



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Arquitectura, Ingeniería Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**

**Propuesta de un índice compuesto de sostenibilidad para un sistema de
valorización de residuos bajo el enfoque de economía circular en un caso de
estudio de sistema de valorización de viruta de cuero – Pieles del Sur
E.I.R.L.**

Tesis presentada por:

Supo Supo, Allison Lisset

ORCID:0009-0000-4235-0656

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Mgter. Arenazas Rodriguez, Armando Jacinto

ORCID: 0000-0002-0940-2204

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Noviembre del 2025

Dictamen: 001937-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 001937, presentado por:

2013100792 - SUPO SUPO ALLISON LISSET

Titulado:

**PROPUESTA DE UN ÍNDICE COMPUESTO DE SOSTENIBILIDAD PARA UN SISTEMA DE
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS BAJO EL ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR EN UN CASO DE
ESTUDIO DE SISTEMA DE VALORIZACIÓN DE VIRUTA DE CUERO PIELES DEL SUR E.I.R.L.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**43297964 - CAMPOS OLAZAVAL LIZBETH MARIANELLA
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**29519918 - BEJARANO MEZA MARIA ELIZABETH
DICTAMINADOR**



Propuesta de un índice compuesto de sostenibilidad para un sistema de valorización de residuos bajo el enfoque de economía circular en un caso de estudio de sistema de valorización de viruta de cuer

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

3

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

4

busquedas.elperuano.pe

Fuente de Internet

<1%

5

europa.eu

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to Universidad Católica San Pablo

Trabajo del estudiante

<1%

7

blog.pucp.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

DEDICATORIA

A Dios, por mostrarme su grandeza cada vez.

*A mi Papá Grande, quien me enseñó sobre determinaciones
fuertes en momentos adversos, del balance de la vida, por ser mi
mejor recuerdo y constante inspiración.*

*A mi papá, por su apoyo, acompañamiento incondicional y su
calma reconfortante.*

*A mi mamá, por ser mi hogar sin importar el tiempo ni la
distancia, mi ejemplo y recuerdo vivo de fortaleza.*

*A mi hermano, por ser consuelo, hombro y sonrisas en los
momentos más desafiantes.*

*A todos quienes me asesoraron, aconsejaron, me orientaron y
encendieron luces cuando el camino se volvía difuso.*

*A quienes se alegran por mí de corazón, gracias por sostenerme
incluso sin darse cuenta.*

RESUMEN

Este estudio propone un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) diseñado para cerrar la brecha de implementación técnica en la medición micro-operativa de sistemas de valorización residuos bajo el enfoque de economía circular, alineándose con la Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular (HRNEC). El caso de estudio se centra en el sistema de valorización de viruta de cuero en la empresa Pieles del Sur S.R.L., una MyPime que requiere métricas adaptadas al criterio de proporcionalidad vigente para mejorar su competitividad y acceso a finanzas verdes. El ICS integra los aspectos ambiental, económico y social de la sostenibilidad, bajo los principios rectores de la NTP-ISO 59004:2024, proporcionando una evaluación comprensiva del desempeño operativo y datos trazables que permiten a la industria alimentar indicadores macro-país como el Ratio de variación de la Productividad Material (VPM).

Los indicadores seleccionados se basaron en un marco conceptual de escala operacional y de madurez de sostenibilidad principiante-intermedia, enfocándose en la manufactura, valorización de residuos y principios de economía circular. Los indicadores fueron asociados en tres subíndices de sostenibilidad y finalmente agregados en un indicador integral de desempeño. Esto fue aplicado de modo que se ponderó cada indicador sobre el índice general de sostenibilidad usando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

El caso de estudio empleado para validar el ICS fue modelado haciendo uso del software SuperPro Designer de Intelligen para obtener la proyección a un año. Los resultados del caso de estudio revelaron un logro del 0.69 sobre 1 en términos de avance hacia objetivos sostenibles, con desempeño ambiental (0.45) como el área crítica de mejora debido a la intensidad energética del proceso, mientras que los otros pilares social(0.75) y económico (0.87) validan la viabilidad del modelo bajo un enfoque de sostenibilidad flexible.

Se concluye que el índice es una herramienta funcional y replicable para la toma de decisiones estratégicas, contribuyendo a mitigar el riesgo de pérdida del PBI nacional estimado por inacción frente al cambio climático.

Palabras clave: Índice compuesto de sostenibilidad, economía circular, valorización de residuos.

ABSTRACT

This study proposes a Composite Sustainability Index (CSI) designed to close the technical implementation gap in the micro-operational measurement of waste recovery systems under a circular economy approach, aligning with the National Circular Economy Roadmap (HRNEC). The case study focuses on the leather shavings recovery system at Pielles del Sur S.R.L., an MSME that requires metrics adapted to the current proportionality criterion to enhance its competitiveness and access to green finance. The CSI integrates the environmental, economic, and social aspects of sustainability, following the guiding principles of NTP-ISO 59004:2024, providing a comprehensive evaluation of operational performance and traceable data that allow the industry to feed into macro-country indicators such as the Material Productivity Variation Ratio (VPM).

The selected indicators were based on a conceptual framework at an operational scale and a beginner-intermediate sustainability maturity level, focusing on manufacturing, waste recovery, and circular economy principles. These indicators were associated into three sustainability sub-indices and finally aggregated into a comprehensive performance indicator. This was applied by weighting each indicator against the general sustainability index using the Analytic Hierarchy Process (AHP).

The case study used to validate the CSI was modeled using Intelligen's SuperPro Designer software to obtain a one-year projection. The results revealed an achievement of 0.69 out of 1 in terms of progress towards sustainable objectives, with environmental performance (0.45) identified as the critical area for improvement due to the process's energy intensity. Meanwhile, the other social (0.75) and economic (0.87) pillars validate the model's viability under a flexible sustainability approach. It is concluded that the index is a functional and replicable tool for strategic decision-making, contributing to mitigating the risk of national GDP loss estimated due to inaction against climate change.

Keywords: Composite sustainability index, circular economy, waste valorization.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I..... 4

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 5

1.1. Planteamiento del problema y su relevancia..... 5

1.2. Justificación de la investigación 6

1.3. Objetivos 8

1.3.1. Objetivo general..... 8

1.3.2. Objetivos específicos 9

CAPITULO II 10

2. FUNDAMENTO TEÓRICO..... 11

2.1. Estado del arte..... 11

2.2. Marco teórico 24

2.2.1. Los residuos sólidos industriales (RSI) 24

2.2.2. Manejo de residuos sólidos industriales 24

2.2.3. Valorización de residuos sólidos industriales 25

2.2.4. Economía circular 26

2.2.5. Industria del curtido 27

2.2.5.1. Flujo del proceso de curtido..... 27

2.2.5.2. Principales residuos del proceso de curtido 29

2.2.5.3. Viruta de cuero..... 31

2.2.6. Conceptualización del modelo propuesto 32

2.2.6.1.	Selección de indicadores	32
2.2.6.2.	Normalización de indicadores.....	33
2.2.6.3.	Ponderación de indicadores	34
2.2.6.4.	Agregación y formulación del índice.....	34
2.2.6.5.	Validación del índice	35
2.3.	Marco legal	37
CAPITULO III.....		41
3.	METODOLOGÍA.....	42
3.1.	Tipo y nivel de investigación.....	42
3.2.	Diseño de investigación	42
3.3.	Instrumentos.....	42
3.3.1.	Análisis morfológico general.....	42
3.3.2.	Guías de indicadores de sostenibilidad.....	42
3.3.3.	Motores de búsqueda académicos y bases de datos.....	43
3.3.4.	Microsoft Excel.....	44
3.3.5.	Software AHP	44
3.3.6.	SuperPro Designer	44
3.4.	Descripción de la investigación	45
3.4.1.	Diseño del conjunto de indicadores de sostenibilidad	45
3.4.1.1.	Desarrollo del marco conceptual	45
3.4.1.2.	Revisión bibliográfica.....	45
3.4.1.3.	Propuesta y selección de indicadores.....	46
3.4.1.4.	Desarrollo de atributos de indicadores.....	46
3.4.1.5.	Validación de indicadores.....	49

3.4.2.	Sistematización de un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) utilizando técnicas multicriterio (AHP).....	50
3.4.2.1.	Normalización.....	50
3.4.2.2.	Ponderación de indicadores por cada componente de Sostenibilidad	51
3.4.2.3.	Agregación de indicadores ponderados para los subíndices de sostenibilidad	54
3.4.2.4.	Cálculo del Índice Compuesto de Sostenibilidad	55
3.4.3.	Validación del índice de sostenibilidad propuesto mediante la aplicación en el caso de estudio de valorización de viruta de cuero.....	56
3.4.3.1.	Modelamiento matemático del proceso en SuperPro Designer	56
3.4.3.2.	Aplicación del índice compuesto con los resultados de la modelación	57
3.4.4.	Esquema metodológico	58
CAPÍTULO IV		59
4.	RESULTADOS	60
4.1.	Diseño del conjunto de indicadores de sostenibilidad enfocados en dimensiones económica, ambiental y social.	60
4.1.1.	Desarrollo del marco conceptual	60
4.1.2.	Revisión bibliográfica.....	61
4.1.3.	Propuesta y selección de indicadores.....	66
4.1.4.	Desarrollo de atributos de indicadores.....	69
4.1.5.	Validación de indicadores.....	81
4.2.	Sistematización de un índice compuesto de Sostenibilidad (ICS).....	89
4.2.1.	Normalización.....	89
4.2.2.	Ponderación de indicadores por cada componente de sostenibilidad	89
4.2.3.	Agregación de indicadores en subíndices de sostenibilidad.....	93

4.2.4.	Agregación de subíndices para el cálculo del índice compuesto de sostenibilidad	96
4.2.5.	Representación gráfica.....	97
4.3.	Validación del índice de sostenibilidad en el sistema de valorización	100
4.3.1.	Modelamiento	100
4.3.2.	Aplicación del índice de sostenibilidad	113
CAPITULO V.....		131
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	132
5.1.	Conclusiones	132
5.2.	Recomendaciones	133
CAPITULO VI.....		135
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Residuos del proceso de curtido, origen y clasificación</i>	30
Tabla 2	<i>Atributos de indicadores de sostenibilidad</i>	48
Tabla 3	<i>Checklist de validación de indicadores</i>	49
Tabla 4	<i>Escala de evaluación por pares de Saaty</i>	52
Tabla 5	<i>Ranking de indicadores críticos de sostenibilidad para la manufactura</i>	53
Tabla 6	<i>Fases de medición de circularidad</i>	60
Tabla 7	<i>Compilación de indicadores por pilares de sostenibilidad</i>	63
Tabla 8	<i>Propuesta de dimensión de indicadores</i>	67
Tabla 9	<i>Correlación de dimensiones seleccionadas y nombres de indicadores</i>	68
Tabla 10	<i>Atributos del indicador Logro de ganancias del sistema de manufactura</i>	70
Tabla 11	<i>Atributos del indicador Reducción del costo de disposición de residuos sólidos</i>	71
Tabla 12	<i>Atributos del indicador Reducción del costo de suministro energético</i>	72
Tabla 13	<i>Atributos del indicador Desviación del presupuesto de adquisición de materiales</i>	73
Tabla 14	<i>Atributos del indicador Eficiencia de consumo de materiales</i>	74
Tabla 15	<i>Atributos del indicador Eficiencia de consumo de agua</i>	75
Tabla 16	<i>Atributos del indicador Reducción de la intensidad energética</i>	76
Tabla 17	<i>Atributos del indicador Porcentaje del producto con origen circular</i>	77
Tabla 18	<i>Atributos del indicador Porcentaje de reducción de generación de RRSS</i>	78
Tabla 19	<i>Atributos del indicador Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado</i>	79
Tabla 20	<i>Atributos del indicador Porcentaje de accidentabilidad laboral</i>	80
Tabla 21	<i>Atributos del indicador Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación</i>	81
Tabla 22	<i>Resultados de validación de indicadores en checklist</i>	82
Tabla 23	<i>Correlación de los resultados de propuesta de indicadores y los ODS</i>	87

Tabla 24 Comparación de juicios AHP por par de criterios en tres versiones sucesivas de la matriz	91
Tabla 25 Equivalencias 0-1 de las ponderaciones de indicadores	92
Tabla 26 Modelo de sistematización del cálculo de subíndices	94
Tabla 27 Modelo de sistematización del cálculo del Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) mediante subíndices con ponderación equitativa (1/3) por dimensión.....	96
Tabla 28 Caracterización de elementos de materia prima ingresante al proceso.....	103
Tabla 29 Configuración de equipos y demanda eléctrica	105
Tabla 30 Tiempos de proceso proyectados y modelados	106
Tabla 31 Flujos de ingreso de materiales al proceso.....	107
Tabla 32 Costos operativos	107
Tabla 33 Resumen ejecutivo del reporte de materiales SuperPro Designer.....	111
Tabla 34 Resumen ejecutivo del reporte económico SuperPro Designer	112
Tabla 35 Cálculo de E1 - Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura	114
Tabla 36 Cálculo de E2 - Reducción del costo de disposición de RRSS.....	115
Tabla 37 Cálculo de E3 - Reducción del costo de suministro energético	115
Tabla 38 Cálculo de E4 - Cumplimiento del presupuesto de adquisición de materiales.....	116
Tabla 39 Cálculo de A1 - Eficiencia de consumo de materiales	117
Tabla 40 Cálculo de A2 - Eficiencia de consumo de agua.....	117
Tabla 41 Cálculo de A3 - Reducción de la intensidad energética	118
Tabla 42 Cálculo de A4 - Porcentaje de producto con origen circular.....	119
Tabla 43 Cálculo de A5 - Porcentaje de reducción de generación de RRSS.....	119
Tabla 44 Cálculo de S1 - Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado.....	120
Tabla 45 Cálculo de S2 - Porcentaje de accidentabilidad laboral	120
Tabla 46 Cálculo de S3 - Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación.....	121

Tabla 47 Cálculo del resultado de subíndices para el caso de estudio.....	122
Tabla 48 Cálculo del resultado del índice compuesto de sostenibilidad para el caso de estudio.....	123
Tabla 49 Análisis comparativo de aplicabilidad de Softwares de modelamiento.....	126
Tabla 50 Resumen de indicadores y atributos.....	153
Tabla 51 Validación del indicador E1.....	155
Tabla 52 Validación del indicador E2.....	156
Tabla 53 Validación del indicador E3	157
Tabla 54 Validación del indicador E4	159
Tabla 55 Validación del indicador A1.....	160
Tabla 56 Validación del indicador A2.....	162
Tabla 57 Validación del indicador A3.....	163
Tabla 58 Validación del indicador A4.....	164
Tabla 59 Validación del indicador A5.....	165
Tabla 60 Validación del indicador S1	167
Tabla 61 Validación del indicador S2.....	168
Tabla 62 Validación del indicador S3.....	169

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	55
<i>Figura 2</i>	58
<i>Figura 3</i>	98
<i>Figura 4</i>	102
<i>Figura 5</i>	109
<i>Figura 6</i>	124
<i>Figura 7</i>	129

INDICE DE ECUACIONES

(1).....	51
(2).....	54
(3).....	70
(4).....	70
(5).....	71
(6).....	72
(7).....	72
(8).....	73
(9).....	73
(10).....	74
(11).....	75
(12).....	75
(13).....	76
(14).....	76
(15).....	76
(16).....	77
(17).....	78
(18).....	79
(19).....	79
(20).....	80
(21).....	81

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Resumen de atributos de indicadores.....	153
ANEXO 2 : Evaluación de indicadores por checklist.....	155
ANEXO 3. Módulos del software AHP.....	171
ANEXO 4 : Ficha técnica resina Vinnapas.....	177
ANEXO 5 : Reporte de corriente de materiales.....	186
ANEXO 6 : Reporte de evaluación económica	194
ANEXO 7 : Reporte de impacto ambiental	199
ANEXO 8 : Cálculo del ICS del caso de estudio en Microsoft Excel.....	211

INTRODUCCIÓN

Con el avance tecnológico y la consolidación de compromisos globales, el desarrollo de procesos productivos con un enfoque sostenible y bajo los principios de la economía circular (EC) ha captado cada vez más la atención por parte de los centros productivos, la academia, instituciones y gobiernos. Este interés ha sido impulsado por el aumento de la rigurosidad de las regulaciones ambientales y por la imperiosa necesidad de prevenir impactos negativos en el ambiente, la sociedad y la economía. En ese contexto, la evaluación y seguimiento del nivel de sostenibilidad que posee cada industria se ha vuelto parte importante de la anticipación de tendencias y apoyo de la toma de decisiones estratégicas para la prevención del impacto negativo ambiental, social y económico (Singh et al., 2009).

Para realizar dicha evaluación, se han desarrollado diferentes métodos basados en numerosos tipos de indicadores, índices compuestos, marcos de referencia y modelos multicriterio aplicable a varias escalas (empresarial, sectorial y nacional) e incluso adaptados a sectores industriales-comerciales en específico. En América Latina y Caribe, donde predominan los sectores extractivos y de manufactura, el enfoque circular cobra especial importancia para la reducción de la demanda de recursos naturales, así como de los servicios asociados al manejo de residuos, fomentando la remanufactura y el aprovechamiento de residuos, así como la generación de nuevos puestos de empleo en la región (Samaniego et al., 2022).

En el caso del Perú, el enfoque de economía circular ha evolucionado de manera importante en los últimos años. Desde la publicación de la primera Hoja de Ruta para la Industria en 2019, de carácter sectorial, se ha avanzado hacia una visión más integral mediante la adopción de la Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular al 2030, que articula y alinea múltiples hojas de ruta sectoriales (industria manufacturera, comercio interno, pesca y acuicultura, agricultura, agua y saneamiento, entre otros). Esta hoja de ruta establece metas

estratégicas e indicadores macro, y promueve la implementación coherente de políticas y herramientas de gestión para evaluar el progreso circular a nivel país. Sin embargo, persiste una brecha técnica significativa en la disponibilidad de herramientas cuantitativas a nivel micro-operativo que permitan a las empresas generar datos trazables. Esta carencia dificulta que el sector industrial alimente con precisión los indicadores de impacto nacional, tales como el Ratio de Variación de la Productividad Material (VPM), meta central del Estado para el 2030 (MINAM, 2025).

