                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 62,474                                |
| 170,000             | 289,000                       | 80,585                        | 12,564                    | 79,860                             | 1,462                                  | 3,783   | 23,752                          | 86,994                                |

**Tabla 37.** Determinación el punto de equilibrio en función de la demanda

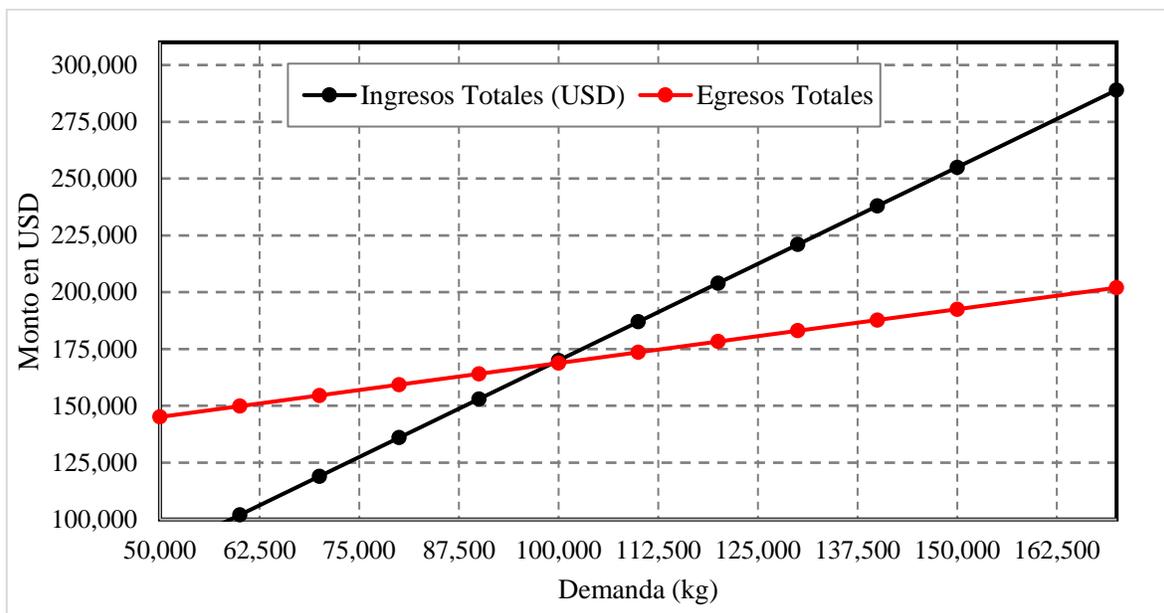


Figura 33. Análisis de Punto equilibrio

### 6.3. Análisis de rentabilidad

A continuación se procede a efectuar un análisis de la rentabilidad del proyecto de inversión de producción y comercialización de fibras técnicas de Ichu. Para ello, se determinarán los siguientes indicadores de rentabilidad:

#### 6.3.1. Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto indica el valor actual o presente de los flujos netos de caja esperados en el periodo del proyecto y comprobar si ello justifica la inversión inicial. El VAN puede ser determinado a partir del flujo de caja económico, denominado Valor Actual Neto Económica (VANE) y se utiliza el Costo de Oportunidad (COK) como la tasa de descuento. Por otro lado, VAN Financiero (VANF) se obtiene a partir del flujo de caja financiero y usando el Costo ponderado de capital (WAAC) como la tasa de descuento. En la Tabla 38 se muestran el COK, WACC y los datos utilizados para este proyecto de inversión. Estos cálculos están basadas en el modelo de precios activos de capital (CAPM), como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$COK = \text{Riesgo del país} + \text{Beta}_{\text{apalancado}} * R_p + R_f$$

Donde:

$R_p$ : Prima del mercado

$R_f$ : Tasa libre de riesgo

$$WAAC = (\% \text{ Deuda}) * TEA * (1 - IR) + (\% \text{ Capital}) * COK$$

Donde:

% Deuda: Representa el porcentaje de deuda con respecto a la inversión (30%)

TEA: Tasa Efectiva de financiamiento (17%, Scotiabank)

IR: Impuesto a la Renta (30%)

% Capital: Representa el porcentaje de capital con respecto a la inversión (70%)

| Descripción  | Valor        |
|--|--------------|
| Riesgo del país                                    | 1.2%         |
| Beta Damodaram (papel y productos forestales)      | 1.20         |
| Beta apalancada                                    | 3.99         |
| Prima del mercado ( $R_m - R_f$ )                  | 6.0%         |
| Rendimiento de un activo libre de riesgo ( $R_f$ ) | 3.5%         |
| <b>COK</b>   | <b>28.6%</b> |
| <b>WAAC</b>  | <b>20.5%</b> |

**Tabla 38.** Cálculo del COK y WAAC [113]-[114]

Como se puede apreciar en la Tabla 39, se calculó el VAN económico y financiero; estos valores, al ser positivos, implican que la inversión en este proyecto es aceptable, pues supera las expectativas del costo de capital del inversionista y del costo de financiamiento utilizado.

|                |               |
|----------------|---------------|
| VAN Económico  | S/ 54,321.45  |
| VAN Financiero | S/ 175,870.28 |

**Tabla 39.** VAN del proyecto

### 6.3.2. Tasa Interno de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es una medida utilizada en la evaluación de proyecto que muestra la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. En otras palabras, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. Esta tasa está relacionada con el Valor Actualizado Neto (VAN) y se define como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado.

La Tabla 40 muestra el TIR económico y financiero determinado con el flujo de caja económico y financiero, respectivamente. Estos resultados son mayores al costo de capital (COK) y costo de capital ponderado (WAAC), en consecuencia se puede decir que el proyecto es factible bajo este análisis. Este indicador junto con el VAN, se complementan para sustentar la factibilidad del proyecto.

|                |              |
|----------------|--------------|
| TIR Económico  | 36.80%       |
| TIR Financiero | 72.66%       |
| <b>WAAC</b>    | <b>20.5%</b> |
| <b>COK</b>     | <b>28.6%</b> |

Tabla 40. TIR del proyecto

### 6.3.3. Relación de Beneficio – Costo (B/C)

La relación Beneficio Costo (B/C) es otro de los indicadores de rentabilidad importantes para determinar qué tan distantes están los ingresos de los egresos durante el periodo del proyecto. Para este cálculo se dividirán la suma de los ingresos entre los egresos del periodo del proyecto durante los 10 años del proyecto, considerando el valor en el tiempo y la inversión. Los egresos incluyen los costos variables, fijos y gastos indirectos de fabricación. Para este proyecto la relación B/C resulta 3.01 mayor a 1; por lo tanto una vez más se valida la factibilidad y la buena rentabilidad del proyecto.