Se sabe que los beneficios del uso de indicadores de sostenibilidad pueden ser maximizados mediante el diseño de índices compuestos, los cuales agregan múltiples variables, facilitan la interpretación, permiten el establecimiento de líneas base, monitoreo de avances y favorecen la formulación de políticas (Zhou et al., 2012; Nardo et al., 2008). Además, el análisis detallado de los resultados individuales de los indicadores brinda información clave para la identificación de debilidades en los procesos, la propuesta de optimización de eficiencia, reducción de emisiones, fomentar la recirculación de materiales y promover un flujo eficiente de materiales, tanto a nivel micro como macro.

El presente trabajo busca cerrar la brecha al proponer un Índice Compuesto de Sostenibilidad bajo el enfoque de Economía Circular, que permita evaluar cuantitativamente el desempeño de un sistema de valorización de residuos. La propuesta se valida mediante su aplicación al caso de estudio “Valorización de viruta de cuero de la empresa Pieles del Sur S.R.L.”, una MiPyme representativa del tejido empresarial que requiere métricas alineadas al criterio de proporcionalidad para mejorar su competitividad y facilitar su acceso a mecanismos de finanzas verdes.

La investigación se desarrolla a través de las siguientes etapas: el diseño de doce indicadores de sostenibilidad validados bajo criterios técnicos y de aplicabilidad, la sistematización del índice mediante la técnica multicriterio AHP, garantizando la objetividad en la ponderación de

las dimensiones, y la validación final mediante el modelado industrial en el software SuperPro Designer. Finalmente se presentan los resultados que actúan como un espejo técnico del desempeño operativo, permitiendo discutir sus implicancias y proponer recomendaciones estratégicas para la toma de decisiones informada en la ruta hacia la circularidad al 2030.

CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema y su relevancia

En el Perú, los sistemas de valorización de residuos sólidos enfrentan una limitación técnica estructural: la ausencia de herramientas cuantitativas integrales que permitan medir el desempeño de circularidad en el nivel micro-operativo. Si bien el país ha dado un salto importante con la aprobación de la Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular (HRNEC) al 2030 (D.S. N° 003-2025-MINAM), persiste una brecha crítica entre las metas macroeconómicas y la capacidad de las organizaciones para generar datos trazables que alimenten dichos indicadores (MINAM, 2025)

A nivel local, esta brecha se ve agravada por desafíos estructurales: la gestión desigual de residuos sólidos por parte de los gobiernos municipales, las limitaciones presupuestales para inversión en infraestructura adecuada y la débil articulación multisectorial entre el Estado, el sector privado, la academia y la sociedad civil (Díaz et al., 2021; Fischer, 2024). Como consecuencia, se prolongan problemas estructurales como la baja productividad, la ineficiencia en el uso de recursos, la escasa innovación tecnológica (Mariátegui, 2024). La falta de métricas homologables dificulta que las más de 2.3 millones de empresas formales en el país logren atraer financiamientos verdes o participar en esquemas de inversión basados en desempeño. La relevancia de este problema es crítica: la inacción frente al cambio climático y la persistencia de modelos lineales podrían reducir el PBI nacional entre un 11% y 20% hacia el año 2025 (Perú Sostenible, 2025).

Escalado a nivel de la región de América Latina y el Caribe, la situación tampoco resulta favorable. Esta falta de métricas homologables, unida a la heterogeneidad de datos entre regiones, dificulta la formulación de políticas públicas eficaces y socava la imagen

internacional del Perú como un país comprometido con los objetivos globales de sostenibilidad (Mariátegui, 2024).

Frente a este escenario, el desarrollo de un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) no es solo una necesidad técnica, sino un imperativo estratégico para asegurar que la valorización de residuos contribuya efectivamente a la meta nacional de elevar la Productividad Material (VPM), orientar la formulación de políticas públicas, fortalecer capacidades locales y posicionar al Perú dentro de los estándares internacionales de sostenibilidad.

1.2. Justificación de la investigación

La propuesta de un índice compuesto para evaluar la valorización de residuos sólidos en el país no solo es válida desde un punto de vista teórico, se justifica por su capacidad de transformar datos operativos en decisiones estratégicas, alineándose con la visión país al 2030. Mediante la consideración integral de las dimensiones ambiental, social y económica, este estudio se concibe como una herramienta para el logro de los ODS en los siguientes ámbitos:

Ambiental: La propuesta de un índice compuesto para la valorización de procedimientos de valorización de residuos sólidos se ubica dentro de un enfoque de economía circular, permite cuantificar la eficiencia en la recirculación de materiales y el uso de recursos hídricos y energéticos, principios hoy estandarizados por la NTP-ISO 59004:2024 (INACAL, 2024). Esto contribuye directamente a la meta de aumentar la valorización de residuos, que en años previos alcanzaba el 1.8% a nivel nacional. Así mismo, la metodología del índice compuesto facilitará la evaluación cuantitativa y cualitativa del impacto ambiental derivado de las prácticas de valorización, promoviendo la identificación de prácticas sostenibles que disminuyan la presión sobre los recursos naturales y la infraestructura de residuos sólidos. Investigaciones anteriores han evidenciado que una implementación apropiada de sistemas de

valorización puede favorecer una disminución considerable del impacto ambiental negativo (Geissdoerfer et al., 2018).

Social: El índice integra indicadores de productividad y seguridad laboral, fundamentales para formalizar el empleo en el sector residuos y reducir riesgos sanitarios. La adopción de sistemas de valorización tiene el potencial de generar nuevas oportunidades especialmente en sectores de bajos recursos, la minimización de residuos y la optimización del entorno favorecen la calidad de vida de las comunidades al reducir los riesgos sanitarios asociados a la mala gestión de residuos sólidos (UNEP, 2020).

Económica: La toma de decisiones fundamentada en una metodología cuantitativa puede mejorar la competitividad de las empresas al reducir la dependencia de recursos externos (Lieder & Rashid, 2016). La investigación responde al objetivo nacional de generar un impacto positivo neto en el PBI, estimado en un incremento del 2.41% al 2030 a través de la transición circular (MINAM, 2025).

Tecnológica: El desarrollo e implementación de tecnología adecuada para el contexto peruano es clave para el logro de la economía circular. La innovación en procesos promueve la reducción de consumo de recursos y por consiguiente la transferencia de conocimiento, lo que mejora las capacidades locales de los diferentes actores involucrados (Sutherland et al., 2019).

Política e institucional: La colaboración entre los gobiernos locales, la empresa privada, la academia y demás stakeholders es crucial para garantizar que las políticas de gestión de residuos sean integradas y efectivas (Clement et al., 2019). Por lo que el desarrollo de un índice compuesto, con enfoque en sostenibilidad flexible aplicado en este diseño metodológico respeta el Criterio de Proporcionalidad para MiPymes, garantizando que la herramienta sea

aplicable y no una barrera burocrática para el 99.5% del tejido empresarial peruano (Corporación Interamericana de Inversiones, 2024).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer un índice compuesto de sostenibilidad para un sistema de valorización de residuos bajo el enfoque de economía circular en un caso de estudio de viruta de cuero – Pieles del Sur E.I.R.L.

1.3.2. Objetivos específicos

Diseñar un conjunto de indicadores de sostenibilidad con enfoque de economía circular.

Sistematizar un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) utilizando técnicas multicriterio (AHP).

Validar el índice propuesto mediante la aplicación al sistema modelado de valorización de viruta de cuero en SuperPro Designer.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

2.1.1. Fase de cimentación: Del reporte cualitativo al cuantitativo

El concepto de evaluación de sostenibilidad viene siendo aplicado desde hace varios años. Por ejemplo, en 1997 el Programa Ambiental de las Naciones Unidas en conjunto con la ONG estadounidense CERES (Coalition for Environmentally Responsible Economics) desarrollaron la metodología GRI (Global Reporting Initiative), con la finalidad de “mejorar la calidad, rigor y utilidad de los reportes de sostenibilidad”, la cual ha sido considerada como una herramienta clave para la elaboración de reportes de sostenibilidad. En ella se propuso una guía de aplicación que contiene más de 100 indicadores de evaluación de la sostenibilidad de las empresas (GRI, 2002).

Posteriormente, como consecuencia del incremento de la tendencia de reportar la sostenibilidad corporativa Hopkinson y Whitaker evidenciaron en 1998 la dificultad para comparar y diferenciar unos de otros a través del benchmarking. Tras analizar múltiples casos prácticos, se pudieron agrupar los indicadores más utilizados en las siguientes categorías: sistemas y políticas de gestión, inventarios de ingresos y salidas, finanzas, relaciones con las partes interesadas y asociaciones y el desarrollo sostenible por medio de la cooperación tecnológica, ello con el fin de poder facilitar el uso de la información de los reportes para establecer tendencias y ofrecer información valiosa para la toma de decisiones a diferentes escalas (Hopkinson & Whitaker, 1998).

Es así como, dejando de lado el enfoque en reportes, se empezaron a desarrollar guías, mecanismos y metodologías para la evaluación de sostenibilidad de manera que faciliten la comparación, especialmente para reducir la brecha entre el componente social y los demás componentes de sostenibilidad. Esto se debe a que el aspecto social era comúnmente reportado

en forma textual describiendo iniciativas de aporte, donaciones, actividades de concientización, etc. Ejemplo de ello es la herramienta del Balance del Bien Común (BBC) empleada por la organización Economía del Bien Común (EBC), que evalúa cuantitativamente criterios sociales y éticos a través de una matriz de criterios modificables de acuerdo con el tamaño de la organización con una puntuación de 1 al 10 (EBC, 2020). Similar a esta, es la herramienta Social Value UK: SROI (Social Return on Investment), que aplica Siete Principios para evaluar aspectos de sostenibilidad para influenciar la toma de decisiones. Incluye criterios de enfoque social predominantemente cuantitativos (Social Value UK, 2020).

También surgieron propuestas para abarcar otros aspectos todos los pilares de sostenibilidad. Por ejemplo, el Instituto alemán de Wuppertal para el Clima desarrolló un set de indicadores basándose en las cuatro dimensiones de la sostenibilidad sugeridos por la Comisión de Desarrollo Sostenible - CSD de la ONU: social, institucional, ambiental y económico. Estos indicadores están interconectados entre ellos y son aplicables tanto a escala macro (nacional) como a escala micro (organizaciones), cambiando los aspectos relevantes del desarrollo para la evaluación de las actividades organizacionales de acuerdo con el alcance, tales como relaciones industriales, condiciones laborales, educación, entre otros (Spangenberg & Bonniot, 1998).

2.1.2. Fase de especialización: Métricas por sectores industriales

Igualmente, en el año 2002, el Instituto de Ingenieros Químicos (IChemE) publicó un set de indicadores para medir la sostenibilidad de las operaciones dentro la industria química (Azapagic & Perdan, 2000). Y, por su parte McBride et al. (2011) desarrollaron un conjunto de 19 indicadores para evaluar sistemas de bioenergía, estos indicadores representan el impacto de los sistemas de bioenergía en la sostenibilidad ambiental, con respecto a la calidad del suelo, agua y su disponibilidad, la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI), biodiversidad, calidad de aire y productividad. Este fue uno de los pocos sets de indicadores

desarrollados para procesos industriales de valorización de residuos orgánicos. Constituyendo un caso notorio de estudio por analizar el reciclaje como herramienta para el logro de economía circular.

En el ámbito de la manufactura, en el trabajo de Tan et al. (2015) se propuso un set de indicadores de sostenibilidad para las empresas pequeñas y medianas de Singapur, seleccionando indicadores de acuerdo con criterios como aplicabilidad, relevancia y que sean de fácil entendimiento. El estudio buscaba obtener un conjunto de indicadores solamente, sin pasar por la formulación de un índice, por lo que culminó definiendo cada indicador con su fórmula, unidad de medida y objetivo.

2.1.3. Fase de integración: El surgimiento de los índices compuestos

Es aquí donde a partir de una de las principales limitaciones, la dificultad para la integración de resultados, la comparación entre pares y la toma de decisiones, aparecen los índices compuestos utilizando metodología estadística o multicriterio para ofrecer resultados que se comprendan mejor y sean comparables en tiempo, casos, escala, etc. Por ejemplo:

- Vander Werf (1999) y Adriaanse (1993) desarrollaron indicadores de desempeño de políticas ambientales para medir el progreso hacia el logro de los objetivos establecidos por la política ambiental en Holanda, utilizaron el método estadístico del índice aditivo ponderado.
- El índice “Brújula de Sostenibilidad” desarrollado para Orlando, Florida por Atkisson Inc. utilizó el método estadístico de promedio simple para indicadores agrupados en cuatro categorías: naturaleza (N), economía (E), sociedad (S) y bienestar (W) correspondientes a los cuatro puntos en una brújula. Los indicadores se escalaron en una escala de desempeño de 0 a 100. Las escalas se

establecieron mediante juicios normativos. Cada indicador tenía la misma ponderación (Atkinson et al., 1997).

- El Índice Ambiental Compuesto Coreano (KCEI) mostró la tendencia de problemas medioambientales en el país asiático mediante el desarrollo de subíndices sectoriales haciendo uso de indicadores ambientales y posteriormente agregando los subíndices en un índice compuesto por medio de la metodología de comparación por pares Analytical Hierarchy Process (AHP); para el cálculo de ponderaciones basado en juicio de expertos (Kang, 2004).
- Singh et al. (2007), propusieron un set de indicadores para la evaluación de la sostenibilidad en la industria del acero, elaboraron un índice compuesto donde por medio de la agregación estadística AHP (Saaty, 1980) obtuvieron el Índice Compuesto de Desempeño Sostenible, CSPI por sus siglas en inglés, el cual fue evaluado en un caso de estudio. El proceso de construcción del índice comprendió cuatro jerarquías, la de cuarto grado, una escala de clasificación de Liberatore como sobresaliente, bueno, promedio, justo y pobre, con valores de 5 para el sobresaliente y disminuyendo hasta 1 para pobre, el valor es multiplicado por el peso de cada indicador, la tercera jerarquía comprendida por los indicadores seleccionados, la segunda comprendida por los subíndices de agrupación por componentes de sostenibilidad, y la primera representada por el índice compuesto. A través del uso de subíndices, se pudo evaluar el desempeño de cada componente de sostenibilidad y el global, el resultado para el caso de estudio demostró un desempeño sostenible promedio, de mejores resultados en el aspecto económico.

- Latif et al. (2017) desarrollaron un índice de sostenibilidad para la industria de manufactura que agregó en un solo modelo a los subíndices de eficiencia energética, gestión de residuos, seguridad y salud de los trabajadores como los pilares básicos de la sostenibilidad de las empresas. El modelo fue analizado y validado por medio de su aplicación en dos casos de estudio, a partir de los cuales se concluyó que para lograr la manufactura sostenible es importante tener un índice de sostenibilidad representativo con el cual las organizaciones podrán compararse entre ellas y medir la mejora interna de su desempeño.
- En el año 2018, Papilo et al. enfocaron un índice de sostenibilidad para la evaluación de los sistemas de bioenergía en base al aceite de palma. Con ese fin, se desarrollaron un conjunto de indicadores acorde al enfoque del estudio a partir de revisión bibliográfica de iniciativas similares en otros países, normalizados con la técnica de Rapid Appraisal, procedido del modelamiento matemático para la agregación de indicadores en los subíndices económico, ambiental, social. Se validó el modelo con anterioridad por medio de la Simulación de Monte Carlo, que asigna valores aleatorios en diferentes rangos para predecir los resultados del índice, de modo que permite evaluar el rango de error estadísticamente (Papilo et al., 2018).
- También para el sector energético, en el estudio de Shah et al. (2019), se elaboró el índice compuesto ESESI para evaluar la sostenibilidad ambiental y la seguridad energética de los países de Asia del sur. Para la selección de los indicadores fue necesaria la revisión bibliográfica y caracterización de la industria en todos los países a ser evaluados, así como en análisis de riesgos ambientales en las regiones estudiadas. Los indicadores fueron ponderados por medio de la metodología WP (weighted product), producto ponderado, para

luego ser agregados en subíndices a través del análisis envolvente de datos (MDEA), que constituye parte de los métodos estadísticos de análisis multicriterio. Ya que el modelo fue elaborado con toda la data pre recolectada y existente, la validación del modelo fue hecha estadísticamente aplicando un análisis de sensibilidad.

Como se denota en los estudios anteriores, la determinación de la metodología de ponderación y agregación cumple un rol contundente en la obtención de resultados, por lo que Gan, et al. (2017) representaron de manera sintetizada las metodologías disponibles y las consideraciones a tomar para su elección de acuerdo con los siguientes criterios:

- Definición del propósito del índice compuesto: Los objetivos principales son (a)evaluar el estado de desarrollo con relación a objetivos, (b)comparación con periodos de tiempo, ubicación o situaciones y (c)anticipar las condiciones futuras o tendencias.
- Determinación de la escala de investigación:
 - Para la escala espacial basada en un contexto político, se proponen tanto la metodología de ponderación basada en estadística como la metodología basada en la opinión de expertos.
 - Para la escala temporal las metodologías de ponderación basadas en estadística son recomendadas en periodos cortos de evaluación, mientras que, para escalas largas de tiempo, como las políticas que establecen logros ideales a largo plazo, no se garantiza la totalidad de disponibilidad de información por lo que se recomiendan las metodologías del tipo participativas o de ponderación equitativa. Ya que los principios de economía circular y los objetivos son definidos, se puede denotar la

importancia de cada componente de sostenibilidad y sus factores en la necesidad de logro de objetivos.