#### 6.3.4. Periodo de recuperación

El periodo de recuperación es un indicador que muestra el tiempo que deberá transcurrir para recuperar el monto de la inversión. En la Tabla 41 se muestra que la inversión se recupera en el transcurso del quinto año. Por lo tanto, desde este punto de vista el proyecto continúa demostrando su factibilidad.

| Periodo     | Flujo de caja económico | Valor actual neto | VNA Acumulado  |
|-------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| Inicio      | <b>-223,384.3</b>       |                   |                |
| 2019        | 81,411.6                | 67,586            | 67,586         |
| 2020        | 84,865.5                | 58,489            | 126,075        |
| 2021        | 87,121.9                | 49,847            | 175,922        |
| 2022        | 87,121.9                | 41,382            | 217,304        |
| <b>2023</b> | <b>87,121.9</b>         | <b>34,354</b>     | <b>251,658</b> |
| 2024        | 91,396.2                | 29,919            | 281,578        |
| 2025        | 91,396.2                | 24,838            | 306,416        |
| 2026        | 91,396.2                | 20,620            | 327,037        |
| 2027        | 91,396.2                | 17,119            | 344,155        |
| 2028        | 101,168.2               | 15,731            | 359,886        |

**Tabla 41.** Periodo de recuperación

#### 6.4. Análisis de sensibilidad

La evaluación de la rentabilidad realizada evaluó solamente un escenario en el que las variables críticas del proyecto se mantienen constantes. Con el objetivo de evaluar cómo afectan estas variables a la rentabilidad del proyecto, se simularán diferentes escenarios con las variables más importantes en la evaluación del proyecto. Las variables que se utilizarán en el presente análisis de sensibilidad son el precio, demanda, costo de la Materia prima (hojas de Ichu) y costo del insumo de NaOH.

### 6.4.1. Precio del producto

Con el objetivo de medir la sensibilidad del precio del producto en la rentabilidad del proyecto, se plantearon 5 escenarios como se muestra en la Tabla 42. A nivel financiero, se puede apreciar que el proyecto se mantiene rentable en todos los escenarios. Por el lado económico, cuando el precio se reduce 10% se aprecia el riesgo más alto, desde el punto de vista del TIR y VAN económico. Sin embargo, la relación costo beneficio se mantiene altamente rentable (2.8).

| Precio              | Variación | VANE      | VANF      | TIRE  | TIRF  | B/C financiero |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|----------------|
| Escenario optimista | 10%       | 119688.0  | 260082.0  | 46.3% | 96.6% | 3.4            |
| Escenario optimista | 5%        | 87,004.7  | 217,976.1 | 41.6% | 84.6% | 3.3            |
| Escenario estimado  | 0%        | 54,321.5  | 175,870.3 | 36.8% | 72.7% | 3.1            |
| Escenario pesimista | 5%        | 21,638.2  | 133,764.4 | 31.9% | 60.6% | 2.9            |
| Escenario pesimista | 10%       | -11,045.1 | 91,658.6  | 26.9% | 48.5% | 2.8            |

**Tabla 42.** Escenario de variación de precio del producto (COK=28.6 %)

### 6.4.2. Demanda del producto

La Tabla 43 muestra los escenarios para evaluar la sensibilidad de la demanda en la rentabilidad del proyecto. De acuerdo con la simulación, el proyecto es rentable en todos los escenarios evaluados, a nivel financiero y económico. Sin embargo, el TIR económico muestra un ligero riesgo en la rentabilidad del proyecto cuando la demanda se reduce en 10%.

| Demanda             | Variación | VANE      | VANF      | TIRE  | TIRF  | B/C financiero |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|----------------|
| Escenario optimista | 10%       | 100,448.7 | 235,386.1 | 43.5% | 89.4% | 3.2            |
| Escenario optimista | 5%        | 77,385.1  | 205,628.2 | 40.2% | 81.0% | 3.1            |
| Escenario estimado  | 0%        | 54,321.5  | 175,870.3 | 0.4   | 0.7   | 3.1            |
| Escenario pesimista | 5%        | 31,257.8  | 146,112.4 | 33.4% | 64.2% | 3.1            |
| Escenario pesimista | 10%       | 8,194.2   | 116,354.5 | 29.9% | 55.7% | 3.0            |

**Tabla 43.** Escenario de variación de la Demanda del producto (COK=28.6 %)

### 6.4.3. Costo de la Materia Prima

Se decidió evaluar la sensibilidad del precio de la materia prima debido a que no se cuenta con una información exacta de su precio ya que la planta de ichu no se comercializa a escala industrial. Para esta evaluación, el costo de la materia prima se probó en un rango de 0.95 – 1.15 USD por kilogramo. De acuerdo a la simulación el proyecto se mantiene rentable en todos los escenarios propuestos, incluso en el escenario más pesimista, como se muestra en la Tabla 44. Por lo tanto, el costo de la materia prima en comparación a los otros parámetros evaluados, no afecta a la rentabilidad del proyecto.

| Costo de MP         | Variación | VANE     | VANF      | TIRE  | TIRF  | B/C financiero |
|---------------------|-----------|----------|-----------|-------|-------|----------------|
| Escenario optimista | 10%       | 67,106.3 | 192,281.1 | 38.7% | 77.4% | 3.3            |
| Escenario optimista | 5%        | 60,713.9 | 184,075.7 | 37.7% | 75.0% | 3.2            |
| Escenario estimado  | 0%        | 54,321.5 | 175,870.3 | 36.8% | 72.7% | 3.1            |
| Escenario pesimista | 5%        | 47,929.0 | 167,664.9 | 35.9% | 70.3% | 3.0            |
| Escenario pesimista | 10%       | 41,536.6 | 159,459.5 | 34.9% | 67.9% | 3.0            |
| Escenario pesimista | 20%       | 41,536.6 | 159,459.5 | 34.9% | 67.9% | 3.0            |

**Tabla 44.** Escenario de variación del costo de la Materia Prima (COK=28.6 %)

### 6.4.4. Gasto Remunerativo

El gasto remunerativo en el proyecto representa el 47.5% de los egresos, por lo que se decide evaluar su sensibilidad en la rentabilidad del proyecto. En la Tabla 45, muestra los 5 escenarios simulados, del cual se puede decir que a pesar del aumento en 10% del gasto remunerativo la rentabilidad del proyecto se mantiene favorable en todos los escenarios.

| Gasto remunerativo  | Variación | VANE     | VANF      | TIRE  | TIRF  | B/C financiero |
|---------------------|-----------|----------|-----------|-------|-------|----------------|
| Escenario optimista | 10%       | 72,756.9 | 199,549.4 | 39.5% | 79.5% | 3.3            |
| Escenario optimista | 5%        | 63,539.2 | 187,709.9 | 38.2% | 76.1% | 3.2            |
| Escenario estimado  | 0%        | 54,321.5 | 175,870.3 | 36.8% | 72.7% | 3.1            |
| Escenario pesimista | 5%        | 45,103.7 | 164,030.7 | 35.4% | 69.2% | 3.0            |
| Escenario pesimista | 10%       | 35,886.0 | 152,191.1 | 34.1% | 65.8% | 2.9            |

**Tabla 45.** Escenario de variación del Gasto remunerativo (COK=28.6 %)

#### 6.4.5. Escenario dinámico

Con el objetivo de analizar la sensibilidad de las dos variables más críticas en la rentabilidad del proyecto, se realizó un escenario dinámico utilizando la variación del precio del producto y la demanda, como se muestra en la Tabla 46.

| <b>Escenario</b>    | <b>Descripción</b>  |
|---------------------|---|
| Escenario optimista | Incremento del precio del producto en 5% e incremento de la demanda en 5% |
| Escenario estimado  | Los presupuestos se mantiene igual al estimado                            |
| Escenario pesimista | Reducción del precio del producto en 5 % y reducción de la demanda 5%     |

**Tabla 46.** Escenario dinámico

La rentabilidad del proyecto se mantiene favorable desde ambos enfoques; sin embargo desde el punto de vista económico es decir sin deuda, el escenario pesimista genera un ligero riesgo para el proyecto, como se muestra en la Tabla 47.

| <b>Escenario dinámico</b> | <b>VANE</b> | <b>VANF</b> | <b>TIRE</b> | <b>TIRF</b> | <b>B/C financiero</b> |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| Escenario optimista       | 111,702.5   | 249,839.3   | 45.1%       | 93.6%       | 3.3                   |
| Escenario estimado        | 54,321.5    | 175,870.3   | 36.8%       | 72.7%       | 3.1                   |
| Escenario pesimista       | 208.7       | 106,111.8   | 28.7%       | 52.7%       | 2.9                   |

**Tabla 47.** Indicadores de rentabilidad – escenario dinámico (COK=28.6 %)

# CONCLUSIONES

## 7.1. Conclusiones:

La Fase 0, Propuesta de línea base para la obtención de fibras técnicas de Ichu, logró reducir la variación en los resultados de sus especificaciones técnicas (Índice de Materiales en compuestos polimérico) en 25%, en comparación a las fibras de Yute en compuestos. Esto se debió principalmente a la estratificación de la Materia Prima en especie (*Stipa obtusa*) y parte de la planta (hoja), ya que en pruebas preliminares se observó diferentes comportamientos relacionados a estas características. Además, la selección de estas características consideró la facilidad de procesamiento (desfibrilación) y mayor disponibilidad, de tal forma que garantiza la viabilidad de su producción a escala industrial

La metodología en la fase Screening fue eficiente en términos de costo y tiempo de experimentación (a nivel de laboratorio) y se debió principalmente por dos estrategias. Primero, definir al Nivel de Severidad (porcentaje de masa pérdida) como el indicador para evaluar el proceso propuesto, ya que permitió una fácil (por gravimetría) y rápida experimentación reduciendo el costo de pruebas mecánicas. Segundo, planificar los experimentos en base al Diseño Factorial Fraccionado, lo cual logró reducir en 50% la cantidad de experimentos a ejecutar con una resolución experimental adecuada (IV).

La evaluación del proceso propuesto (Fase 1), demostró que la obtención de fibras técnicas a partir del Ichu necesita menor intensidad en el proceso de extracción. Debido a que el análisis de los resultados descartó la efectividad del desfibrilado mecánico ya que el diámetro de la materia prima es mucho más pequeño que el de las otras fibras naturales y no necesita reducirlo más para facilitar el efecto del tratamiento alcalino. Asimismo, se verificó que el efecto de este tratamiento alcalino a base de hidróxido de sodio es el más significativo para reducir los componentes no celulósicos. Por lo tanto, los otros procesos de extracción (enriado de agua y el desfibrilado mecánico) fueron descartados del proceso de obtención, así reducir el consumo de agua y energía, y aumentar la flexibilidad del proceso a escala industrial.

En la Fase 2, Optimización técnica, se logró establecer el Nivel de severidad a 53.29% para permitir un balance entre el rendimiento de la materia prima y el cumplimiento de las especificaciones técnicas de las fibras Ichu (Tabla 6). Estas especificaciones basadas en los Índice de materiales permitieron evaluar la calidad de las fibras y su compatibilidad con las matrices poliméricas, los cuales son factores claves para garantizar su aplicación industrial. Por otro lado, el sistema de medición establecido en esta fase fue eficaz, ya que logró un ajuste mayor a 80% para describir el comportamiento de las fibras y evitar que las variables no controlables (alineamiento, volumen de fracción, sensibilidad del equipo) afecten el resultado.

El uso de la Secuencialidad de DOE permitió optimizar el Nivel de Severidad de manera eficiente en términos de costo y tiempo de experimentación. Esto se logró a partir de un pequeño primer experimento, en el cual se obtiene la tendencia del Nivel de Severidad óptimo; que es utilizado para diseñar eficientemente los próximos experimentos, realizados en la etapa de Afinamiento. Asimismo, los Índices de materiales obtenidos con el NS óptimo demuestran que las fibras técnicas de Ichu en los compuestos no solo cumplen con las especificaciones establecidas, sino también lo superan en rigidez (IM-rigidez).

En la Fase 3, el método de Diseño de Superficie de Respuesta y la gráfica de contornos permitieron definir los parámetros del tratamiento alcalino a una concentración de 0.4 molar a 65 °C por 3.5 horas, para alcanzan el mínimo costo estimado del tratamiento alcalino (a nivel industrial) a 1.36 soles por kilogramo de fibra producida. Además, el Nivel de Severidad óptimo permitió asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas para establecer los parámetros del tratamiento, y reduciendo el costo de experimentación. Sin embargo, la obtención de los resultados no fue tan sencillo, ya que antes de estimar los costos de producción de las matrices experimentales se necesitó realizar una serie de pruebas preliminares para determinar los tiempos del tratamiento que se ajustan al Nivel de Severidad óptimo para cada concentración y temperatura del plan experimental.

El análisis en esta fase demostró que el costo de hidróxido de sodio representa el mayor costo de producción alto, por lo cual la reducción de este fue clave para la minimización del costo del tratamiento alcalino. Asimismo, esta reducción a 0.5 molar de

NaOH demuestra una vez más la facilidad del procesamiento del Ichu y logra obtener un proceso más amigable con el ambiente tanto en el bajo consumo en Hidróxido de Sodio para el Tratamiento Alcalino, y agua para el proceso de enjuague de las fibras. El proceso de producción diseñado alcanzó un costo de producción (0.99 USD).

La evaluación financiera de la producción y comercialización de fibras técnicas de ichu, permitió comprobar la favorable rentabilidad del proyecto; debido a que su VAN Financiero resultó USD 175,870 y una TIR financiera de 72.66%, la cual es mayor al COK (28.6%) y WAAC (20.5%) calculados. Además, cabe resaltar que la relación Beneficio Costo del proyecto alcanza un ratio de 3.1 y un periodo de recuperación de la inversión a la mitad del proyecto (quinto año).