- Decisión del tipo de sostenibilidad a evaluar: Estricta o flexible
 - El enfoque de “sostenibilidad flexible” indica que los elementos de la sostenibilidad no se encuentran en estado crítico, por lo que sus indicadores pueden compensarse entre sí para lograr un valor agregado representativo.
 - El enfoque de “sostenibilidad estricta” establece que las dimensiones social y económica están condicionadas entre sí y encajadas dentro de la dimensión ambiental, lo cual denota una mayor complejidad de relaciones y la poca posibilidad de compensación entre ellas.

Es evidente que, para los diferentes casos de estudio, el enfoque que se ha tomado respecto a la sostenibilidad es distinto, por la escala de aplicación, sean continentes, países, sectores industriales u organizaciones, las escalas temporales, por años o décadas; la fuente de información tomada y el tipo de sostenibilidad a ser evaluada. De modo que, con el paso del tiempo, los índices son actualizados, mejorados y tomados como referencia para su aplicación en distintos ámbitos.

2.1.4. Fase sistémica: El paradigma de la Economía Circular

La sostenibilidad, sus retos y paradigmas dieron como resultado el nacimiento de numerosas escuelas de pensamiento quienes a su vez precedieron el desarrollo del concepto de economía circular, tales como C2C o Cradle to Cradle de William McDonough y Braungart, la filosofía de la biomimética de Benyus, la ecología industrial presentada por Lifset y Graedel, el capitalismo natural de Mory, Lovins y Hawken, la economía azul o blue economy por Gunter, por lo que puede decirse que su enfoque es integral (Ellen Mac Arthur Foundation,

2017). La Economía circular es una estrategia que potencia las oportunidades de las empresas y negocios por medio de procesos circulares de producción en lugar de los tradicionales lineares; es regenerador y restaurador desde el diseño y busca mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor posibles en todo momento (Sustainability Guide, 2018).

Con la creación de la Fundación Ellen MacArthur en 2010, la economía circular tomó fuerza globalmente, con el objetivo acelerar la transición a la circularidad, trabajando con gobiernos, empresas y la academia en todos los continentes a través de publicaciones, marcos de trabajo, coaliciones, investigación y participación en mesas de trabajo (Ellen Mac Arthur Foundation, 2017).

Con ello, la EC pasó de ser solo un concepto para constituir un conjunto de elementos correlacionados bajo un enfoque sistémico de manera que extienda el ciclo de vida de los materiales, diseñe el flujo de salida de residuos, incremente la eficiencia de recursos y logre un mejor balance entre el crecimiento económico, protección ambiental y el bienestar social. Dada esta naturaleza es posible asociar las prácticas de EC con los Objetivos de Desarrollo Sostenible dentro de la agenda de las Naciones Unidas al 2030 (Netherlands Enterprise Agency, 2020; Rodriguez-Anton et al., 2019; Schroeder et al., 2019).

Para el logro del funcionamiento de la Economía Circular como sistema se requiere una transición que depende de marcos de trabajo enfocados a distintos niveles acorde con los objetivos establecidos en variadas escalas de tiempo, guías de circularidad sectoriales, políticas públicas nacionales y regionales entre otros factores (Franco et al., 2021). Además de reconocer dicha necesidad como reto para la transición hacia la EC, también tiene especial importancia el cómo se deben aplicar y combinar los enfoques teóricos y las herramientas disponibles para proveer de metodologías consistentes con el fin de apoyar la toma de decisiones basadas en evidencia con implicaciones para todos los niveles de la EC. Dichas metodologías consisten en

indicadores que han sido agrupados en tres niveles por numerosos autores e investigadores, siendo el nivel micro aquel que compromete a los productos, compañías y consumidores, meso al desarrollo de redes eco-industriales de trabajo con beneficios regionales y finalmente macro, referido al desarrollo económico circular a nivel global, nacional, regional o local (Franco et al., 2021).

Herramientas como Circulator, constituyen marcos conceptuales basados en arquetipos de EC compatibles con niveles micro y meso:

(a) Enfoque de relación con el cliente, para compañías que ofrecen estrategias de negocio como sistemas de producto-servicio o producción bajo demanda lo que permite aplicar estrategias sostenibles de manejo de materiales dentro de su propia compañía. Compatible con el nivel micro de la EC. (b) Enfoque en el producto o proceso en sí mismo, para la mejora de la circularidad de sus productos o de los procesos de manufactura dirigidos específicamente hacia el manejo de materiales, para compañías a las que les es más complicado o menos atractivo colaborar con su red de valor. Compatible con el nivel micro de la EC. (c) Enfoque en la relación con la red de valor, para lograr la circularidad de un producto sin tener que controlar de todas las partes de su ciclo de vida, la colaboración entre organizaciones de manera ascendente y descendente dentro del proceso de cadena de valor y/o con los clientes y otras partes interesadas como factor de éxito. Compatible con el nivel meso de la EC. (d) Enfoque en identidad sostenible, agrupa a las organizaciones que no hacen énfasis en ninguna de las otras categorías, pero representan un negocio circular como parte de su identidad corporativa. Compatible con el nivel meso de la EC.

El proyecto europeo Circulator busca brindar soporte a los emprendedores para la selección estratégica de herramientas y modelos de trabajo con el fin de hacer de su propuesta de valor una opción sostenible (Circulator, 2020), de ahí el que se haya desarrollado dentro de los niveles micro y meso de la EC.

Así mismo, Parchomenko et al. (2019) en donde, tras el análisis de 63 casos de estudio en la materia, identificaron los elementos estudiados más relevantes de la economía circular en el nivel micro y meso: (a) Disposición de residuos, (b) Materiales, partes y productos primarios y secundarios: uso primario versus uso secundario, (c) Eficiencia del proceso o productividad de la materia prima, (d) Eficiencia del reciclaje, (e) Energía, (f) Potencial de re-manufactura, (g) Dimensión espacial-territorial, (h) Destino de flujo del proceso, (i) Disponibilidad de insumos, (j) Adiciones de procesos, (k) Complejidad de la re-manufactura, (l) Retención de la materia prima, (m) Cambio de valor, adición de valor agregado, (n) Modelamiento del ciclo de materiales, (o) Redes de recursos, simbiosis industrial, (p) Estabilidad del sistema, (q) Mezcla de materiales, (r) Riesgo de suministro y escasez de recursos, (s) Tiempo de vida del producto, (t) Toxicidad y ciclos de materia limpia.

Sin embargo, Saidani et al. (2019) denotan la necesidad de adopción de enfoques metodológicos apropiados para monitorear y evaluar la implementación de estrategias de EC en el contexto organizacional de modo que tengan asociación directa con la sostenibilidad, pues al 2019 los indicadores de nivel micro utilizados aún generaban malentendidos y contradicciones, catalogando a dichas metodologías dentro de un estado embrionario.

En respuesta, Franco y colaboradores propusieron en 2021 un marco de trabajo de seis fases para monitorear y evaluar el desempeño de las organizaciones desde una perspectiva de transición hacia la EC: Definición de una matriz morfológica del problema, definir y ponderar los criterios para la selección de indicadores de circularidad asociados con las estrategias R (Potting et al., 2018) por método AHP, selección de indicadores, cálculo de indicadores compuestos, cálculo de índice de desempeño circular y el análisis final del desempeño circular de una organización desde la perspectiva de transición a EC. Llegaron a la conclusión de que en un nivel micro, los escenarios futuros son múltiples pero pocos llevarán hacia niveles de alto desempeño dentro de la cadena de valor, dado el contexto, muchas organizaciones se

pueden beneficiar del uso de su metodología. Sugieren que la investigación consecutiva incluya un análisis a mayor profundidad de los scores evaluados dentro de su trabajo, debido a la falta de otros modelos con el mismo enfoque para la comparación

Por su parte, Hatzfeld et al. (2022) proponen una estrategia denominada "Funcionalidad durante el Tiempo de Uso" (FOUT) con el fin de evaluar los obstáculos de los indicadores de circularidad y aplican el Enfoque de Nexo (Hettiarachchi & Arda-kanian, 2016) para resaltar la importancia de combinar los indicadores de circularidad con la evaluación de sostenibilidad reconociendo conexiones, interacciones y equilibrios para analizar los efectos ambientales, económicos y sociales. La metodología FOUT anexó las perspectivas de EC con la del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar la capacidad de un sistema que no genere residuos que no recirculen dentro del ciclo y los impactos ambientales asociados con el ciclo de vida completo de un producto o proceso. Destacaron la necesidad de realizar más estudios de caso para futuras investigaciones.

Internacionalmente, en América Latina demuestra un estado aún inicial de trabajo con una tasa de circularidad menor al 1% frente al 7.2% del valor mundial (Circle Economy, 2023). Con base en la definición de “circular” por la NTP-ISO 59004:2024, se puede calificar a una iniciativa, territorio, organización o similar como circular si cumple con todos los principios rectores de la EC: pensamiento sistémico, creación de valor, valor compartido, disponibilidad de recursos, trazabilidad de recursos, resiliencia de ecosistemas y economía (INACAL, 2024). En el Perú existen las Sociedades de Beneficio e Interés Colectivo (Sociedad BIC), los eco negocios y los bio negocios; los cuales están ligados al concepto de “Modelo de Negocio Circular” (MNC) por cumplir con ciertas características de un MNC, mas no son equivalentes por no estar alineados con todos los principios rectores de la EC (MINAM, 2025).

Tal es el caso de numerosos modelos de valorización de residuos sólidos industriales que se diversificaron e incrementaron en estos años recientes, algunos con apoyo de incentivos estatales, otros con centros de investigación y algunos de iniciativa privada.

Especialmente al 2019, se vieron avances en la aplicación de principios de economía circular en la valorización de residuos industriales en el sector pesquero, dentro de los cuales podemos destacar:

- APRO Compost, elaboración de compost, iniciativa de APROPISCO: Uno de los ejemplos de la economía circular en la industria pesquera es la reutilización de los residuos de origen hidrobiológico de la actividad como fertilizantes de productos agrícolas (Salazar Nishi, 2019).
- Fabricación de ladrillos para pavimentos a base de valva de concha de abanico triturada y agregados, recibidas de la actividad de procesamiento primario de conchas y se le adiciona cemento antisalitre para alcanzar las condiciones establecidas en las especificaciones técnicas para materiales de construcción. Estos ladrillos tienen un precio accesible comparados con otros del mercado, reduciendo la cantidad de residuos de concha abanico dispuestos en botaderos de Sechura (Caycho, 2019).
- Producción de biomateriales a partir de residuos de productos pesqueros, la fabricación de cuero de pescado, en el Instituto Tecnológico de la Producción, tomando el ejemplo de Kenia e Islandia con Victorian Foods y Atlantic Leather respectivamente (Peñalver, 2019).

Posteriormente se lograron identificar más casos similares al 2025, por ejemplo, en el sector industrial, desde empresas grandes como Textil El Amazonas hasta empresas de menor tamaño como Química Verde y Qolores, que apuestan por el reciclaje de residuos y

reutilización de agua en sus procesos productivos. En el rubro calzados, Leather fabrica productos a partir del bio cuero reciclable y reparable. Caxacori profuce calzado utilizando caucho silvestre amazónico. En el sector empaques para alimentos, Tetrapack y Pamolsa vienen mejorando su nivel de circularidad de envases mediante colaboraciones para fortalecer la infraestructura de reciclaje de los envases de cartón y envases de plástico; empresas como Oben group emplean materia prima compostable y degradable.

En el sector telecomunicaciones, Claro ha integrado un sistema de logística inversa para la recolección y reutilización de equipos electrónicos; por su lado, BOB Economía Circular, ha creado un mercado virtual de subastas industriales para promover el uso de activos inmovilizados (Silva & Pariapaza, 2025).

Adicionalmente a los casos de innovación mencionados, se sabe que en el Perú el reciclaje de materiales como plástico, papel, cartón y vidrio se desarrolla a través de diversas empresas y constituye la actividad principal de múltiples modelos de negocio. Sin embargo, no existe un compendio unificado y socializado por entidades como el Ministerio de la Producción (PRODUCE), el Ministerio del Ambiente (MINAM) o la Superintendencia Nacional de Administración Tributaria (SUNAT), lo que limita la posibilidad de contar con cifras oficiales consolidadas sobre el número de empresas, su participación en la valorización de residuos y el impacto real de sus operaciones. Esta falta de información dificulta, además, la evaluación del aporte del reciclaje al ciclo de vida de los materiales y al cumplimiento de los objetivos trazados en las Hojas de Ruta hacia una Economía Circular (MINAM, 2019; PRODUCE, 2021).

Respecto a la academia, en el Repositorio Nacional de Trabajos de Investigación RENATI, tras la búsqueda de la palabra clave Economía Circular para publicaciones entre el 2023-2024 se evidenció una creciente tendencia en la incorporación del término dentro de los títulos y objetivos de los trabajos. En muchos de los casos se denota la dificultad de diferenciación entre EC y sus estrategias de reciclaje o recirculación de materiales

considerándolos sinónimos. Se ha identificado la intención de medir el impacto de las estrategias de reciclaje dentro de industrias como el calzado, agricultura, construcción y para la gestión de residuos sólidos siendo la técnica más utilizada la encuesta y/o entrevista. Estos estudios confirmaron la falta de información sobre la implementación de EC como un reto, la relevancia de la EC en la industria y la percepción de alta importancia para los encuestados (Espinoza, 2023; Garcia, 2023; Gularte, 2023; López et al., 2023; Santos & Montenegro, 2023).

Sin embargo, a la fecha de redacción del presente trabajo, adicionalmente a la entrevista solo se ha utilizado la revisión bibliográfica como otra de las metodologías de investigación sobre el estado de la EC en la región Latinoamérica y en el Perú, sustentando la necesidad de evaluación matemática y sistémica para la toma de decisiones.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Los residuos sólidos industriales (RSI)

Son materiales generados por actividades industriales que pueden presentarse en estado sólido, semisólido, líquido o gas contenido. Se generan principalmente por residuos finales de procesos industriales, productos rechazados por control de calidad y subproductos no utilizables. Los RSI pueden contener sustancias tóxicas, inflamables, corrosivas o reactivas, por lo que su manejo requiere una gestión adecuada para evitar daños a la salud humana y al medio ambiente. Además, pueden clasificarse en residuos peligrosos y no peligrosos según su composición y características de peligrosidad, según normativas específicas. La correcta caracterización y gestión de estos residuos es clave para minimizar su impacto ambiental.

En el Perú, su gestión está regulada por un marco normativo que establece obligaciones para los generadores, clasificadores y gestores de residuos.

2.2.2. Manejo de residuos sólidos industriales

El manejo de los RSI comprende varias etapas, iniciando desde la generación y clasificación, almacenamiento en condiciones seguras para evitar derrames y contaminación, transporte especializado y valorización o disposición final. En el Perú, la Decreto Legislativo N.º 1278, que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, tiene por objeto “propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos, económica, sanitaria y ambientalmente adecuada” (MINAM, 2016). Su reglamento, el Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM, establece que el manejo debe comprender la reducción en la fuente, la valorización material y energética y la disposición final adecuada. Asimismo, la norma técnica NTP 900.058-2019 “Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos” regula el almacenamiento diferenciado y seguro de residuos, lo cual también aplica a los residuos industriales en su faceta de residuos sólidos. Es decir, en el Perú el manejo de RSI exige no sólo la recolección y disposición, sino una gestión integral que promueva la minimización de residuos desde la fuente, su tratamiento adecuado y la valorización en la medida de lo posible.

2.2.3. Valorización de residuos sólidos industriales

La valorización de residuos sólidos industriales consiste en las actividades mediante las cuales los residuos no son descartados, mas bien pasan a ser aprovechados como materias primas secundarias, energía o insumos para otros procesos.

En el marco normativo peruano, la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y su reglamento promueven esta opción como preferente frente a la disposición final. Por otro lado, la Ley N.º 32212, modificatoria publicada en diciembre de 2024 refuerza la obligación de valorización, así como el rol de la economía circular en la gestión de residuos sólidos en el Perú. De esta forma, la valorización se presenta como una estrategia clave dentro del modelo de gestión de residuos industriales, permitiendo que no sean vistos únicamente como carga ambiental, sino como recursos dentro de un ciclo productivo más eficiente.

La valorización integra diversas técnicas como el compostaje, reciclaje, producción de combustibles, incineración controlada, pirólisis, gasificación y co-procesamiento, con el fin de maximizar la recuperación de materiales reciclables y minimizar los residuos destinados a vertederos. Además, se impulsa mediante infraestructuras adecuadas y tecnologías de vanguardia que permiten una gestión sostenible y eficiente de los RSI, contribuyendo a la economía circular y a la protección del ambiente en el país.

2.2.4. Economía circular

La economía circular (EC) es un modelo de producción y consumo que busca mantener el valor de los materiales y productos dentro del ciclo económico el mayor tiempo posible mediante estrategias como la prevención, reutilización, remanufactura, reciclaje y valorización de residuos (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al., 2017). Este enfoque se contrapone al modelo lineal tradicional de extracción, producción, desecho.

En el Perú, la economía circular se ha integrado progresivamente al marco normativo ambiental y productivo:

- La Política Nacional de Competitividad y Productividad establece promover la sostenibilidad ambiental y la transición hacia la economía circular en el sector industrial (MEF, 2018).
- La Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en la Industria impulsa acciones para la valorización de residuos industriales y el aprovechamiento de materiales de descarte (PRODUCE, 2020).
- La Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y sus modificatorias priorizan la valorización frente a la disposición final (D.L. 1278; Ley 32212).
- El Principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) promueve la circularidad y la gestión en todo el ciclo de vida del producto (MINAM, 2019).

- La NTP-ISO 59004:2024 Economía Circular estandariza definiciones, principios y lineamientos de implementación en empresas peruanas (INACAL, 2024).