Para obtener un análisis más exhaustivo sobre los resultados generales del proyecto y tener un mejor sustento para la decisión de inversión, se realizó un análisis de sensibilidad de las variables críticas del proyecto: precio del producto, demanda del producto, costo de materia prima y gasto remunerativo. Se evidencia que el proyecto responde positivamente a todos los escenarios planteados para los indicadores financieros; sin embargo se observa una sensibilidad mayor al evaluar los indicadores económicos. Específicamente para el precio del producto, el proyecto generó indicadores económicos desfavorables para el escenario pesimista (a partir de 10%). Por otro lado, al plantear un escenario dinámico, en el que la demanda del producto mantuviera su valor y las variables más sensibles, el precio y la demanda cambien en 5% para un escenario pesimista, se obtuvo resultados financieros favorables: 106,112 USD y 52.7% para el VAN y TIR financiero.

## 7.2. Recomendaciones:

Para la producción y comercialización de las fibras técnicas de Ichu, se brindan las siguientes recomendaciones:

- En vista a la gran demanda de las fibras técnicas naturales, se recomienda expandir las líneas de productos de la empresa para obtener mayores ingresos y diluir los costos fijos. Se plantea la producción de fibras naturales a partir de otras materias primas endémicas como el maguey, cabuya, eucalipto, residuos de producción de cereales y otros que se producen cerca a la localización de la planta de producción (Juliaca, Puno). Sin embargo, para seleccionar éstas nuevas materias primas, se debe hacer una investigación de la disponibilidad de la materia prima y su evaluación técnica.
- Desde el punto de vista productivo, se recomienda asegurar el funcionamiento del sistema de cosecha para garantizar el cumplimiento de los requerimientos de la materia prima. Además, es importante que el plan de producción de fibras de Ichu considere que el tiempo de almacenamiento de productos en proceso no afecte la calidad y rendimiento (Nivel de Severidad) de la fibra; ya que ésta seguirá reaccionando con la solución alcalina y reduciendo su masa hasta ser enjuagada. El proceso final de empaquetado, se recomienda evitar que las fibras sean sometidas a presiones muy altas ya que afecta la calidad de la fibra.
- El producto, si bien está dirigido a las industrias automovilísticas, puede ser adaptado a otros nichos de mercado como por ejemplo la industria de artículos de deporte, muebles de alta gama, entre otros; en los cuales la fibra de Ichu pueda ser destacada más que por su funcionabilidad por su marca peruana en el producto, permitiéndole ser más valorada en el mercado. Esto permitiría reducir el riesgo de la sensibilidad del precio en la rentabilidad del proyecto.
- Se recomienda el uso de las fibras cortas que se generan como subproducto en la producción de fibras técnicas, con el objetivo de obtener ingresos a partir de su comercialización a las industrias de papel u otras.

## TRABAJOS FUTUROS

Para de reducir el costo de producción, se pueden realizar los siguientes estudios:

- Análisis de sensibilidad del costo de producción con el volumen de producción, considerando un crecimiento descentralizado de la producción para aumentar la disponibilidad de la materia prima, la cual es una de las principales restricciones.
- Se recomienda evaluar la factibilidad de producir fibras técnicas a partir de las otras partes de la planta (Ichu) que no son utilizadas e incluso a partir de otras plantas peruanas como el maguey, cabuya y rastrojos de cereales; de esta forma aumentar la rentabilidad del proyecto.
- Análisis de factibilidad para una planta de recuperación de hidróxido de sodio debe realizarse, con el fin de reducir el costo de este insumo ya que representa el mayor costo dentro de los insumos.

Con el objetivo de garantizar la factibilidad a escala industrial de la producción de fibras técnicas de Ichu se realizar los siguientes estudios:

- Planeamiento estratégico
- Estudio de mercado
- Estudio legal y organizacional
- Estudio de impacto ambiental
- Innovación a través nuevas fuentes naturales y procesos industriales

Por otro lado, las fibras naturales tienen gran potencial para otras aplicaciones como en la industria de papel y/o cartón, refuerzo construcciones, refuerzo para plásticos naturales etc.; que pueden ser evaluados para expandir el mercado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio del Ambiente y Dirección General de Diversidad Biológica (2016). *Glosario de términos comunes de la Iniciativa Peruana Biodiversidad y Empresas*. [En línea]. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/bye/wp-content/uploads/sites/108/2016/04/GLOSARIO-Iniciativa-ByE.pdf> [Mayo, 2018]
- [2] J. E. Bermúdez García, "Investigación científica en el Perú: factor crítico de éxito para el desarrollo del país," ed: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2014.
- [3] S. Charca, J. Noel, D. Andia, J. Flores, A. Guzman, C. Renteros, *et al.*, "Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 55-60, 2015/12/01/ 2015.
- [4] K. Pickering, *Properties and performance of natural-fibre composites*: Elsevier, 2008.
- [5] M. N. Fazita, M. Nurnadia, H. A. Khalil, M. M. Haafiz, H. Fizree, y N. Suraya, "Woven Natural Fiber Fabric Reinforced Biodegradable Composite: Processing, Properties and Application," in *Green Biocomposites*, ed: Springer, 2017, pp. 199-224.
- [6] M. Chandrasekar, M. Ishak, S. Sapuan, Z. Leman, y M. Jawaid, "A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 46, pp. 119-136, 2017.
- [7] Q. Dai, Jarod C. Kelly, J. L. Sullivan, y A. Elgowainy. "Life-Cycle Analysis Update of Glass and Glass Fiber for the GREETM Model". *Energy Systems Division*, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://greet.es.anl.gov/files/glass-fiber-update> [Mayo 2018].
- [8] M. Sanjay, Arpitha, G. , Naik, L. , Gopalakrishna, K. y Yogesha, B., "Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview," *Natural Resources*, vol. 7, p. 6, 2016.
- [9] H.-y. Cheung, M.-p. Ho, K.-t. Lau, F. Cardona y D. Hui, "Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 40, pp. 655-663, 2009/10/01/ 2009.
- [10] H. Savastano Jr, S. F. Santos, J. Fiorelli y V. Agopyan, "19 - Sustainable use of vegetable fibres and particles in civil construction A2 - Khatib, Jamal M," in *Sustainability of Construction Materials (Second Edition)*, ed: Woodhead Publishing, 2016, pp. 477-520.
- [11] C. D. Ward y C. M. Shackleton, "Natural Resource Use, Incomes, and Poverty Along the Rural-Urban Continuum of Two Medium-Sized, South African Towns," *World Development*, vol. 78, p. 14, 2016.
- [12] O. Adekomaya, T. Jamiru, R. Sadiku y Z. Huan, "Negative impact from the application of natural fibers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 843-846, 2017/02/01/ 2017.

- [13] A. Ali, K. Shaker, Y. Nawab, M. Jabbar, T. Hussain, J. Militky, *et al.*, "Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 0, p. 1528083716654468.
- [14] L. Yan, N. Chouw, L. Huang y B. Kasal, "Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibres, coir fibre reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 168-182, 2016/06/01/ 2016.
- [15] T. Lu, M. Jiang, Z. Jiang, D. Hui, Z. Wang y Z. Zhou, "Effect of surface modification of bamboo cellulose fibers on mechanical properties of cellulose/epoxy composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 51, pp. 28-34, 2013/08/01/ 2013.
- [16] M. Das y D. Chakraborty, "Effects of alkalization and fiber loading on the mechanical properties and morphology of bamboo fiber composites. II. Resol matrix," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 112, pp. 447-453, 2009.
- [17] M. Das y D. Chakraborty, "Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107, pp. 522-527, 2008.
- [18] R. Ferris. "China Auto Regulatory Trends 2016: New-Energy, Materials Restrictions, Recalls and Emissions Figure Prominently". *The National Law review*, ed. Foley & Lardner LLP, 2016.
- [19] *Directive 2000-53/EC of the European Parliament and of the Council of September 18, 2000 on end-of-life vehicles*, 2000.
- [20] The Nielsen Company (2015, Mayo 2018). The Sustainability Imperative. Disponible en: <http://www.nielsen.com/content/dam/niensenglobal/co/docs/Reports/2015/global-sustainability-report.pdf>
- [21] Mario Tapia y J. Flores, (1984) *Pastoreo y pastizales de los Andes del sur del Perú* [En Línea]. Disponible en: <http://infoalpacas.com.pe/wp-content/uploads/2016/06/Pnaar371.pdf>
- [22] G. Mamani, A. Garcia y F. Durand , "Manejo y utilización de pradera naturales en la zona altoandina". INIA. EEA Canaán, Ayacucho, Perú, 2012.
- [23] C. Boland, R. DeKleine, A. Moorthy, G. Keoleian, H. C. Kim, E. Lee, *et al.*, "A Life Cycle Assessment of Natural Fiber Reinforced Composites in Automotive Applications," 2014.
- [24] Producto Bruto Interno por departamentos 2014. *INEI ed*, [En Línea]. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/pbi-dep-2014.pdf> [Julio, 2018]
- [25] Anderson, M. J. (2005), "Trimming the fat out of experimental Methods". OE Magazine [En Línea]. Disponible en: <https://www.statease.com/pubs/doeprimer.pdf> [Julio, 2018].

- [26] J. Antony, "1 - Introduction to Industrial Experimentation," in *Design of Experiments for Engineers and Scientists (Second Edition)*, J. Antony, Ed., ed Oxford: Elsevier, 2014, pp. 1-6.
- [27] H. Gutierrez y R. de la Vara, *Análisis y diseños de experimentos*, 2 ed. Mexico: McGraw-Hill, 2008.
- [28] Wu C., y Hamada M. *Experiments: planning. analysis. and optimization*, Atlanta, USA: Jhon Willey, 2009.
- [29] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, New York: Wiley, 2005.
- [30] G. Taguchi, S. Chowdhury y Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. New York: Wiley Interscience, 2004.
- [31] V. N. Nair, B. Abraham, J. MacKay, G. Box, R. N. Kacker, T. J. Lorenzen, *et al.*, "Taguchi's parameter design: a panel discussion" *Technometrics*, vol. 34, pp. 127-161, 1992.
- [32] A. Thomas y J. Antony, "A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment," *International journal of productivity and performance management*, vol. 54, pp. 658-678, 2005.
- [33] M. Tanco, "Metodologías para la aplicación de Diseño de Experimentos (DoE) en la industria", Tesis doctoral, Universidad de Navarra, 2008.
- [34] C. Pierlot, L. Pawlowski, M. Bigan, y P. Chagnon, "Design of experiments in thermal spraying: A review," *Surface and Coatings technology*, vol. 202, pp. 4483-4490, 2008.
- [35] V. P. Astakhov, "Screening (sieve) design of experiments in metal cutting," in *Design of Experiments in Production Engineering*, ed: Springer, 2016, pp. 1-37.
- [36] M. Tanco, E. Viles, y L. Pozueta, "Comparing different approaches for design of experiments (DoE)," in *Advances in electrical engineering and computational science*, ed: Springer, 2009, pp. 611-621.
- [37] R. Ranjit, *Design of experiments using the Taguchi Approach*. Canada: Jhon Wiley, 2001.
- [38] H. Rowlands y J. Antony, "Application of design of experiments to a spot welding process," *Assembly Automation*, vol. 23, pp. 273-279, 2003.
- [39] J. Hron y T. Macák, "Application of design of experiments to welding process of food packaging," *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 61, pp. 909-915, 2013.
- [40] R. Mullin, "Design Of Experiments Makes A Comeback," in *Chemical and Engineering News* vol. 91 (3), EEUU: American Chemical Society, 2013.
- [41] M. Anderson. (2003, Julio 2018). DOE FAQ Alert Electronic Newsletter. *Statistics made easy*. Disponible en: <https://www.statease.com/news/faqalert3-2.html>
- [42] L. Ilzarbe, M. J. Álvarez, E. Viles, and M. Tanco, "Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, pp. 417-428, 2008.

- [43] R. Kessler, U. Becker, R. Kohler, and B. Goth, "Steam explosion of flax—a superior technique for upgrading fibre value," *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, pp. 237-249, 1998.
- [44] N. Zafeiropoulos, G. Dijon, and C. Baillie, "A study of the effect of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part I. Application of Gaussian statistics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, pp. 621-628, 2007.
- [45] N. Zafeiropoulos and C. Baillie, "A study of the effect of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part II. Application of Weibull statistics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, pp. 629-638, 2007.
- [46] P. Tudu, "Processing and characterization of natural fiber reinforced polymer composites," 2009.
- [47] A. Athijayamani, M. Thiruchitrambalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 517, pp. 344-353, 2009.
- [48] N. Ayrimis, S. Jarusombuti, V. Fueangvivat, P. Bauchongkol, y R. H. White, "Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications," *Fibers and Polymers*, vol. 12, p. 919, 2011.
- [49] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* vol. 1: Reverté, 2002.
- [50] D. B. Dittenber y H. V. GangaRao, "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, pp. 1419-1429, 2012.
- [51] K. L. Pickering, M. A. Efendy, y T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, pp. 98-112, 2016.
- [52] P. H. F. Pereira, M. d. F. Rosa, M. O. H. Cioffi, K. C. C. d. C. Benini, A. C. Milanese, H. J. C. Voorwald, *et al.*, "Vegetal fibers in polymeric composites: a review," *Polímeros*, vol. 25, pp. 9-22, 2015.
- [53] T. Väisänen, O. Das, and L. Tomppo, "A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 582-596, 2017.
- [54] S. Thomas, S. Paul, L. Pothan, and B. Deepa, "Natural fibres: structure, properties and applications," in *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites*, ed: Springer, 2011, pp. 3-42
- [55] C. Scarponi, "Industrial app. lications for natural fiber reinforced composites," *JEC Compos Mag*, vol. 46, pp. 46-47, 2009.
- [56] D. Tambyrajah, "Indulge & Explore Natural Fiber Composites," *An invitation to product designers*, 2015.