Este marco impulsa que los proyectos industriales, como la valorización de viruta de cuero, migren hacia sistemas productivos regenerativos, minimizando la extracción y uso de materia prima virgen y la generación de residuos.

2.2.5. Industria del curtido

El sector industrial de curtiembre transforma pieles animales en cuero mediante procesos fisicoquímicos que buscan la estabilidad, la durabilidad y la calidad del material final (Shahidi & Mirzadeh, 2008). En el Perú, se trata de una actividad relevante para la industria de calzado y marroquinería, concentrada principalmente en Lima y Arequipa (PRODUCE, 2020). La industria de curtido en el Perú está regulada por normas como los Límites Máximos Permisibles (D.S. 010-2023-MINAM) para efluentes provenientes de actividades de curtiembre, debido al uso intensivo de productos químicos como cromo, sulfuro y solventes orgánicos.

2.2.5.1. Flujo del proceso de curtido

El proceso industrial puede dividirse en cuatro fases principales:

a) Etapa de ribera:

- Desde la recepción de la materia prima, la cual puede ser de tipo bovino, cabra u ovino, donde se clasifican por tipo y tamaño, se hace el corte de colas, extremidades, cuello (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2013).
- El remojo comprende el uso de grandes volúmenes de agua para retirar la sal de las pieles, lo que genera un efluente con sal, sangre, pelo y estiércol. Este lavado

y rehidratación emplea sal, agua, bactericidas. El remojo toma entre 18-24 horas, luego se drena el agua para pasar al pelambre.

- Durante el pelambre se adiciona cal al 3% y sulfuro de sodio al 2.5% para facilitar el retiro de pelos y aflojar las fibras de colágeno. Se obtiene una solución alcalina la cual rehidrata e hincha la piel, el efluente generado es de alto pH e índices DBO.
- En el descarnado se retiran los restos de carne, cebo y grasa que aún quedan en la piel para que los químicos puedan ingresar correctamente en las demás etapas del proceso.

b) Curtido:

- En el desencalado se retira la cal y el sulfuro con grandes cantidades de agua.
- El proceso de piquelado busca reducir el pH, principalmente con ácido fórmico o ácido sulfúrico, porque los curtientes de cromo no son solubles en condiciones alcalinas.
- Curtido, empleando las sales de cromo se busca estabilizar el colágeno de la piel. Después de este proceso, las pieles toman un color azul como indicador de penetración exitosa del cromo en la piel.
- El cuero obtenido pasa a ser escurrido con el fin de bajar el espesor de las mantas de cuero a 1.8mm aproximadamente.

c) Acabado:

- Rebajado, se divide el cuero grueso de manera longitudinal. Es aquí donde se genera la viruta de cuero o wet blue.

- En el teñido se adiciona anilina en temperaturas altas para darle coloración al cuero.
- Durante el engrase se aporta más flexibilidad separando las fibras del cuero, incrementa la resistencia al estiramiento.
- En el secado se puede emplear una máquina al vacío o se cuelga el cuero para reducir su contenido de humedad.
- Finalmente se busca dar una vista uniforme al cuero realizando un recorte de bordes.

2.2.5.2. Principales residuos del proceso de curtido

La industria de curtido en el Perú está regulada por normas como los Límites Máximos Permisibles (D.S. 010-2019-MINAM) para efluentes provenientes de actividades de curtiembre, debido al uso intensivo de productos químicos como cromo, sulfuro y solventes orgánicos. En la **Tabla 1** se detallan los principales residuos del proceso de curtido, etapa de origen, clasificación y principal riesgo.

Tabla 1*Residuos del proceso de curtido, origen y clasificación*

Residuo	Proceso de origen	Clasificación	Principal riesgo
Efluente con sal, sangre y pelos	Remojo	No peligroso (alto impacto)	Alta carga orgánica, sólidos en suspensión y salinidad
Restos de piel, grasa y carne con sulfuros y cal (lodos)	Pelambre	Peligroso	Toxicidad por sulfuros, pH alcalino, alta DQO y DBO
Restos de descarte y recortes de grasa animal	Descarnado	No peligroso (biodegradable)	Alta carga orgánica
Efluente con sal, ácido fórmico, ácido sulfúrico y agua.	Piquelado	Peligroso	pH altamente ácido, alta salinidad.
Lodos con sales de cromo trivalente, pH elevado	Curtido	Peligroso	Contenido de Cromo (III), riesgo de oxidación a Cr (VI), toxicidad
Viruta de cuero	Rebajado	Peligroso	Metales pesados, Cromo (III)
Efluentes y residuos sólidos con solventes, pigmentos, aceites.	Acabado	Peligroso	Compuestos orgánicos volátiles, inflamabilidad, toxicidad.

La gestión ambiental de esta industria requiere implementar sistemas de depuración de efluentes, manejo seguro de residuos peligrosos, y estrategias de valorización de subproductos,

en concordancia con la gestión integral de residuos exigida por el D.S. 014-2017-MINAM y la normativa de residuos peligrosos (D.S. 009-2019-MINAM).

La viruta de cuero representa hasta 7–10 % del peso húmedo procesado y contiene cromo trivalente en proporciones críticas para el ambiente (Morsy & Nasr, 2018). Por ello, la normativa peruana:

Clasifica el cromo y residuos con metales pesados como residuos peligrosos (D.S. 009-2019-MINAM). Exige gestión especial, trazabilidad y operadores autorizados (D.L. 1278). Promueve su valorización como alternativa preferente mediante tecnologías limpias (PRODUCE, 2020; MINAM, 2025).

2.2.5.3. Viruta de cuero

También conocido como wet blue, es el subproducto del rebajado del cuero. Recibe ese nombre por el color azul verdoso que se obtiene tras la fijación con compuestos de cromo y porque aún se encuentra húmedo.

La viruta de cuero representa el 25% de los residuos sólidos totales generados en el proceso de curtido.

El wet blue es un material complejo; según la revisión de Parisi et.al, sus componentes principales son:

- Colágeno (matriz proteica): la proteína estructural de la piel, que constituye la mayor fracción de la materia orgánica del cuero.
- Agua: humedad elevada típicamente entre 40–60% en peso antes del secado o procesos mecánicos, el contenido puede variar según el tratamiento y su espesor.

- Compuestos de cromo, principalmente Cr (III): la fracción de cromo fijada al cuero suele expresarse como óxido de cromo equivalente (Cr_2O_3) u como Cr total. Valores reportados en estudios y en materiales industriales suelen estar en el orden de 1–5%.
- Sulfatos, cloruros y sales residuales: procedentes del proceso de curtido (p. ej. sulfato o sulfito, cloruros) y del piquelado.

Así, la valorización de la viruta de cuero, como en el caso de estudio de Pieles del Sur E.I.R.L., se alinea directamente con la transición del sector hacia la economía circular y el cumplimiento normativo ambiental.

2.2.6. Conceptualización del modelo propuesto

La construcción de un índice compuesto de sostenibilidad (ICS) constituye un procedimiento metodológico que permite integrar múltiples indicadores en una medida sintética capaz de representar, de manera cuantitativa, el nivel de sostenibilidad de un sistema (Mazziotta & Pareto, 2013). Este enfoque se fundamenta en la necesidad de transformar información compleja y heterogénea en una herramienta comprensible para la toma de decisiones (OECD, 2008).

El modelo propuesto en esta investigación se sustenta en principios de la evaluación multicriterio y en metodologías consolidadas para el diseño de índices compuestos, considerando las etapas de selección de indicadores, normalización, ponderación, agregación y validación. Cada una de estas fases responde a criterios teóricos y metodológicos ampliamente discutidos en la literatura científica.

2.2.6.1. Selección de indicadores

La selección de indicadores constituye la etapa más crítica del diseño de un índice, pues define la representatividad y pertinencia del modelo (Singh et al., 2012). Los indicadores deben

reflejar adecuadamente las dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, social y económica, ser medibles, comparables y relevantes para el sistema en estudio (Gallopín, 1997).

Para su identificación, se recomienda el uso de fuentes secundarias (normas, reportes de sostenibilidad, literatura técnica) y la consulta a expertos, con el fin de asegurar su validez conceptual y contextual (Ness et al., 2007). La estructura jerárquica de los indicadores suele organizarse en tres niveles: dimensiones, criterios e indicadores específicos, siguiendo una lógica descendente de generalidad a detalle (Munda, 2005).

En el contexto de la economía circular, la selección debe priorizar indicadores que evidencien eficiencia en el uso de recursos, reducción de residuos, impacto social positivo y viabilidad económica, de modo que el índice resultante exprese el equilibrio entre dichas dimensiones.

2.2.6.2. Normalización de indicadores

Los indicadores seleccionados pueden presentar unidades, escalas y magnitudes diferentes, por lo que su comparación requiere un proceso de normalización. Esta etapa busca transformar los valores originales en escalas adimensionales comparables (Zhou, Ang & Poh, 2006). Existen múltiples métodos de normalización, entre los cuales destacan:

- Normalización por rango (min-max): convierte los valores a un intervalo común, generalmente $[0,1]$.
- Normalización por z-score: estandariza los datos respecto a su media y desviación estándar.
- Normalización direccional: considera si un indicador tiene relación positiva o negativa con la sostenibilidad (Saltelli et al., 2008).

La elección del método depende del tipo de indicador y del objetivo del índice. En la mayoría de los estudios ambientales y de sostenibilidad, el método *min-max* es el más utilizado por su simplicidad e interpretación directa (Gan et al., 2017).

2.2.6.3. Ponderación de indicadores

La ponderación asigna un peso relativo a cada indicador o dimensión, reflejando su importancia dentro del índice global. Según Nardo et al. (2005), existen tres enfoques principales:

- Ponderación objetiva: basada en análisis estadísticos (p. ej., análisis de componentes principales o entropía).
- Ponderación subjetiva: determinada por juicios de expertos o métodos de consenso, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) propuesto por Saaty (1980).
- Ponderación híbrida: combina ambos enfoques para equilibrar criterios técnicos y de juicio experto.

El método AHP es ampliamente utilizado en estudios de sostenibilidad debido a su capacidad para descomponer un problema complejo en sub niveles jerárquicos y cuantificar las preferencias mediante comparaciones pareadas (Vaidya & Kumar, 2006). Este procedimiento garantiza coherencia lógica y transparencia en la asignación de pesos, permitiendo incorporar la visión de los actores relevantes.

2.2.6.4. Agregación y formulación del índice

Una vez normalizados y ponderados los indicadores, se procede a la agregación, etapa en la que se combinan los valores parciales en una medida compuesta que sintetiza el

desempeño sostenible del sistema (Mazziotta & Pareto, 2013). Los métodos más comunes de agregación son:

- Aditivo (promedio ponderado): suma ponderada de los valores normalizados; permite compensación entre indicadores.
- Multiplicativo (geométrico): reduce la compensación, penalizando valores bajos en alguna dimensión.
- Híbrido o jerárquico: combina ambos enfoques según la estructura del modelo (Saisana & Tarantola, 2002).

La elección del método debe garantizar la coherencia con los objetivos del estudio y la lógica de las dimensiones. En índices de sostenibilidad, la agregación ponderada aditiva es frecuentemente empleada por su interpretación intuitiva y transparencia (Gan et al., 2017).

2.2.6.5. Validación del índice

La validación busca comprobar la consistencia y robustez del índice construido. Según Gómez-Limón y Sanchez-Fernandez (2010), la validación puede abordarse desde tres enfoques:

- Conceptual: examina la coherencia del modelo con los fundamentos teóricos.
- Empírica: evalúa la estabilidad de los resultados frente a cambios en ponderaciones o datos.
- Comparativa: contrasta los resultados del índice con indicadores de referencia o modelos simulados.

En el ámbito industrial, la validación mediante modelos de simulación de procesos, como SuperPro Designer, permite evaluar si las mejoras o variaciones del sistema se reflejan adecuadamente en el comportamiento del índice. De este modo, se comprueba su capacidad

predictiva y su utilidad como herramienta de decisión para el diseño o mejora de sistemas de valorización de residuos.

2.3. Marco legal

- La constitución política del Perú establece en su numeral 22 del artículo 2 el derecho fundamental de la persona a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida (Constitución Política del Perú, 1993).
- El Artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente establece que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país (Decreto Legislativo 28611, 2005).
- La Política Nacional de Competitividad y Productividad, aprobada mediante el D.S. N.º 345-2018-EF, está organizada en nueve (09) Objetivos Prioritarios. Comprendido dentro de ellos el referido a *“Promover la sostenibilidad ambiental en la operación de actividades económicas”*, orientado a la promoción de la economía circular en el mercado nacional, así como la concepción de soluciones sostenibles y diversificadas para el avance productivo empresarial (MEF, 2018).
- Plan Nacional de Competitividad y Productividad, contiene un conjunto de medidas de política con hitos de corto, mediano y largo plazo para avanzar en el logro de la visión del estado. Aprobado por el D.S. N.º 237-2019-EF (MEF, 2019).

- El Objetivo Prioritario N.º 9 titulado “*Promover la sostenibilidad ambiental en la operación de actividades económicas*” que parte de la premisa de que es factible e ideal lograr un grado de complementariedad entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental. Su cumplimiento apunta hacia una mejor utilización de nuestros recursos naturales, y a la adopción de métodos de producción y patrones de consumo que fomenten nuestro tránsito hacia una “economía circular”, generando así una variedad de efectos positivos sobre la competitividad peruana (MEF, 2019).
- La medida de política contenida N.º 9.3 dentro del Objetivo Prioritario N.º 9, denominada “*Economía circular y Acuerdos de Producción Limpia en los sectores industria, pesca y agricultura*”, cuya meta es lograr que los agentes económicos privados vayan adecuando sus actividades en modelo lineal de manera progresiva a un modelo de producción cíclico, conocido como “economía circular”, para las actividades de extracción, transformación, distribución, uso y recuperación de los materiales, eficiencia energética, entre otros. Teniendo dentro de sus medidas al Hito 1: Hoja de Ruta hacia una economía circular en el Sector Industria (MEF, 2019).
- Hoja de Ruta hacia una economía circular en el sector industria aprobada por D.S. N.º 003-2020-PRODUCE, contempla dentro de su tercer enfoque: Aprovechamiento de material de descarte y gestión de residuos industriales propone la línea de acción destinada a “*Promover el aprovechamiento de material de descarte y la valorización de residuos industriales*” (PRODUCE, 2020) que busca incentivar el uso de residuos aprovechables en la cadena de valor de las actividades de la industria manufacturera, por medio de tecnologías limpias y sostenibles y con prácticas alineadas al enfoque de Economía circular.

- Según el Decreto Legislativo 1501 que modificó la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el mes de mayo del 2020 se define a la valorización como una alternativa de gestión y manejo que debe priorizarse frente a la disposición final de los residuos. Dicha operación consiste en la transformación química y/o biológica de los residuos sólidos, para constituirse, de manera total o parcial, como insumos, materiales o recursos en los diversos procesos; así como en la recuperación de componentes o materiales, establecida en la normativa (Decreto Legislativo 1501, 2020).
- Se establece también el régimen especial de gestión de residuos de bienes priorizados: detalla que el transporte de los residuos de bienes priorizados puede ser realizado por los propios medios logísticos del productor, promoviendo la logística inversa. El Decreto define un bien priorizado como aquellos bienes que requieren un manejo especial al momento de convertirse en residuo, ya que estos pueden ser valorizados o requieren manejo diferenciado para su disposición final. A estos bienes se le aplica el Principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), haciendo responsable al productor de los bienes en todo el Ciclo de Vida del Producto (MINAM, 2019).
- El Perú ha adoptado la NTP-ISO 59004:2024 Economía circular — Vocabulario, principios y orientación para la implementación, como parte del alineamiento normativo internacional para guiar a empresas y sectores en la transición hacia la circularidad (INACAL, 2024).
- La Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular al 2030, aprobada mediante el D.S. N.º 003-2025-MINAM, articula e integra las hojas de ruta sectoriales existentes (industria, pesca, agricultura, entre otros) y establece indicadores

macro para el seguimiento de la transición hacia la economía circular en el país
(MINAM, 2025).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

El presente estudio es de tipo según el enfoque cuantitativo, dado que emplea datos numéricos y procedimientos estadísticos para la construcción y validación del índice compuesto de sostenibilidad.

El nivel de investigación es explicativo, ya que se busca caracterizar las dimensiones e indicadores que conforman el índice dentro del sistema de valorización de residuos bajo el enfoque de economía circular.

3.2. Diseño de investigación

No experimental, porque no se manipulan las variables, sino que se analizan tal como se presentan en el contexto de estudio. Además, es transversal, dado que la recolección de información se realiza en un solo periodo de tiempo.

Se orienta al desarrollo de un instrumento de evaluación (índice compuesto) aplicable a casos reales bajo el paradigma de la economía circular.

3.3. Instrumentos

3.3.1. Análisis morfológico general

Método estructurado utilizado para explorar y evaluar diversas combinaciones de dimensiones relacionadas con la sostenibilidad y la circularidad, permitiendo identificar las mejores opciones para el caso de estudio (Ritchey, 2011).

3.3.2. Guías de indicadores de sostenibilidad

Para el diseño de los indicadores de sostenibilidad se revisaron estándares y marcos de referencia internacionales como las GRI Standards (Global Reporting Initiative, 2021) y las guías metodológicas para construcción de indicadores compuestos publicadas por la

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD & JRC, 2008). Estas guías proporcionaron criterios técnicos de validez, relevancia y aplicabilidad de indicadores en las dimensiones económica, ambiental y social.

- **OECD & JRC (2008) - Guía para la Construcción de Indicadores Compuestos:**

Actuó como el marco metodológico que guió la arquitectura matemática del índice:

- Estructuración del marco conceptual,
- Criterios de selección de indicadores
- Normalización de datos (para transformar metros cúbicos, kilovatios-hora o soles a una escala homogénea adimensional de 0 a 1)
- Esquemas de agregación lineal para calcular los subíndices y el ICS final.