- [57] P. Reis, J. Ferreira, and P. Silva, "Mechanical behaviour of composites filled by agro-waste materials," *Fibers and Polymers*, vol. 12, p. 240, 2011.
- [58] F. M. Al-Oqla and S. Sapuan, "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 347-354, 2014
- [59] Glory Tang Group (Julio 2018) *100% Soybean Fiber, soya fiber, bleached or natural color* [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/100-Soybean-Fiber-soya-fiber-bleached\\_60336117985.html?spm=a2700.7724838.0.0.5r4rTw](https://www.alibaba.com/product-detail/100-Soybean-Fiber-soya-fiber-bleached_60336117985.html?spm=a2700.7724838.0.0.5r4rTw)
- [60] NNGBO WIN WAY (Julio 2018) *Linen fibre/flax fibre/bleached/natural* [En línea]. Disponible en: [https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/linen-fibre-flax-fibre-bleached-natural\\_60538852777.html?spm=a2700.7724838.0.0.G5eK7R](https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/linen-fibre-flax-fibre-bleached-natural_60538852777.html?spm=a2700.7724838.0.0.G5eK7R)
- [61] NANNING JIE CHENG HANG (2018) *Natural sisal fiber for sisal products* [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Natural-sisal-fiber-for-sisal-products\\_363969682.html?spm=a2700.7724838.0.0.xGxj22&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Natural-sisal-fiber-for-sisal-products_363969682.html?spm=a2700.7724838.0.0.xGxj22&s=p)
- [62] S. V. Joshi, L. Drzal, A. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, vol. 35, pp. 371-376, 2004.
- [63] S. Candiotti, "Study of the availability of raw material *Stipa ichu*, *Festuca Orthophylla* ("Iru ichu") and *Agave americana*, ("Maguey")," CONCYTEC, Perú 2017.
- [64] A. F. Martínez, *Manual de pastos y forraje altoandinos: Soluciones Practicas*, 2005.
- [65] P. A. Profile, "Junín National Reserve," 2006.
- [66] S. C. Carlos Tenazoa, María Quintana, Elena Flores, "Chemical characterization for the comparative study of peruvian natural fibers," in *17th International Conference on Non-Convventional Materials and Technologies* Merida, Mexico, 2017.
- [67] F.-d. Meng, Y.-l. Yu, Y.-m. Zhang, W.-j. Yu, and J.-m. Gao, "Surface chemical composition analysis of heat-treated bamboo," *Applied Surface Science*, vol. 371, pp. 383-390, 2016/05/15/ 2016.
- [68] H. P. S. Abdul Khalil, A. F. I. Yusra, A. H. Bhat, and M. Jawaid, "Cell wall ultrastructure, anatomy, lignin distribution, and chemical composition of Malaysian cultivated kenaf fiber," *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 113-121, 2010/01/01/ 2010.
- [69] M.-p. Ho, H. Wang, J.-H. Lee, C.-k. Ho, K.-t. Lau, J. Leng, *et al.*, "Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, pp. 3549-3562, 2012.
- [70] P. Zakikhani, R. Zahari, M. T. H. Sultan, and D. L. Majid, "Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 820-828, 2014/11/01/ 2014.
- [71] K. M. M. Rao and K. M. Rao, "Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo," *Composite structures*, vol. 77, pp. 288-295, 2007.

- [72] A. Orue, A. Jauregi, U. Unsuain, J. Labidi, A. Eceiza, and A. Arbelaiz, "The effect of alkaline and silane treatments on mechanical properties and breakage of sisal fibers and poly (lactic acid)/sisal fiber composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 84, pp. 186-195, 2016.
- [73] X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, "Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 15, pp. 25-33, 2007.
- [74] M. E. Fuentes Medina, C. M. Leon Nieto, and R. Paredes, "Diseño de un proceso para la fabricación de papel reciclado ecológico a escala laboratorio usando peróxido de hidrógeno," Universidad de Cartagena, 2012.
- [75] J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers*, vol. 1, pp. 37-68, 2004.
- [76] T. Sen and H. J. Reddy, "Various industrial applications of hemp, kinaf, flax and ramie natural fibres," *International journal of innovation, management and technology*, vol. 2, p. 192, 2011.
- [77] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, and I. Verpoest, "Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, pp. 193-205, 2016.
- [78] Le Lin Côté Nature, "Une Raquette De Tennis Légère Et Confortable", Junio 2018 [En línea]. Disponible en: <https://www.lelin-cotenature.fr/FR/Une-raquette-de-tennis-legere-et-confortable-46.html>
- [79] F. Duc, P. E. Bourban, C. J. G. Plummer, and J. A. E. Månson, "Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 64, pp. 115-123, 2014/09/01/ 2014.
- [80] F. Reux and I. Verpoest, *Flax and hemp fibres: a natural solution for the composite industry*: JEC Composites, 2014.
- [81] "Kang Ski Poles", *Kang Sverige AB*, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://kangpoles.com/>. [Accedido: 26-Jun-2018]
- [82] Decathlon, "Blyss deep team 5 flax fiber", 2017 [En línea]. Disponible en: [https://www.decathlon.es/blyss-deep-team-5-flax-fiber-id\\_8164177.html](https://www.decathlon.es/blyss-deep-team-5-flax-fiber-id_8164177.html) [Accedido: 26-Jun-2018]
- [83] A. Amiri, T. Krosbakken, W. Schoen, D. Theisen, and C. A. Ulven, "Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 232, pp. 28-38, 2018.
- [84] Narrative Content Group, "Flaxen Beauties: Professional Racing Bikes Made of Flax Fiber", 2018 [En línea]. Disponible en: <https://www.treehugger.com/sustainable-product->