Aseguró que el índice cumpla con el rigor estadístico exigido para indicadores compuestos públicos y sectoriales, previniendo sesgos metodológicos durante la ponderación con el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

- **GRI Standards (Global Reporting Initiative, 2021) - Instrumento de Filtrado y Conceptualización:**

Se utilizó como la base de datos taxonómica para extraer las dimensiones clave de sostenibilidad aplicables al contexto industrial. En las fases de diseño (sección 3.4.1), se analizaron los módulos temáticos del GRI (GRI 301: Materiales, GRI 302: Energía, GRI 303: Agua y GRI 403: Salud y Seguridad Ocupacional).

Funcionó como el marco cualitativo-operacional inicial para compilar y validar un set inicial de indicadores que fuesen homologables globalmente, garantizando que el enfoque micro tenga relación con los reportes de sostenibilidad corporativos estándar.

3.3.3. Motores de búsqueda académicos y bases de datos

La revisión de literatura se llevó a cabo en plataformas académicas reconocidas, tales como Scopus (Elsevier, n.d.), ScienceDirect (Elsevier, n.d.) y Google Scholar (Google, n.d.), que facilitaron la localización y análisis de publicaciones científicas relevantes.

3.3.4. Microsoft Excel

El procesamiento de datos se realizó mediante Microsoft Excel, herramienta empleada para la normalización de indicadores, aplicación de fórmulas de cálculo y generación de gráficos comparativos (Microsoft Corporation, 2021).

3.3.5. Software AHP

Herramienta especializada para la ponderación de indicadores mediante el método AHP, asegurando consistencia en la priorización de criterios (Goepel, 2018).

3.3.6. SuperPro Designer

Programa de modelación utilizado para simular procesos industriales, obteniendo datos clave como consumo energético y flujos materiales necesarios para evaluar la sostenibilidad del caso de estudio (Intelligen, 2024).

3.4. Descripción de la investigación

3.4.1. Diseño del conjunto de indicadores de sostenibilidad

3.4.1.1. Desarrollo del marco conceptual

Para comprender mejor la interrelación entre las estrategias de circularidad, las métricas o indicadores y la sostenibilidad se consideró el método Análisis Morfológico General – GMA (Zwicky, 1969) el cual consiste en:

- Formular el problema de sostenibilidad y circularidad de manera concisa.
- Identificación de las variables o dimensiones de relevancia para resolver el problema.
- Construcción de la estructura conceptual de las dimensiones seleccionadas y sus estados.
- Análisis de las combinaciones posibles y sus implicaciones.
- Selección la combinación de las dimensiones que se ajuste mejor al objetivo o a la solución del problema inicial.

3.4.1.2. Revisión bibliográfica

Después de seleccionar los indicadores, se realizó una revisión de la literatura y un análisis de documentos en temas como "Economía Circular", "Sostenibilidad", "Manufactura" e "Indicador compuesto".

Se accedió a fuentes principales de artículos científicos revisados por pares, como Scopus, Science Direct y otras. También se realizó una búsqueda en Google Scholar para complementar los hallazgos.

Se buscó que los trabajos seleccionados resolvieran las siguientes preguntas: ¿Cuáles han sido los enfoques utilizados para definir sistemas de medición de circularidad a nivel micro?, ¿Cuáles son las posibles lagunas en la literatura actual sobre la relación entre los indicadores de sostenibilidad y circularidad?

Luego, se realizó una búsqueda inversa utilizando referencias de documentos citados en este análisis para completar el análisis.

3.4.1.3. Propuesta y selección de indicadores

Se prosiguió con la separación de indicadores que evaluaran aspectos de circularidad de acuerdo con el resultado del marco conceptual para los tres componentes de sostenibilidad. Se tomó en consideración que la información requerida para la aplicación del indicador estuviera disponible o que la dificultad de obtención de esta no sea alta de acuerdo al grado de madurez en el que se ubicó al estudio.

Una vez que los indicadores fueron contrastados con las métricas de WBCSD y se propusieron las dimensiones de aquellos que encajaran dentro del alcance del presente estudio y propiciando su viabilidad, se procedió con el diseño de estos teniendo en consideración que sean específicos, medibles, alcanzables, realistas y aplicables en el tiempo. Estas características parten del objetivo tipo SMART (Doran, 1981) y fueron alineadas con los atributos otorgados a cada indicador.

3.4.1.4. Desarrollo de atributos de indicadores

Para diseñar los indicadores y en concordancia con los criterios SMART, se establecieron atributos siguiendo la metodología del Grupo de Medidas Sostenibles (Sustainable Measures, 2009) con una extensión de Moss y Grunkemeyer (2007) que establece criterios de identificación, nombre, fórmula de cálculo, tipo de unidad de medida, la unidad de

medida, escala temporal de medición, dirección hacia la que va encaminado el ideal del logro del indicador y la escala de nivel de aplicación, tal como se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2*Atributos de indicadores de sostenibilidad*

Atributos	Información
Identificación (ID)	Identificación alfanumérica
Nombre	La(s) palabra(s) para la designación distintiva de un indicador
Fórmula	Fórmula matemática para el cálculo del valor
Definición	La declaración que expresa las características esenciales y la función de un indicador. Así como consideraciones para la utilización de la información.
Tipo de medida	Cuantitativo o cualitativo
Unidad de medida	Unidad numérica de medición.
Escala temporal	Rango temporal de referencia para la toma de datos y cálculo
Dirección	Puede ser de dos tipos: Maximizar: a medida que el valor es más alto, la sostenibilidad es alcanzada Minimizar: a medida que el valor es más bajo, la sostenibilidad es alcanzada
Nivel de aplicación	El nivel en una organización jerárquica en el que se aplica el indicador. Con base en esta información, los legisladores o los tomadores de decisiones en la organización pueden establecer sus propias métricas de sostenibilidad basadas en sus estrategias comerciales.

3.4.1.5. Validación de indicadores

Luego se evaluaron los indicadores utilizando el “Checklist de validación de factores clave de buenas prácticas e indicadores de evaluación de meta-desempeño para la evaluación de la sostenibilidad” de Ramos y Caeiro (2010) presentado en la Tabla 3, realizado en dos niveles y bajo 13 criterios.

Tabla 3

Checklist de validación de indicadores

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado:				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental			
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio			
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales			
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo			
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores			
6	Considera la facilidad de diseminación de la información resultante			
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.			
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.			

- 9 Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.
 - 10 Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.
 - 11 Alcance temporal y espacial definidos
 - 12 Relación costo/beneficio razonable.
 - 13 Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.
-

3.4.2. Sistematización de un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) utilizando técnicas multicriterio (AHP)

Para poder convertir la información de los indicadores en un índice compuesto fue necesario normalizarlos con el fin de agregarlos en una escala de valores única para todos. Una vez hecho esto, se definió el factor de peso de cada indicador utilizando el software Analytic Hierarchy Process, para finalmente generar el agregado y construir los valores del indicador compuesto. A continuación, se describen las etapas a detalle:

3.4.2.1. Normalización

Los indicadores seleccionados fueron normalizados para tener valores no dimensionales dentro del rango 0-1. Esta normalización se llevó a cabo con la técnica del "min-max" del modelo INSPIA (Trivino-Tarradas et al., 2019) de indicadores cuantitativos. Se

determinó que la información de ingreso a los indicadores fueran variables en varios periodos de tiempo por lo que se procedió a trabajar con el porcentaje de variación.

Ecuación de cálculo para indicadores cuantitativos : Cada indicador x_{qc}^t para una empresa u organización específica “c” fue transformado tal como muestra la Ecuación (1)

$$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - \min(x_{qc}^t)}{\max_c(x_{qc}^t) - \min_c(x_{qc}^t)} \quad (1)$$

Donde:

$\max_c(x_{qc}^t)$ = valor ideal, deseado u objetivo, siendo el 100%

$\min_c(x_{qc}^t)$ = valor mínimo posible, siendo el 0%

3.4.2.2. Ponderación de indicadores por cada componente de Sostenibilidad

Se empleó un proceso de análisis multi-criterio, el método de Analytical Hierarchy Process (AHP) propuesto por Saaty (1980) para asignar peso de cada indicador. El método consiste en emparejar los items de interés y llevar a cabo una comparación entre ellos, para cada par se puede asignar una valoración entre el 1-9 de acuerdo con la escala mostrada en la Tabla 4, la asignación de uno de los números representa el grado de preferencia de un criterio sobre otro basado en el juicio de expertos.

Tabla 4*Escala de evaluación por pares de Saaty*

Nivel de importancia	Definición
1	Misma importancia
2	Preferencia entre la misma y moderada
3	Preferencia moderada
4	Preferencia entre moderada y fuerte
5	Preferencia fuerte
6	Preferencia entre fuerte y muy fuerte
7	Preferencia muy fuerte
8	Preferencia entre muy fuerte y absoluta
9	Preferencia absoluta

Nota: Adaptado de Saaty (1980)

Para darle credibilidad y objetividad a las valoraciones, se empleó el Ranking de indicadores críticos de sostenibilidad para la manufactura de Ocampo et al. (2015) como se muestra en la **Tabla 5**. Finalmente se realiza la revisión de consistencia de la matriz de comparaciones, la cual es aceptable si es menor a 0.1. Si la matriz es inconsistente, entonces deberá realizarse otra comparación por pares. Una vez aceptado el valor de inconsistencia, fue posible calcular los pesos de los indicadores.

Tabla 5*Ranking de indicadores críticos de sostenibilidad para la manufactura*

Elementos de nivel 3	Ranking	Indicadores de sostenibilidad
Ingresos	1	1.1 Ingresos
Lucro	2	2.1 Lucro
Adquisición de materiales	3	3.1 Costo de adquisición de materiales
Desarrollo comunitario	4	4.1 Inversiones caritativas 4.2 Inversión e impacto del desarrollo comunitario
Producción	5	5.1 Costo de la energía 5.2 Costo de adquisición de herramientas y equipos 5.3 Costo del tratamiento de residuos 5.4 Costo de embalaje
Manejo del producto o servicio al final del ciclo de vida	6	6.1 Costo de reciclaje para RAEE 6.2 Productividad laboral
Satisfacción del cliente a partir de las operaciones y productos	7	7.1 Manejo de la satisfacción del cliente 7.2 Reclamo de clientes
Impactos en la Seguridad y Salud a partir de la manufactura o el uso del producto	8	8.1 Análisis de ciclo de vida para impactos a la seguridad y salud 8.2 Incidentes causados por incumplimiento de códigos voluntarios 8.3 Manejo y aseguramiento de la calidad del producto
Investigación y desarrollo	9	9.1 Inversión en investigación, innovación y desarrollo 9.2 Inversión en energías renovables 9.3 Inversión en eficiencia energética
Programas de desarrollo comunitario	10	10.1 Programas para el cumplimiento legal 10.2 Violación de derechos humanos 10.3 Gestión del servicio público

- 10.4 Participación en desarrollo de políticas públicas
- 10.5 Contribuciones políticas
- 10.6 Participación en programas de cuidado responsable
- 10.7 Publicación de reporte de sostenibilidad
- 10.8 Densidad poblacional
- 10.9 Crecimiento poblacional

Nota: (Ocampo et al., 2015)

La aplicación del método AHP fue realizado con el software AHP Online System - AHP-OS (Goepel, 2018).

3.4.2.3. Agregación de indicadores ponderados para los subíndices de sostenibilidad

Se agregaron los indicadores por medio de la sumatoria del producto del peso del indicador por su valor en la escala normalizada, conocida como la metodología de agregación aditiva (Gan et al., 2017), se obtuvo el subíndice de cada componente de sostenibilidad tal como se muestra en la Ecuación (2)

$$SI = \omega_1 I_1 + \omega_2 I_2 + \dots + \omega_m I_m = \sum_{i=1}^m \omega_i I_i \quad (2)$$

Donde:

SI: Subíndice

w_i: peso del indicador

I_i: escala normalizada del indicador

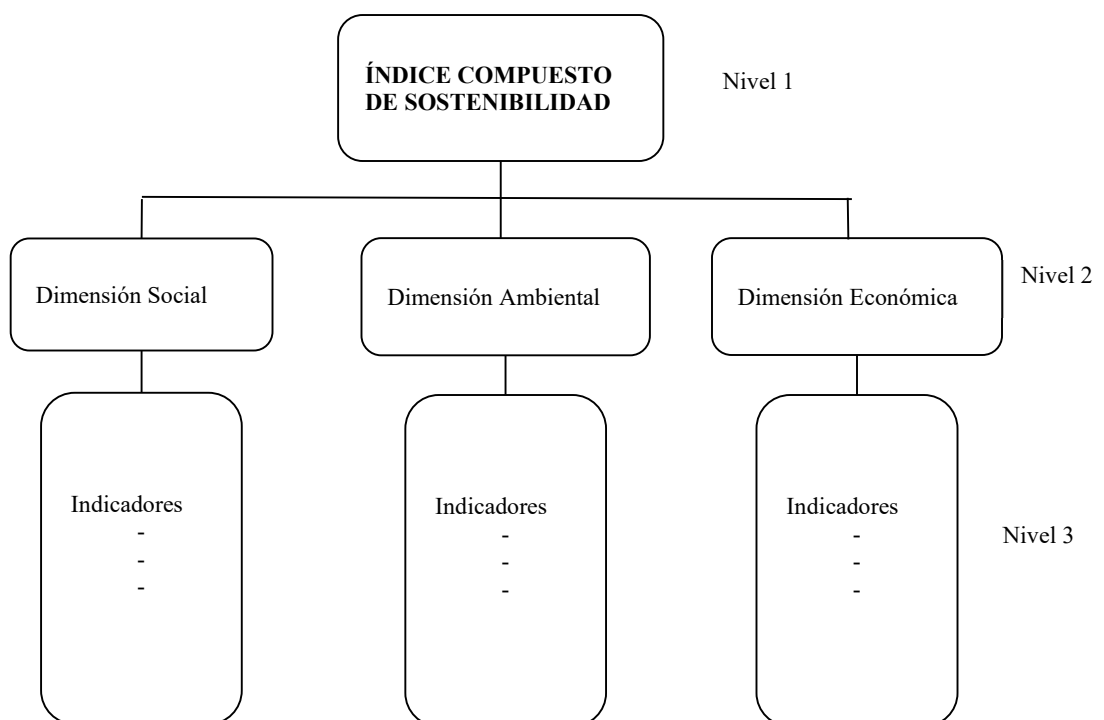
3.4.2.4. Cálculo del Índice Compuesto de Sostenibilidad

Se realizó el cómputo del Índice Compuesto de Sostenibilidad a través del cálculo de la media aritmética ponderada de los subíndices económico, social y ambiental, considerados como equitativos dado el enfoque de “sostenibilidad flexible” del presente estudio, para el cual Gan et al. (2017) recomienda el método de agregación geométrica puesto que la importancia asignada a los componentes de sostenibilidad es equitativa.

Una vez que los indicadores pasaron por el proceso de validación se procedió a representarlos gráficamente en los criterios de sostenibilidad por medio de subíndices, conformando una escala jerárquica de formato estándar para su uso, siguiendo la referencia esquemática de la organización NIST en Repositorio de Indicadores de Manufactura Sostenible (SMIR) como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1

Jerarquía general para la obtención de un indicador compuesto de sostenibilidad.



Nota: Sarkar et al. (2011)

Nivel 1: Objetivo o meta a cumplir: Evaluación global de la sostenibilidad del sistema bajo el enfoque de economía circular

Nivel 2: Temas prioritarios (criterios). Dimensiones básicas de la sostenibilidad, con una ponderación equitativa.

Nivel 3: Indicadores y unidades de medición.

3.4.3. Validación del índice de sostenibilidad propuesto mediante la aplicación en el caso de estudio de valorización de viruta de cuero

Para el caso de estudio Sistema de valorización de viruta de cuero de la empresa Piel del Sur S.R.L. se siguió la propuesta de validación metodológica desarrollada por autores como Kang (2004), Singh et al. (2007), Cruciani et al. (2013) y Trivino-Tarradas et al. (2019) la cual consistió en dos etapas: (a) Modelación matemática del proceso en un software y (b) aplicación de la metodología propuesta con los resultados de la modelación

3.4.3.1. Modelamiento matemático del proceso en SuperPro Designer

Para la etapa de modelación matemática, se empleó el software SuperPro Designer 8.5 de Intelligen, ingresando los datos operativos de materiales y procesos. La simulación se basó en la proyección de planta para el aprovechamiento de viruta de cuero con un ingreso mensual de 6600 kg, produciendo 812 planchas de (Medina, 2019).

Los datos considerados para el modelamiento en el programa fueron:

- Modo de operación
- Diagrama de flujo
- Registro de los componentes
- Registro de corrientes de entrada y salida

Se caracterizó primero a las materias primas que ingresan al proceso de manufactura. Para compuestos como la viruta, resina y pintura, fue necesario hacer un desglose de

componentes por porcentajes basándose en la literatura existente y fichas técnicas de los productos.

Así mismo, se consideró el consumo energético por maquinaria, el personal de trabajo dentro del proceso y los ajustes matemáticos necesarios para el modelamiento anual de acuerdo a los requerimientos del programa.

Después del modelamiento, el programa dio como resultante los siguientes reportes:

- Reporte de flujos y materiales
- Reporte económico
- Reporte ambiental

3.4.3.2. Aplicación del índice compuesto con los resultados de la modelación

La segunda etapa de validación de la metodología comprendió el procesamiento de la información obtenida de los siguientes reportes de acuerdo con el batch de 6600 kg por mes:

- Reporte de flujos y materiales, para el conocimiento de flujos de entrada y salida en unidades de masa.
- Reporte de evaluación económica, para el balance económico de inversión en la manufactura del batch.
- Reporte de impacto ambiental, para la contabilización de residuos sólidos, orgánicos, efluentes y emisiones de gas.