- [design/flaxen-beauties-professional-racing-bikes-made-of-flax-fiber.html](#). [Accedido: 26-Jun-2018].
- [85] NSPSurfboard, "Products". Febrero 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.npsurfboards.com/ecoboard>
- [86] US Hem Co., "Home". Febrero 2017. [En línea]. Disponible: <http://ushempco.com/> no existe estandarización
- [87] Samsara, "Products". Febrero 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.samsarasurfboards.com/>
- [88] PwC. (2017). 2016 Auto Industry Trends. Publicado: Strategy and PwC. Disponible en: <https://www.strategyand.pwc.com/trends/2016-auto-industry-trends>
- [89] F. Ahmad, H. S. Choi, and M. K. Park, "A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties," *Macromolecular materials and engineering*, vol. 300, pp. 10-24, 2015
- [90] Lucintel (2011) Opportunities in Natural Fiber Composites [Online]. Recuperado en: <http://www.lucintel.com/lucintelbrief/potentialofnaturalfibercomposites-final.pdf>
- [91] N. S. Ermolaeva, K. G. Kaveline, and J. L. Spoomaker, "Materials selection combined with optimal structural design: concept and some results," *Materials & Design*, vol. 23, pp. 459-470, 2002/08/01/ 2002
- [92] M. F. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon, *Materials: engineering, science, processing and design*: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [93] F. H. de Oliveira, A. L. Helfer, and S. C. Amico, "Mechanical behavior of unidirectional curaua fiber and glass fiber composites," in *Macromolecular Symposia*, 2012, pp. 83-92.
- [94] S. Biswas, S. Shahinur, M. Hasan, and Q. Ahsan, "Physical, mechanical and thermal properties of jute and bamboo fiber reinforced unidirectional epoxy composites," *Procedia Engineering*, vol. 105, pp. 933-939, 2015.
- [95] M. Sridhar, G. Basavarappa, S. Kasturi, and N. Balasubramanian, "Mechanical properties of jute polyester composites. 13," *Indian Journal of Technology*, vol. 22, pp. 213-215, 1984.
- [96] M. Bhowmick, S. Mukhopadhyay, and R. Alagirusamy, "Mechanical properties of natural fibre-reinforced composites," *Textile progress*, vol. 44, pp. 85-140, 2012.
- [97] A. Van Vuure, L. Osario, E. Trujillo, C. Fuentes, and I. Verpoest, "Long bamboo fiber composites," in *Proc. 18th International Conference on Composite Materials*, 2009, pp. 27-31.
- [98] A. R. Smolje, "La gestión de los costos de investigación y desarrollo," *Revista Cuestiones Sociales y Económicas*, Buenos Aires, 2003.
- [99] Gallegos, Alejandro. "Six Sigma, Aplicaciones y usos en Empresas de Servicios"
- [100] ISO14125:2013. Fibre-reinforced plastic composites, Determination of flexural properties,

- [101] ASTM D 792 – 08. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
- [102] Ministerio de Energía y Minas. Tarifas eléctricas en el Perú. (En. 2016) Disponible en:  
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2015/com2015enemin.nsf//pubweb/389AD906020DCA4405257F960071F3B8/\\$FILE/PPT-MEM2016.PDF](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/comisiones/2015/com2015enemin.nsf//pubweb/389AD906020DCA4405257F960071F3B8/$FILE/PPT-MEM2016.PDF)
- [103] (2017) Alibaba.com [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Industry-grade-BV-Approved-99-Caustic\\_60645483220.html?spm=a2700.7724838.0.0.QbnTsG&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Industry-grade-BV-Approved-99-Caustic_60645483220.html?spm=a2700.7724838.0.0.QbnTsG&s=p)
- [104] (2017) Alibaba.com [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/2000L-Jacketed-Kettle-with-Hinged-cover\\_533805268.html](https://www.alibaba.com/product-detail/2000L-Jacketed-Kettle-with-Hinged-cover_533805268.html)
- [105] (2017) Alibaba.com [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Bottom-price-15kg-500kg-Vegetable-Dehydrator\\_60511068288.html?spm=a2700.7724838.0.0.PU2ib2](https://www.alibaba.com/product-detail/Bottom-price-15kg-500kg-Vegetable-Dehydrator_60511068288.html?spm=a2700.7724838.0.0.PU2ib2)
- [106] (2017) Alibaba.com [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Nonwoven-cheap-price-carding-machine-for\\_60653273115.html?spm=a2700.7724838.0.0.ZIRnsH](https://www.alibaba.com/product-detail/Nonwoven-cheap-price-carding-machine-for_60653273115.html?spm=a2700.7724838.0.0.ZIRnsH)
- [107] Janjai, Serm. "A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination." *International journal of energy and environment* 3.3 (2012): 383-398.
- [108] (2017) Alibaba.com [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/cotton-baling-machine-waste-paper-packer\\_60617295839.html?spm=a2700.7724838.0.0.nYqf8Y](https://www.alibaba.com/product-detail/cotton-baling-machine-waste-paper-packer_60617295839.html?spm=a2700.7724838.0.0.nYqf8Y)
- [109] EMPSSAPAL S.A. "Localidad Sicuani" [En Línea]. Disponible en: [http://www.sunass.gob.pe/doc/tarifas/empssapal\\_tarifas\\_42014.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/tarifas/empssapal_tarifas_42014.pdf)
- [110] Rolando Chávez P., Estudio de pre-factibilidad para implementar una empresa exportadora de prendas de vestir elaboradas con fibras naturales, en *Ingeniería Industrial*. 2009, PUCP.
- [111] Vittoria Ferraris, A.H., Nishit Malani, otros, *Global Auto Industry 2018: At A Crossroad*. 2017, S&P Global Ratings: EE.UU.
- [112] Leidy De La Cruz G., Estudio de pre-factibilidad para la producción y Comercialización de un complemento nutricional elaborado a base de productos naturales, en *Ingeniería Industrial*. 2018, PUCP.
- [113] Riesgo país de Perú cierra sin variación en 1.19 puntos porcentuales, en *Gestión*. 2018: Perú.
- [114] Damodaran, A. *Betas by Sector (US)*. [En línea] 2018 [citado 30 de Agosto del 2018].

## GLOSARIO

| <b>Término</b>               | <b>Significado</b>   |
|------------------------------|--|
| Análisis de Varianza (ANOVA) | Es una técnica estadística que prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. También, evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. |
| Compuestos                   | Es un tipo de material que se compone de dos o más fases. Generalmente, se compone de tres elementos: fibra, matriz e interfase.   |
| Costo puesto en planta DDP   | Es un costo de importación que incluye los riesgos y costos para la entrega de la mercancía con los trámites aduanales efectuados para llegar a la planta importadora  |
| Valor residual               | Es el valor de una maquinaria después de su vida útil  |
| Estructura Alias             | Son los efectos que no pueden estimarse por separado.  |
| Fibra técnica                | Es un nivel estructural de las paredes celulares de una planta y posee un diámetro entre 50 a 100 $\mu\text{m}$ .  |
| Matriz                       | Es uno de los componentes de un material compuesto y su función es proteger y mantener unido a las fibras.   |
| Niveles                      | Los niveles son los valores que se establecen a cada variable a estudiar, y puede ser numérico o categórico.   |
| Primer orden                 | Primer orden son las variables principales sin interacciones   |
| Refuerzo                     | Es uno de los componentes de un material compuesto y su función es resistir las fuerzas a las que son sometidas.   |
| Resolución experimental      | Es la capacidad que tiene el diseño para diferenciar los efectos de los factores por separado  |
| Tratamiento                  | Son las combinaciones entre los niveles de las variables a estudiar y las repeticiones, es decir la cantidad de pruebas a ejecutar.  |
| Unidad experimental          | Es un conjunto de pruebas que serán analizados en un mismo tiempo.   |
| Variables no controlables    | Son aquellas variables ruido que no pueden ser configuradas en el proceso o sistema.   |