Con la información presentada en cada reporte, se procesaron aquellos datos de interés para los indicadores en una hoja de cálculo. Los resultados de cada indicador fueron ponderados en los subíndices de acuerdo con el diseño de previo y posteriormente agregados en el Índice Compuesto de Sostenibilidad propuesto.

El resultado de la evaluación fue representado gráficamente para visualización de las áreas de interés en un diagrama radar o telaraña, con los valores numéricos aumentando desde el centro hacia el perímetro donde se llega al valor máximo admitido como proponen Soto de la Rosa y Schuschny (2009).

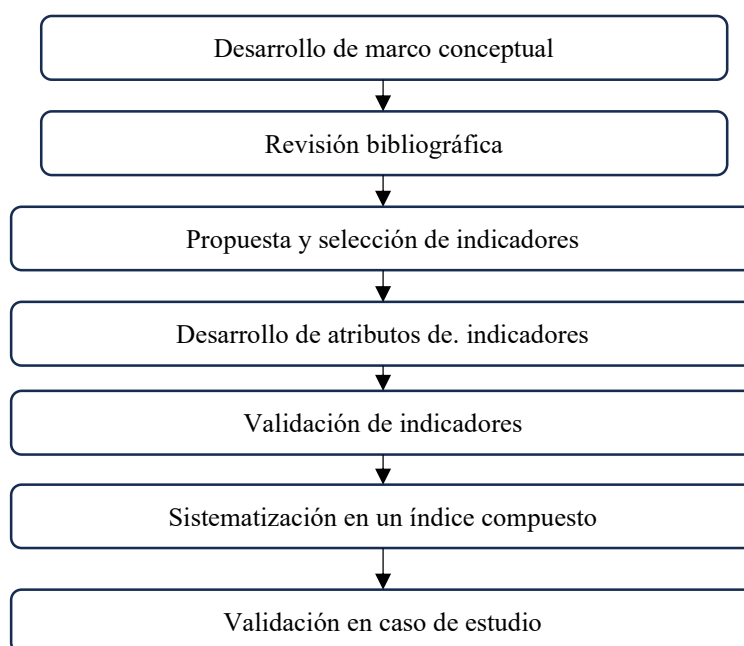
3.4.4. Esquema metodológico

El presente esquema metodológico tiene como objetivo representar el desarrollo de un sistema de indicadores que permita medir la sostenibilidad y la circularidad en un caso de estudio específico en la **Figura 2**. Este enfoque combina elementos teóricos y prácticos, integrando métodos de análisis conceptual, revisión bibliográfica, diseño de indicadores, y validación a través de herramientas cuantitativas.

El proceso metodológico abarca siete etapas clave, desde el diseño inicial de los indicadores hasta su validación y representación en un índice compuesto de sostenibilidad.

Figura 2

Esquema metodológico del trabajo de investigación



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Diseño del conjunto de indicadores de sostenibilidad enfocados en dimensiones económica, ambiental y social.

4.1.1. Desarrollo del marco conceptual

Para el desarrollo del marco conceptual se tomaron las recomendaciones de Circular Metrics: Análisis del Panorama de Métricas Circulares (WBCSD, 2018) que clasifica las métricas existentes de acuerdo al propósito de estrategia de la circularidad dentro de una organización (*Tabla 6*) de modo compatible con el nivel micro de la EC, con las cuales se determinó que el presente trabajo se ubique en la fase básico-intermedia de estrategia circular para tomar las métricas propuestas como punto de partida.

Tabla 6

Fases de medición de circularidad

	Básico	Intermedio	Avanzado
Propósito de la estrategia circular	Circularidad no reconocida formalmente	Circularidad integrada en la estrategia de sostenibilidad	Circularidad integrada en la estrategia corporativa
Métricas de circularidad	Eficiencia operacional	Desempeño de sostenibilidad	Creación de valor circular

Se ubicó el presente estudio dentro del grado Básico-intermedio de madurez en Economía Circular (EC), que contempló un análisis de métricas en eficiencia operacional y desempeño sostenible. Se consideró el grado de madurez teniendo en cuenta las actividades realizadas hasta la fecha de inicio de este proyecto de tesis, tomando como ejemplo de fase inicial una gestión circular de los subproductos o residuos del proceso (reciclaje de virutas de

cuero), siendo esta iniciativa no reconocida oficialmente como una estrategia de EC por la empresa.

Así también, el grado del estudio no solo se queda en el nivel básico, llegaría a ser intermedio dado que dicho grado se refiere a que ya se reconoce una estrategia como es la remanufactura del material de descarte dentro del proceso productivo, promoviendo su aprovechamiento con el mismo fin de una piel vacuna nueva y no como residuo, adicionalmente considerando otros criterios de sostenibilidad como el aspecto social, económico más que solo la eficiencia operacional de recursos y materiales.

No se consideró el grado de madurez avanzado pues la empresa aún no cuenta con estrategias corporativas ni de trabajo conjunto con clústeres industriales para formar ecoparques o conformar redes de simbiosis industrial (WBCSD, 2018).

4.1.2. Revisión bibliográfica

Una vez determinada la fase de madurez en Economía Circular del estudio, se realizó la revisión bibliográfica de trabajos publicados que coincidieran con las siguientes palabras clave: sostenibilidad, economía circular, manufactura e indicador compuesto en los motores de búsqueda de Scholar Google, Science Direct. De ese modo se logró recopilar información con marcos conceptuales de similar alcance al objeto del estudio y se tomaron como referencia los siguientes:

- Indicadores de sostenibilidad GRI (GRI, 2002)
- ICM: Indicador de Circularidad de Materiales (Ellen Mac Arthur Foundation & Granta Design, 2019)
- Indicadores de Transición Circular – CTI (WBCSD, 2020)
- Indicadores Críticos para la Manufactura Sostenible (Ocampo et al., 2015)

- Repositorio SMIR – NIST USA (Joung et al., 2013)

Se compilaron y categorizaron todos los indicadores hallados en la revisión bibliográfica bajo los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental, social y económico como se muestra en la *Tabla 7*.

Tabla 7

Compilación de indicadores por pilares de sostenibilidad

Framework	Dimensión ambiental	Dimensión económica	Dimensión social
GRI	-Materiales -Energía -Agua y efluentes -Biodiversidad -Emisiones -Residuos -Cumplimiento ambiental -Evaluación ambiental de proveedores	-Desempeño económico -Presencia en el mercado -Impactos económicos directos -Prácticas de adquisición -Anticorrupción -Competencia desleal -Fiscalidad	-Empleo -Relaciones trabajador-empresa -Seguridad y Salud en el trabajo -Formación y enseñanza -Diversidad e igualdad de oportunidades -No discriminación -Libertad de asociación y negociación colectiva -Trabajo infantil -Trabajo forzoso u obligatorio -Prácticas en materia de seguridad -Derechos de los pueblos indígenas -Evaluación de derechos humanos -Comunidades locales -Evaluación social de proveedores -Política pública -Salud y Seguridad de los clientes -Marketing y etiquetado -Privacidad del cliente -Cumplimiento socioeconómico

ICM	- Índice de flujo lineal - Porcentaje de materia prima reciclada. - Destino después del uso: tasa de recuperación y tasa de reutilización - Indicadores complementarios: uso de energía, emisiones de CO2 - Toxicidad del material	- Eficiencia del proceso de reciclaje - Factor de utilidad: - Duración e intensidad de uso del producto o material vs al de un producto promedio empleado para el mismo uso - Indicadores de riesgo complementarios: variación del precio de la materia prima - riesgos en la cadena de suministro - escasez de la materia	
CTI	- Porcentaje de circularidad del agua - Porcentaje de energía renovable - Porcentaje de circularidad de materiales - Porcentaje de flujo crítico - Impacto en GEI	- Productividad del material circular - Ganancias - Porcentaje de valor de acuerdo con el tipo de recuperación de materiales	
Ocampo et al.	- Conservación del ambiente natural - Consumo de recursos - Emisiones - Contaminación	- Inversión - Costo - Beneficio	- Comunidad - Clientes - Trabajadores
SMIR	- Efluentes - Residuos sólidos - Emisiones - Materiales - Energía - Uso de agua - Uso de tierra - Sustancias peligrosas - Gases de efecto invernadero - Gases depletantes de ozono	- Costos - Ganancias - Inversiones	- Seguridad y Salud en el Trabajo - Desarrollo - Satisfacción del trabajador - Seguridad y Salud del cliente - Satisfacción del cliente - Derechos del consumidor - Responsabilidad del producto - Justicia - Desarrollo

- Otros contaminantes
 - Conservación del hábitat natural
-

4.1.3. Propuesta y selección de indicadores

Una vez lista la compilación, se contrastaron las métricas de circularidad propuestas por WBCSD tomadas como referencia del marco conceptual y la lista de indicadores de sostenibilidad, de donde se seleccionaron a aquellos que coincidan con el objetivo de medición. De este modo se plantearon las dimensiones de los indicadores seleccionados para su posterior desarrollo, como se muestra en la ***Tabla 8***.

Tabla 8*Propuesta de dimensión de indicadores*

Métricas de WBCSD seleccionadas	Propuesta de dimensión de indicadores
Aspecto económico	
Tarifa de disposición en vertedero	Costo de disposición de RRSS
Costo de energía por unidad	Costo de energía, ahorro de energía
Ahorro en el costo de recursos	Costo de adquisición de materiales, ahorro en adquisición
Precio por unidad de recurso	Ganancias
Créditos de carbono	N/A
Adquisición para la circularidad	N/A
Aspecto social	
Horas de trabajo por unidad	N/A
Nivel de productividad	Nivel de productividad
Número de accidentes o incidentes	Seguridad y Salud de trabajadores
Transparencia de la cadena de suministro	N/A
Partes interesadas locales involucradas	Desarrollo de carrera, capacitación
Clientes alcanzados	N/A
Aspecto ambiental	
Eficiencia energética	Productividad media de la energía
Eficiencia hídrica	Eficiencia del consumo de agua
Eficiencia de materiales	Eficiencia del consumo de materiales
Contenido reciclado	Porcentaje del producto cuyo origen es circular
Residuos desviados de disposición final	Generación de residuos sólidos, porcentaje de reducción de residuos
Proyectos circulares	N/A

Las propuestas de indicadores mostrados como N/A en la **Tabla 8** fueron catalogadas como tal con el fin de ajustarse al nivel de desempeño de sostenibilidad básico-intermedia puesto que las métricas sobre créditos de carbono, adquisición para la circularidad, clientes, cadena de suministro y proyectos circulares son propios de organizaciones que ya contarían con una estrategia de circularidad declarada y por ello de requerir información que las organizaciones que solo implementan circularidad a nivel operacional no podrían obtener con facilidad suficiente para hacer uso de la metodología.

Posteriormente las dimensiones de los indicadores de sostenibilidad con nexo a la circularidad fueron desarrolladas, primero designando un nombre claro para su uso en la metodología propuesta, como se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9

Correlación de dimensiones seleccionadas y nombres de indicadores

Dimensión de indicadores	Nombre designado del indicador
Costo de disposición de RRSS	Reducción del costo de disposición de residuos sólidos
Costo de energía, ahorro de energía	Reducción del costo de suministro energético
Costo de adquisición de materiales, ahorro en adquisición	Logro del presupuesto de adquisición de materiales
Ganancias	Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura
Nivel de productividad	Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado
Seguridad y Salud de trabajadores	Porcentaje de accidentabilidad laboral
Desarrollo de carrera, capacitación	Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación

Productividad media de la energía	Reducción de la intensidad energética
Eficiencia del consumo de agua	Eficiencia de uso de agua
Eficiencia del consumo de materiales	Eficiencia de uso de materiales
Porcentaje del producto cuyo origen es circular	Porcentaje del producto con origen circular
Generación de residuos sólidos, porcentaje de reducción de residuos	Porcentaje de reducción de generación de residuos sólidos

4.1.4. Desarrollo de atributos de indicadores

Cada indicador fue diseñado con un código de identificación, fórmula de cálculo, tipo de unidad de medida, unidad de medida, escala temporal de medición, dirección ideal hacia la que va encaminado el logro del indicador y la escala de nivel de aplicación. Para visualizar un resumen de los indicadores y atributos principales consulte el **Anexo 1**.

Todas las fórmulas propuestas para el cálculo consideraron valores mínimos y máximos dentro del rango de normalización porcentual 0-100%. La totalidad de indicadores tienen un tipo de medida cuantitativa, medidos en un periodo de tiempo mensual y a nivel de aplicación operacional.

Casi todos los indicadores tienen dirección hacia la maximización, es decir buscan lograr el 100%, el indicador S2 fue el único que buscaba los valores mínimos pues evalúa el porcentaje de accidentabilidad laboral, por ende un valor menor es mejor.

Se presenta el desarrollo de cada indicador y sus atributos desde la **Tabla 10** hasta la **Tabla 21**

Tabla 10*Atributos del indicador Logro de ganancias del sistema de manufactura*

Atributos	Información
Identificación (ID)	E1
Nombre	Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura
Definición	Se toman los valores de ingresos totales tras la venta del producto, restados del costo total de producción solo en inversión de materiales, energía y recursos humanos, mas no la inversión en maquinaria. El valor es dividido entre la ganancia proyectada para su verificación de cumplimiento. Para identificar que la ganancia esperada no es lograda, se toma en consideración que el valor resultante es menor a 100, en caso el resultado sea negativo se interpreta como una perdida por tener menos ingresos que la inversión. En ese caso el valor final se toma como cero.
Fórmula	$E1 = \frac{GR}{GP} \times 100\% \quad (3)$ Donde: $GR = \frac{(\text{Ingresos totales} - \text{Costo total de manufactura})}{\text{Total de unidades producidas}} \quad (4)$ GP: Ganancia proyectada por unidad de producción GR: Ganancia real tras por unidad de producción
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 11*Atributos del indicador Reducción del costo de disposición de residuos sólidos*

Atributos	Información
Identificación (ID)	E2
Nombre	Reducción del costo de disposición de residuos sólidos
Definición	Se evalúa el costo invertido en la disposición final de residuos del sistema de producción por unidad de peso, el cual es dividido entre el monto invertido en la evaluación anterior o dato histórico del sistema productivo. En caso el resultado sea negativo se interpreta como un incremento en la inversión y por ende un aumento en el precio del servicio o un incremento en la generación de RRSS y por ende una inversión superior a la presupuestada. Se considera entonces, una reducción del cero por ciento.
Fórmula	$E2 = \left(1 - \frac{Inv. \text{ soles actual}}{Inv. \text{ soles previo}}\right) \times 100\% \quad (5)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 12

Atributos del indicador Reducción del costo de suministro energético

Atributos		Información
Identificación (ID)		E3
Nombre	Reducción del costo de suministro energético	
Definición	La reducción de dinero invertido en un periodo de tiempo sobre la cantidad de energía empleada. Este indicador se articula con el indicador ambiental A3 Reducción de la intensidad energética, que cuantifica el uso de energía de fuente renovable, el cual influye también en la reducción del costo de suministro energético.	
	Observación: existen la posibilidad de que la reducción del costo de energía sea cero solo en los siguientes casos:	
	Caso 1: Si ya no hay mas lugar para la reducción de costos, es decir el gasto es cero y se mantiene en cero.	
	Caso 2: Si no se han efectuado actividades para el uso de fuentes renovables de energía.	
	Caso 3: El costo de la energía ha tenido un incremento.	
Fórmula	Para el Caso 1 el resultado del indicador se considerará como 100% por la consecución del objetivo.	
	Para el Caso 2 el resultado del indicador se mantendrá en 0.	
	$E3 = \left(1 - \frac{CE_{actual}}{CE_{previo}}\right) \times 100\% \quad (6)$	
Fórmula	Donde:	
	$CE = \frac{\text{Costo total de energía}}{\text{Cantidad total de energía}} \quad (7)$	
	CE: Costo de energía	
Tipo de medida	Cuantitativo	
Unidad de medida	Porcentaje	
Escala temporal	Mensual	
Dirección	Maximizar	

Nivel de aplicación	Operacional
----------------------------	-------------

Tabla 13

Atributos del indicador Desviación del presupuesto de adquisición de materiales

Atributos	Información
Identificación (ID)	E4
Nombre	Logro del presupuesto de adquisición de materiales
Definición	Se evalúa la desviación presupuestaria del costo de adquisición de materiales para la producción. Observación: La desviación puede ser positiva o negativa. Para el caso de desviación con valor negativo, se procederá como indica la fórmula. En caso de tener una desviación positiva, el valor del indicador excedería el 100% por lo que se toma el valor mínimo posible de desviación que es 0.
Fórmula	$E4 = 100 + \left(\frac{D}{\text{Costo previsto}} \times 100\% \right) \quad (8)$ Donde: $D = \text{Costo previsto} - \text{Costo real} \quad (9)$ D= desviación
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 14*Atributos del indicador Eficiencia de consumo de materiales*

Atributos	Indicadores
Identificación (ID)	A1
Nombre	Eficiencia de uso de materiales
Definición	Se evalúa el rendimiento de la materia prima, tomando los valores de masa al ingreso y salida del flujo de producción. En caso de procesos Batch se toma por lote, en caso de procesos continuos se recomienda establecer periodos de tiempo de evaluación.
Fórmula	$A1 = \frac{\text{Peso del producto final}}{\text{Peso de materia prima}} \times 100\% \quad (10)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 15*Atributos del indicador Eficiencia de consumo de agua*

Atributos	Indicadores
Identificación (ID)	A2
Nombre	Eficiencia de uso de agua
Definición	La eficiencia del agua se calcula por medio de la obtención de agua aprovechada efectivamente dividida entre el agua total que ingresa al sistema de producción.
Fórmula	$A2 = \frac{\text{Agua aprovechada}}{\text{Agua consumida}} \times 100\% \quad (11)$ Donde: $\text{Agua aprovechada} = \text{Agua consumida} - \text{efluentes} \quad (12)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 16

Atributos del indicador Reducción de la intensidad energética

Atributos	Información
Identificación (ID)	A3
Nombre	Reducción de la intensidad energética
Definición	Se entiende la intensidad energética como la cantidad necesaria de energía para producir una unidad de producto. En caso de que la intensidad energética real sea mayor que la prevista, el resultado del indicador será negativo, por lo que el valor a consignar será cero.
Fórmula	$A3 = \left(\frac{DI}{Intensidad\ energetica\ prevista} \times 100\% \right) \quad (13)$ Donde: $I = \frac{Consumo\ total\ de\ energia - Energia\ de\ FR}{Total\ de\ unidades\ producidas} \quad (14)$ $DI = Intensidad\ prevista - Intensidad\ real \quad (15)$ Energía de FR = Energía de Fuente Renovable DI = Desviación de Intensidad energética
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 17*Atributos del indicador Porcentaje del producto con origen circular*

Atributos	Información
Identificación (ID)	A4
Nombre	Porcentaje del producto con origen circular
Definición	Se evalúa el porcentaje del producto cuya materia prima tenga como origen una fuente circular, sea del propio proceso o de uno ajeno.
Fórmula	$A4 = \frac{PMC}{PMT} \times 100\% \quad (16)$ Donde: PMC: Peso de materia prima de origen circular que ingresa al proceso. PMT: Peso total de la materia prima que ingresa al proceso
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 18*Atributos del indicador Porcentaje de reducción de generación de RRSS*

Atributos	Información
Identificación (ID)	A5
Nombre	Porcentaje de reducción de generación de RRSS
Definición	Se toman como valores de evaluación los pesos de RRSS generados, contrastando un dato anterior de evaluación, el valor proyectado o un valor promedio del proceso; versus el peso actual de los RRSS generados. Si el resultado del indicador es negativo, se entiende que no hubo reducción de generación de RRSS por lo que se asigna el valor cero.
Fórmula	$A5 = \left(1 - \frac{\text{Peso de RRSS generados ahora}}{\text{Peso de RRSS generados previamente}}\right) \times 100\% \quad (17)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 19

Atributos del indicador Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado

Atributos	Información
Identificación (ID)	S1
Nombre	Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado
Definición	Se evalúa el logro de producción de unidades por hora de manufactura esperados del sistema. El nivel de productividad esperado (PE), es establecido previamente, sea en la etapa de planificación, estudio de factibilidad u objetivo de la organización. En caso el nivel de productividad sea superado el resultado del indicador se consignará como cien.
Fórmula	$S1 = \frac{PR}{PE} \times 100\% \quad (18)$ Donde: PR: Nivel de productividad real PE: Nivel de productividad esperado $P = \frac{\text{unidades de producto final producidas}}{\text{horas empleadas para su manufactura}} \quad (19)$ P: Productividad
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 20*Atributos del indicador Porcentaje de accidentabilidad laboral*

Atributos	Información
Identificación (ID)	S2
Nombre	Porcentaje de accidentabilidad laboral
Definición	Se calcula la cantidad de accidentados por cada 100 personas expuestas, en el periodo de tiempo indicado en la ficha metodológica del indicador. Este indicador no evalúa la frecuencia o incidencia de los accidentes.
Fórmula	$S2 = \frac{\# \text{ personas accidentadas}}{\# \text{ personas expuestas a accidentes}} \times 100\% \quad (20)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Minimizar
Nivel de aplicación	Operacional

Tabla 21

Atributos del indicador Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación

Atributos	Información
Identificación (ID)	S3
Nombre	Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación
Definición	Se calcula el logro de la meta de horas de capacitación planificadas para un periodo de tiempo determinado. En caso el resultado exceda el límite superior se consigna como valor el cien por ciento.
Fórmula	$S3 = \frac{\text{Hrs de capacitacion realizadas}}{\text{Hras de capacitacion planificadas}} \times 100\% \quad (21)$
Tipo de medida	Cuantitativo
Unidad de medida	Porcentaje
Escala temporal	Mensual
Dirección	Maximizar
Nivel de aplicación	Operacional

4.1.5. Validación de indicadores

Posteriormente, se validó que los indicadores cumplieran con los 13 criterios en ambos niveles del Checklist de análisis de desempeño meta de indicadores de Ramos y Caeiro (2010) (Véase **Tabla 3**). La aplicación del checklist para cada indicador demostró que se cumplieron en totalidad como se detalla en el resumen de validación de indicadores de la **Tabla 22**

Tabla 22

Resultados de validación de indicadores en checklist

CRITERIOS DE EVALUACIÓN	DIMENSIONES DE SOSTENIBILIDAD											
	Económico				Ambiental					Social		
Nivel 1: Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3
Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Considera la facilidad de diseminación de la información resultante	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados
en la etapa de implementación y operación / acción**

Coherencia conceptual	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Sensibilidad a los objetivos y límites	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Alcance temporal y espacial definidos	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Relación costo/beneficio razonable.	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

T: Total , P: Parcial , N: Nula

Se demostró que todos los indicadores tienen una base científica y conceptual sólida, ya que fueron seleccionados tomando como referencia marcos de trabajo y trabajos de otros autores. Esto permitió que el Nivel I fuera desarrollado con éxito.

Respecto al criterio de sensibilidad a objetivos y límites, se validó por medio de la dirección a minimizar o maximizar de los atributos de diseño de cada indicador, adicionando que la unidad de medida es el porcentaje, los límites mínimo y máximo están establecidos de forma clara.

En cuanto al criterio metodológico para la recolección de datos, se puede obtener de los departamentos de contabilidad, finanzas, logística, registro de pago de servicios, manifiestos de residuos sólidos, reportes mensuales de SST y/o sus similares en las organizaciones. Para el caso de estudio se propuso usar la información técnica de Medina en 2019, que incluye una lista completa de las máquinas del proceso, sus características técnicas, los costos de inversión e información relevante del diseño de la planta industrial. Esta información en conjunto con los datos de horas mensuales o anuales trabajadas, los recibos de pago por consumo de servicios de agua y luz permiten el cálculo y escalamiento de valores para la evaluación de indicadores. Para el cálculo del resto de insumos, se cuenta con la formulación del producto, modelada también en SuperPro Designer para la aplicación en el caso de estudio, las ratios, costos de inversión, unidades totales producidas, kg de residuos gestionados, entre otros, son datos del componente ambiental que son de fácil acceso. Los datos de ingreso para el cálculo de indicadores del componente social son viables de obtener por considerarse información disponible en todo momento respecto al capital humano de la empresa y en base al trabajo realizado, los indicadores no requieren de análisis fuera de la organización.

El criterio del alcance temporal y espacial fue validado pues se definió una escala temporal de un año de análisis y a nivel operacional de la organización.

Se puede ver que los indicadores demostraron tener el desempeño ideal de acuerdo con los criterios evaluados confiriéndoles credibilidad y exactitud, esto se debe a que los atributos asignados a los mismos y la formulación de cálculo fueron realizados teniendo como referencia el checklist con el que se evaluarían posteriormente.

La metodología de evaluación de eficacia de indicadores basada en el conocimiento de expertos de Ramos y Caeiro (2010) es considerada de alta relevancia en el campo de estudio, tal como se muestra en el resultado del análisis cientométrico de las 1568 publicaciones y divulgaciones no financieras y la sostenibilidad entre los años 1991 y 2021 el que confirió un valor de alta importancia relativa en el área de estudio (Saini et al., 2022).

Se puede observar a partir del análisis de los indicadores resultantes, que los principios de la economía circular según citó Baldassarre et al. (2019) fueron tomados en cuenta casi en su totalidad: (a) Diseño del flujo para la reutilización del residuo: Indicador de retención de la materia prima a través del análisis de % del producto con origen circular. (b) Construcción de resiliencia: eficiencia del proceso, a través de los indicadores de eficiencia de uso de materiales y agua. (c) Dependencia de recursos renovables: energía, la consideración del uso de energía de fuentes renovables para el cálculo de la reducción de la intensidad energética, representada en el indicador de reducción de costo de energía. (d) Pensamiento en cascada, conservación del valor: disposición de residuos, eficiencia del reciclaje, a través de los indicadores de reducción de costo de disposición de RRSS, % de reducción de generación de RRSS.

El único principio que no contó con indicador ni elemento de análisis fue el de pensamiento sistemático ya que este considera la dimensión espacial territorial, así como las redes de provisión de recursos, lo cual estaría relacionado con los parques eco industriales y la

simbiosis industrial, aspectos que estaban fuera del alcance del presente estudio que fue solo hasta el nivel operacional.

DISCUSIÓN

Los indicadores seleccionados para la evaluación de sostenibilidad fueron diseñados para reflejar los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: ambiental, social y económico. Cada indicador se eligió con base en su relevancia para el sistema de valorización de residuos y el enfoque de economía circular. En particular, el indicador de ‘Eficiencia en el uso de materiales’ fue diseñado para capturar la capacidad del sistema de reducir residuos y optimizar el aprovechamiento de recursos, mientras que el ‘Porcentaje de empleo de materiales reciclados’ permite evaluar el nivel de circularidad en el proceso productivo.

Este diseño se alinea directamente con el objetivo específico de este estudio, ya que busca evaluar no solo el impacto ambiental, sino también las mejoras potenciales en la cadena de valor del producto, considerando tanto el contexto de la empresa como las prácticas internacionales de sostenibilidad en sistemas de valorización y circularidad. Así mismo, los indicadores se correlacionan con nueve de los Objetivos de Desarrollo Sostenible como se detalla a continuación en la **Tabla 23**.

Tabla 23

Correlación de los resultados de propuesta de indicadores y los ODS

Indicador	ODS 3	ODS 4	ODS 6	ODS 7	ODS 8	ODS 9	ODS 11	ODS 12	ODS 13
Logro de ganancias esperadas					X	X			
Reducción del costo de disposición de residuos							X	X	
Reducción del costo de suministro energético				X					X
Logro del presupuesto de adquisición de materiales					X			X	
Eficiencia de uso de materiales						X		X	
Eficiencia de uso de agua			X						X
Reducción de la intensidad energética				X					X
Porcentaje del producto con origen circular						X		X	
Porcentaje de reducción de generación de residuos sólidos							X	X	
Porcentaje de logro de nivel de productividad					X	X			
Porcentaje de accidentabilidad laboral	X				X				
Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación		X			X				

Los indicadores propuestos están estrechamente vinculados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reflejando un enfoque integral hacia la sostenibilidad. En el ámbito económico, el logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura (ODS 8 y ODS

9) y el logro del presupuesto de adquisición de materiales (ODS 8 y ODS 12) destacan por su contribución al crecimiento económico sostenible, la productividad industrial y el uso eficiente de recursos. Estos indicadores evalúan las prácticas financieras sostenibles y respaldan la innovación y desarrollo industrial.

Por otro lado, los indicadores ambientales como la reducción del costo de disposición de residuos sólidos (ODS 12 y ODS 11), la eficiencia de uso de materiales (ODS 12 y ODS 9) y la eficiencia de uso de agua (ODS 6 y ODS 13) abordan directamente la gestión eficiente de recursos y la mitigación de impactos negativos en el entorno. Estos indicadores evalúan la transición hacia modelos de economía circular y promueven la mejora de sostenibilidad en los sistemas productivos. Además, la reducción de la intensidad energética (ODS 7 y ODS 13) y el porcentaje del producto con origen circular (ODS 12 y ODS 9) subrayan la importancia de integrar tecnologías limpias y renovables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y cerrar ciclos de materiales.

Desde una perspectiva social, indicadores como el porcentaje de accidentabilidad laboral (ODS 8 y ODS 3) y el porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación (ODS 4 y ODS 8) evidencian el compromiso con el bienestar de los trabajadores. La capacitación continua no solo mejora la calidad del empleo, sino que también fortalece la resiliencia empresarial al desarrollar capacidades internas. Asimismo, el porcentaje de reducción de generación de residuos sólidos (ODS 12 y ODS 11) conecta los objetivos ambientales con beneficios sociales al mejorar la calidad de vida en comunidades urbanas y rurales.

Una comparación con estándares internacionales revela que los indicadores están bien alineados con las prácticas recomendadas por organizaciones como el Global Reporting Initiative (GRI) y el Environmental Performance Index (EPI). Sin embargo, se podría fortalecer su impacto adoptando una mayor granularidad en la medición, integrando subindicadores específicos que complementen el indicador obteniendo más detalles dentro de cada ODS, por

ejemplo para el indicador de Reducción de intensidad energética, la reducción de emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético.

En conclusión, la correlación entre los indicadores y los ODS demuestra una base sólida para evaluar la sostenibilidad en un sistema productivo. Sin embargo, el contexto local y las especificidades del sector deben ser considerados en su implementación para garantizar que las estrategias diseñadas tengan un impacto medible y duradero, alineado con las metas globales.

4.2. Sistematización de un índice compuesto de Sostenibilidad (ICS)

4.2.1. Normalización

Se consideraron valores mínimos y máximos dentro del rango de normalización percentil entre 0 y 100%. Al compartir la misma unidad de medida desde el diseño, se puede prescindir de cálculos adicionales.

Latif et al. (2017) emplearon y demostraron la feasibility de uso de la normalización percentil en el Indicador de Desempeño de Sostenibilidad propuesto considerando la naturaleza variada de los indicadores que agregaron. A partir de la revisión de literatura, al igual que el presente trabajo, cuando no se dispone de data precedente, se aborda el desafío considerando límites relativos para la comparación entre indicadores.

4.2.2. Ponderación de indicadores por cada componente de sostenibilidad

Haciendo uso de la metodología AHP a través del software *AHP Online System - AHP-OS* se ingresaron los indicadores agrupados por cada dimensión de sostenibilidad en una lista, la cual se trasladó al módulo de comparación por pares. En esta fase se utilizó la jerarquía de indicadores críticos propuesta por Ocampo et al. (2015) como base para la asignación de los valores relativos. Como parte de este proceso de jerarquización de indicadores, se realizaron ajustes sucesivos a las matrices de comparación por pares para mejorar su consistencia interna. En la **Tabla 24** se muestra cómo evolucionaron los juicios asignados a cada combinación de

criterios en las tres versiones sucesivas de la matriz de comparación por pares AHP de los indicadores económicos, ambientales y sociales, respectivamente. Cada juicio está expresado según la escala de Saaty (1 a 9), indicando el grado de preferencia del criterio A sobre el criterio B.

Inicialmente, la matriz presentó un índice de consistencia elevado ($CR = 48.7\%$), lo cual indicaba contradicciones en los juicios asignados entre criterios. En una segunda iteración, se aplicaron ajustes menores recomendados por el software AHP-OS, reduciendo el CR a 10.4% . Finalmente, se obtuvo una versión optimizada con un $CR = 1.5\%$, considerado aceptable según los estándares del método ($CR < 10\%$). En la **Tabla 24** se muestran las comparaciones por pares correspondientes a los CR o Índices de consistencia de cada versión.

Tabla 24

Comparación de juicios AHP por par de criterios en tres versiones sucesivas de la matriz.

Nº	Criterio A vs. Criterio B	Versión 1	Versión 2	Versión 3
1	Eficiencia de materiales vs. Eficiencia de agua	5	3	3
2	Eficiencia de materiales vs. Reducción intensidad energética	3	2	2
3	Eficiencia de materiales vs. Porcentaje circular del producto	5	5	5
4	Eficiencia de materiales vs. Reducción de RRSS	3	3	3
5	Eficiencia de agua vs. Reducción intensidad energética	3	2	2
6	Eficiencia de agua vs. Porcentaje circular del producto	1	2	2
7	Eficiencia de agua vs. Reducción de RRSS	1	1	1
8	Reducción intensidad energética vs. Porcentaje circular del producto	1	2	2
9	Reducción intensidad energética vs. Reducción de RRSS	3	3	3
10	Porcentaje circular del producto vs. Reducción de RRSS	1	1	1

Nota: Los valores corresponden a la escala de Saaty (1 = igual importancia, 3 = moderada, 5 = fuerte, 7 = muy fuerte, 9 = extrema).

Una vez corregida la consistencia de las matrices, en los casos necesarios, se procedió a obtener la ponderación de cada indicador en una escala de 0 a 100, posteriormente transformada a un rango normalizado de 0 a 1. Estos resultados se presentan en la **Tabla 25**, junto con la identificación de la dimensión correspondiente (Económica – E, Ambiental – A, Social – S). Con el fin de garantizar un tratamiento equilibrado entre las tres dimensiones de la sostenibilidad, en la fase final de cálculo del índice compuesto se aplicó una ponderación

equitativa (*equal weighting*), asignando un valor de 1/3 a cada subíndice. Este procedimiento asegura que ninguna dimensión tenga predominancia sobre las demás, manteniendo la coherencia con enfoques de sostenibilidad débil recomendados en la literatura (OCDE & JRC, 2008; Demastus & Landrum, 2023). El detalle de este proceso se presenta en la **Tabla 27**. Para visualizar los módulos de trabajo empleados en el software diríjase al **Anexo 8**.

Tabla 25

Equivalencias 0-1 de las ponderaciones de indicadores

Componente de sostenibilidad	Indicadores	Pesos resultantes de comparación por pares	Ponderación equivalente
Económico	E1	57.7	0.58
	E4	22.2	0.22
	E3	12.5	0.12
	E2	7.7	0.08
Ambiental	A1	47.9	0.48
	A3	21.3	0.21
	A4	11.3	0.11
	A2	10.1	0.10
	A5	9.4	0.10
Social	S1	72.7	0.73
	S2	20.0	0.20
	S3	7.3	0.07

*Nota: Los indicadores han sido agrupados por dimensión de sostenibilidad (E: Económica, A: Ambiental, S: Social). Las ponderaciones mostradas son relativas dentro de cada dimensión. La agregación final de cada subíndice en el índice compuesto se presenta en la Tabla 14, donde se aplicó una ponderación equitativa entre dimensiones (*equal weighting*: 1/3 para E, A y S).*

Dentro del subíndice económico, el indicador con peso resultante mayor fue el E1, el A1 dentro del subíndice ambiental y el S1 dentro del subíndice económico.