## **ANEXOS**

**ANEXO 1. Resultados del experimento – Fase 0 [Elaboración Propia]**

| <b>Estado de maduración</b> | <b>Porcentaje de celulosa</b> |
|-----------------------------|-------------------------------|
| En desarrollo               | 35.04                         |
| En desarrollo               | 35.60                         |
| En desarrollo               | 34.31                         |
| Madura                      | 37.28                         |
| Madura                      | 37.86                         |
| Madura                      | 39.06                         |

**ANEXO 2: Resultados del experimento – Fase 1 [Elaboración Propia]**

| <b>Muestra</b> | <b>Nivel de Severidad (%)</b> |         |
|----------------|-------------------------------|---------|
| IH-PS-01       | 30.4945                       | 22.9396 |
| IH-PS-02       | 38.5989                       | 32.5549 |
| IH-PS-03       | 33.1044                       | 37.3626 |
| IH-PS-04       | 48.4890                       | 41.6209 |
| IH-PS-05       | 30.6319                       | 23.4890 |
| IH-PS-06       | 41.6209                       | 40.9341 |
| IH-PS-07       | 42.4451                       | 36.1264 |
| IH-PS-08       | 46.0165                       | 46.9780 |
| IH-PS-09       | 32.8297                       | 27.7473 |
| IH-PS-10       | 40.3846                       | 40.1099 |
| IH-PS-11       | 34.3407                       | 36.8132 |
| IH-PS-12       | 43.5440                       | 48.9011 |
| IH-PS-13       | 43.1319                       | 31.5934 |
| IH-PS-14       | 50.2747                       | 42.5824 |
| IH-PS-15       | 35.9890                       | 37.3626 |
| IH-PS-16       | 54.3956                       | 53.5714 |

**ANEXO 3: Resultados del experimento – Fase 2 [Elaboración Propia]**

| <b>Nivel de Severidad (%)</b> | <b>I.M. Long-Resistencia (MPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Trans-Resistencia (MPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Long-Rigidez (GPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Trans-Rigidez (GPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> |
|-------------------------------|--|---|--|---|
| 39.32                         | 20.5540  | 6.1294  | 2.2277   | 1.1042  |
| 39.32                         | 19.3179  | 6.3713  | 2.4483   | 1.1837  |
| 39.32                         | 21.0507  | 6.8863  | 2.2620   | 1.1514  |
| 39.32                         | 20.7879  | 5.8571  | 2.2795   | 1.1256  |
| 39.32                         | 21.0603  | 6.4190  | 2.3448   | 1.1649  |
| 53.29                         | 21.9408  | 7.0323  | 2.5560   | 1.2347  |
| 53.29                         | 22.0078  | 7.3480  | 2.3261   | 1.2707  |
| 53.29                         | 22.8328  | 7.3367  | 2.4925   | 1.2300  |
| 53.29                         | 21.8687  | 7.4243  | 2.5251   | 1.2799  |
| 53.29                         | 21.3891  | 7.5424  | 2.3172   | 1.2578  |
| 64.88                         | 20.3521  | 7.7680  | 2.1076   | 1.3853  |
| 64.88                         | 20.5376  | 8.5107  | 2.2360   | 1.3577  |
| 64.88                         | 20.9515  | 7.2962  | 2.2140   | 1.4355  |
| 64.88                         | 20.1910  | 8.4123  | 2.3276   | 1.3039  |
| 64.88                         | 20.7253  | 7.9254  | 2.0368   | 1.4466  |

**ANEXO 4: Resultados del experimento – Fase 2. Afinamiento [Elaboración Propia]**

| <b>Nivel de Severidad (%)</b> | <b>I.M. Long-Resistencia (MPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Trans-Resistencia (MPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Long-Rigidez (GPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> | <b>I.M. Trans-Rigidez (GPa/Mk.m<sup>-3</sup>)</b> |
|-------------------------------|--|---|--|---|
| 49.68                         | 20.3705  | 6.7561  | 2.3335   | 1.3412  |
| 49.68                         | 21.3957  | 6.4873  | 2.2715   | 1.2927  |
| 49.68                         | 22.0141  | 5.6590  | 2.3323   | 1.3790  |
| 49.68                         | 20.6262  | 5.7650  | 2.3468   | 1.3262  |
| 49.68                         | 21.8516  | 5.8166  | 2.2559   | 1.3675  |
| 53.29                         | 21.9408  | 7.0323  | 2.5560   | 1.2347  |
| 53.29                         | 22.0078  | 7.3480  | 2.3261   | 1.2707  |
| 53.29                         | 22.8328  | 7.3367  | 2.4925   | 1.2300  |
| 53.29                         | 21.8687  | 7.4243  | 2.5251   | 1.2799  |
| 53.29                         | 21.3891  | 7.5424  | 2.3172   | 1.2578  |
| 56.89                         | 20.0740  | 8.2663  | 2.0661   | 1.2403  |
| 56.89                         | 21.4449  | 7.4675  | 2.0100   | 1.2043  |
| 56.89                         | 21.8253  | 7.1957  | 2.2109   | 1.2270  |
| 56.89                         | 21.8676  | 7.9543  | 2.2503   | 1.2636  |
| 56.89                         | 22.2722  | 7.6252  | 2.1269   | 1.2677  |

**ANEXO 5: Resultados del experimento – Fase 3 [Elaboración Propia]**

| <b>Concentración<br/>(mol)</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Costo unitario (soles/kg)</b> |       |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------|
| 0.50                           | 40.00                       | 2.200                            | 2.300 |
| 1.00                           | 40.00                       | 2.450                            | 2.540 |
| 0.50                           | 60.00                       | 1.410                            | 1.410 |
| 1.00                           | 60.00                       | 1.770                            | 1.700 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.620                            | 1.630 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.590                            | 1.620 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.620                            | 1.640 |
| 0.40                           | 50.00                       | 2.250                            | 2.300 |
| 1.10                           | 50.00                       | 2.020                            | 2.050 |
| 0.75                           | 35.86                       | 3.300                            | 3.350 |
| 0.75                           | 64.14                       | 1.500                            | 1.520 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.620                            | 1.630 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.590                            | 1.620 |
| 0.75                           | 50.00                       | 1.640                            | 1.640 |

### ANEXO 6: Layout de la Planta de producción de Ichu