E1: Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura

A1: Eficiencia de uso de materiales

S1: Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado

Si se toma en cuenta cuan relevante es el aspecto económico para la consecución de la sostenibilidad es razonable que los indicadores con mayores pesos tengan repercusión directa sobre el balance económico.

4.2.3. Agregación de indicadores en subíndices de sostenibilidad

Los factores de ponderación en escala normalizada de 0-1 son presentados en una tabla modelo de sistematización de cálculo de subíndices (***Tabla 26***) que sirve de guía al evaluador al momento de hacer ingreso de los valores obtenidos tras la aplicación de los indicadores.

Tabla 26*Modelo de sistematización del cálculo de subíndices*

Indicador	Resultado	Normalización 0-1	Factor de ponderación	Resultado ponderado
Indicadores económicos				
E1	_____	_____	0.58	_____
E2	_____	_____	0.08	_____
E3	_____	_____	0.12	_____
E4	_____	_____	0.22	_____
Subíndice económico = _____				
Indicadores ambientales				
A1	_____	_____	0.48	_____
A2	_____	_____	0.10	_____
A3	_____	_____	0.21	_____
A4	_____	_____	0.11	_____
A5	_____	_____	0.10	_____
Subíndice ambiental = _____				
Indicadores sociales				
S1	_____	_____	0.73	_____
S2	_____	_____	0.20	_____
S3	_____	_____	0.07	_____
Subíndice social = _____				

La sistematización de indicadores ordenadamente por subíndices de cada componente de la sostenibilidad resalta las diferencias entre los pesos asignados para cada indicador. Estos valores de ponderación reflejan similitudes con trabajos a nivel micro de la circularidad como los de Krajnc y Glavič (2005) en el que el alcance fue una multinacional de manufactura de productos químicos, que cuenta con gestión ambiental implementada por más de 5 años y realiza reportes de sostenibilidad anualmente, a pesar de que se le considera en un grado de madurez de sostenibilidad avanzado.

Dentro de los indicadores ambientales Krajnc y Glavič evaluaron el consumo total de energía, consumo de recursos, producción de masa, emisiones, efluentes, emisión de metales pesados, residuos para el reciclaje, residuos para la disposición, residuos peligrosos, etc. Dentro de ellos, el indicador con mayor peso fue aquel que evaluó las emisiones de metales pesados en aguas superficiales con 0.1 de 1, considerando que tiene el peso del 10% entre 22 indicadores, se denota la importancia que se le confiere por ser ese el mayor riesgo ambiental que un proceso de manufactura de productos químicos representa. Mientras que bajo un enfoque de circularidad, la eficiencia de materiales es crítica y se refleja en el peso asignado al indicador.

Similar a los autores mencionados, se ha considerado también la seguridad y salud de los trabajadores, así como la creación de capacidad a través de actividades formativas, sin embargo no se ha incluido la evaluación de la influencia de pobladores aledaños el cual fue el indicador con mayor valor en la dimensión social entendiendo que la población juega un rol importante dentro de la visión de la organización y su presencia en países de diferentes características sociodemográficas, contrastando la naturaleza de los indicadores por atribuida al grado de madurez de sostenibilidad de ambos casos de estudio a pesar de que ambos sean enmarcados en un nivel micro.

Dentro de los indicadores económicos, Krajnc y Glavič asignaron al beneficio operativo, las ventas y las ganancias netas los mayores pesos. El presente trabajo considera indicadores de similar naturaleza y adiciona la reducción de costos al subíndice económico por considerarse la recirculación de la materia prima como un activo para el logro de economía circular.

La fuerte orientación de las metodologías hacia el aspecto ambiental de la sostenibilidad es tendencia entre los estudios de evaluación del rendimiento de Economía Circular (Sassanelli et al., 2019) de hecho, el presente estudio no solo considera el componente ambiental si no que

también cuenta con la mayor cantidad de indicadores dentro de este y toma en cuenta la variable de origen del producto, energía, recursos y se enmarca dentro de un grado de circularidad definido tal como se propone en el marco de trabajo de Sassanelli et al. (2019).

4.2.4. Agregación de subíndices para el cálculo del índice compuesto de sostenibilidad

Se asignó un peso equitativo de 1/3 para cada uno, basado en el concepto de sostenibilidad débil como recomiendan organismos internacionales como OCDE & JRC (2008). Se muestra en la **Tabla 27** el modelo de sistematización de cálculo del índice compuesto a través de la ponderación del resultado de los subindicadores.

Tabla 27

Modelo de sistematización del cálculo del Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) mediante subíndices con ponderación equitativa (1/3) por dimensión

SUBÍNDICE	RESULTADO	FACTOR DE PONDERACION	RESULTADO PONDERADO
Económico	_____	1/3	_____
Ambiental	_____	1/3	_____
Social	_____	1/3	_____
INDICE COMPUESTO DE SOSTENIBILIDAD = _____			

Nota: El valor total del ICS se obtuvo sumando los tres subíndices multiplicados por un peso uniforme (1/3) para cada dimensión, en correspondencia con el enfoque de sostenibilidad débil adoptado en este estudio.

Son varios los autores que sustentan el “*equal weighing*” como el enfoque de trabajo para la sostenibilidad por su simplicidad, transparencia y facilidad de replicación. Según la OCDE & JRC (2008), este método asigna el mismo peso a todos los componentes con el fin de operacionalizar la sostenibilidad y conferir igual significancia, de modo que los impactos

en uno pueden ser contrarrestados por un buen desempeño en otro. En esa línea, se reconoce que dicho enfoque se enmarca en la llamada “sostenibilidad débil”, la cual, si bien es objeto de críticas, presenta ventajas como la flexibilidad en el manejo de recursos, la adaptabilidad al cambio y la posibilidad de facilitar un desarrollo económico más rápido en contextos donde la mejora de la calidad de vida resulta prioritaria. Demastus y Landrum (2023) destacan que la mayoría de metodologías de sostenibilidad empresarial tienden a alinearse preferentemente con este enfoque, en consonancia con los modelos económicos neoclásicos.

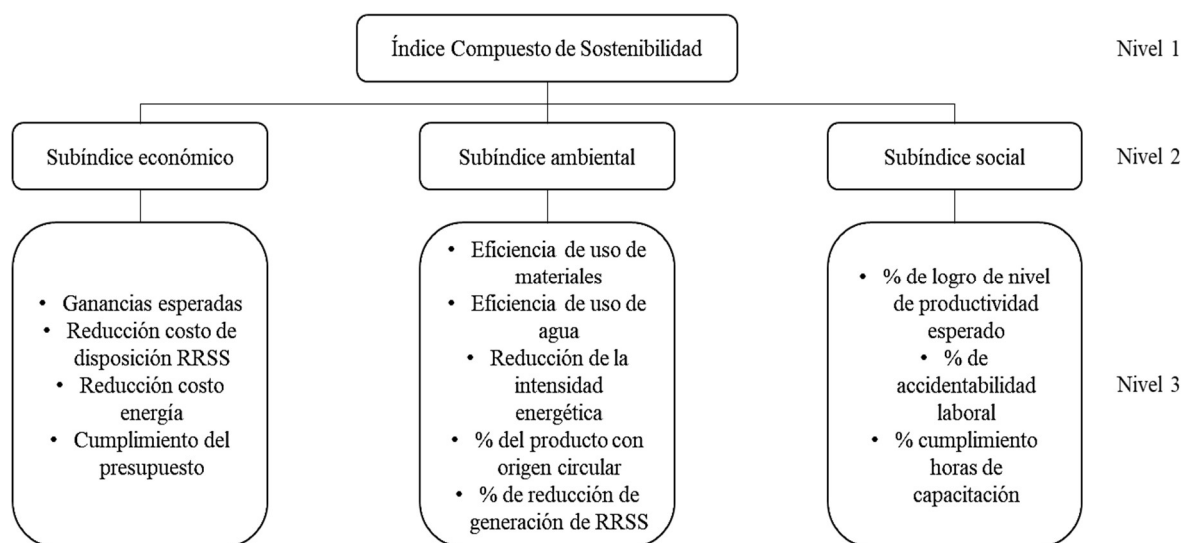
Para el contexto local peruano, en el que se ha realizado el presente estudio y debido a la poca madurez de sostenibilidad de los modelos de negocio circulares, así como la limitación de disponibilidad de información, es beneficioso aprovechar la flexibilidad y adoptabilidad del enfoque de sostenibilidad débil. Este enfoque no solo permite aprovechar su flexibilidad y adaptabilidad, sino que también se convierte en un punto de partida metodológico adecuado para la construcción de índices compuestos, brindando consistencia y viabilidad al análisis en escenarios con restricciones de datos.

4.2.5. Representación gráfica

Una vez finalizado el set de indicadores y su agrupación en subíndices e índice compuesto, se prosiguió con la representación gráfica (**Figura 3**) siguiendo el modelo propuesto en la metodología, en dicho gráfico se plasmó el orden de todos dentro del marco y siguiendo la jerarquía que facilita el entendimiento del índice compuesto.

Figura 3

Representación gráfica de la jerarquía del Índice Compuesto



Se puede notar claridad en su estructura al estar separada por dimensiones y es coherente con el marco conceptual del trabajo, pudiendo enriquecerse posterior a la validación de indicadores con una representación gráfica ampliada de forma poligonal que visualice los pesos asignados de cada uno de ellos.

DISCUSIÓN

La metodología para la creación de los indicadores e índices de sostenibilidad en el contexto de este estudio es fundamental para garantizar su relevancia, aplicabilidad y capacidad de evaluación integral. Aquí se discute críticamente cada etapa del proceso metodológico con sugerencias para su fortalecimiento.

La selección de indicadores tuvo un enfoque adaptativo, pues sus características se alinean con el sistema evaluado de manera que asegura su relevancia en la práctica. Mas se identifica la dependencia de la disponibilidad de datos, algunos indicadores clave podrían haber quedado excluidos por falta de información. Es necesario incorporar metodologías para abordar datos incompletos.

Concerniente a la sistematización y normalización, la normalización realizada con un método claro asegura que los valores sean comparables entre dimensiones con diferentes unidades y escalas de manera homogénea y facilitando su agregación. El uso de criterios basados en metas refleja el desempeño respecto a valores óptimos o límites aceptables.

Respecto a la ponderación de indicadores, se empleó el método Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty para ponderar los indicadores, basándose en la opinión de expertos. Esta es una herramienta estructurada que ofrece un enfoque riguroso para priorizar indicadores según su importancia relativa y asegura que las ponderaciones reflejen conocimientos especializados. Para contextualizar la metodología de manera local, se podrían utilizar técnicas como encuestas Delphi para contrastar las ponderaciones obtenidas mediante AHP.

En la agregación en el Índice Compuesto se respetó una estructura jerárquica, permitiendo un análisis detallado por dimensión antes de consolidar un resultado global. El índice resultante es flexible pues puede adaptarse a diferentes contextos al ajustar ponderaciones o incorporar nuevos indicadores. Contrastando la estructura del índice con herramientas similares, se pueden evidenciar oportunidades de mejora en la integración de indicadores. Como el establecimiento de marcos más detallados para la selección y justificación de indicadores como el método de GRI, incorporar indicadores relacionados con el cambio climático y la biodiversidad para fortalecer el componente ambiental como lo hace el Environmental Performance Index (EPI), priorizar indicadores que evalúen el ciclo de vida de productos y su reingreso al sistema productivo como Circular Economy Indicators (EC Indicators).

En conclusión, la metodología adoptada para crear los indicadores e índices es sólida y permite una evaluación integral de la sostenibilidad. Sin embargo, podría fortalecerse con:

- Mayor alineación con estándares internacionales para garantizar su aplicabilidad en otros contextos.
- Inclusión de indicadores avanzados relacionados con cambio climático, biodiversidad y circularidad en la cadena de suministro.

Estas mejoras no solo aumentarían la robustez del índice, sino también su capacidad para ser adoptado como un referente en evaluaciones de sostenibilidad.

4.3. Validación del índice de sostenibilidad en el sistema de valorización

4.3.1. Modelamiento

Para la simulación en el software SuprePro Designer, se consideró una planta hipotética de procesamiento de viruta de cuero proyectada por Medina en el 2019, con un ingreso mensual de 6600 kg de viruta al proceso y produciendo 812 planchas de cuero reconstituido.

Para la modelación, el programa requiere:

- Configuración del proceso
- Propiedades de los materiales
- Parámetros de operación
- Equipamiento y configuración del sistema
- Cinemática de los procesos
- Especificaciones del producto final

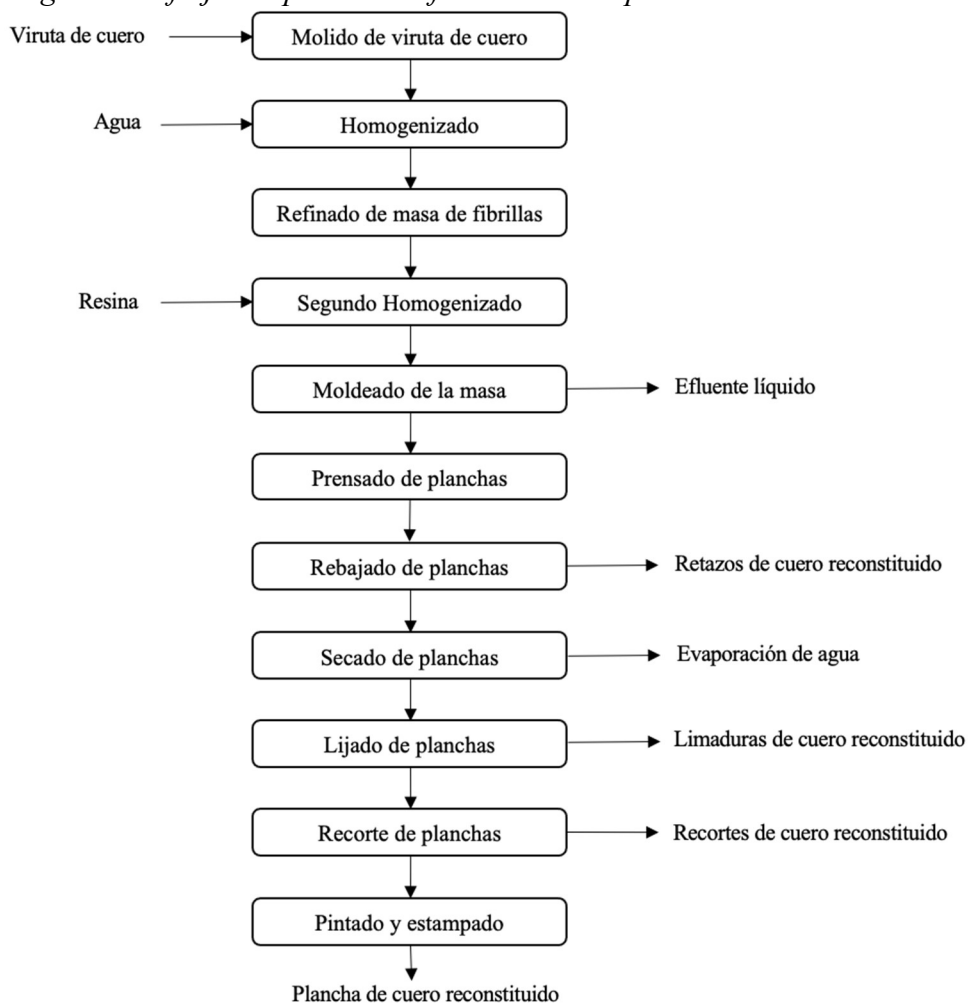
Respecto a la configuración inicial del proceso, la fabricación de planchas de cuero reconstituido se divide en cuatro unidades. La primera etapa abarca el acondicionamiento de la

materia prima, desde la recolección de virutas hasta el refinado. La segunda unidad se enfoca en el mezclado y moldeado de la masa resultante, seguido por la tercera unidad que comprende el prensado y secado de las planchas. Finalmente, la cuarta unidad se encarga del acabado y confección, incluyendo operaciones de lijado, corte y pigmentación. Una vez completado el proceso, las planchas de cuero se trasladan al almacén de productos terminados (Medina, 2019). El proceso ha sido representado gráficamente en un diagrama de flujo en la **Figura 4**, el mismo fue empleado para la selección de operaciones unitarias en la modelación.

Las planchas de cuero reconstituido obtenidas constituyen el producto valorizado del sistema y su destino principal es el sector de manufactura de calzado, marroquinería, tapicería y revestimientos, donde el cuero reconstituido se emplea como sustituto de menor costo del cuero genuino en componentes de refuerzo, plantillas, forros y artículos de bajo requerimiento estructural. Esta salida confiere valor comercial al residuo que, bajo el proceso tradicional, sería clasificado y gestionado como residuo peligroso (D.S. 009-2019-MINAM), y sustenta el desempeño del subíndice económico obtenido en la evaluación. De este modo, el sistema modelado no solo desvía la viruta de su disposición final, sino que la reincorpora a la cadena de valor como insumo con demanda establecida en el mercado.

Figura 4

Diagrama de flujo del proceso de fabricación de planchas de cuero reconstituido



Nota: Elaboración propia

Los parámetros de operación empleados en la simulación, provinieron de dos fuentes, la primera de los datos bibliográficos y de fichas técnicas, configuración de tamaño de equipos y flujo inicial de entrada de materias primas de acuerdo al tamaño de la operación presentada por Medina en 2019; la segunda de la propia base de datos de SuperPro Designer como información de conocimiento general como el pH del agua, alcohol, metanol, los cambios de temperatura por uso de las máquinas, tiempos de procesamiento ajustado y demás flujos son parte de la utilidad del programa y presentados como parte de los entregables de la modelación.

Respecto a las propiedades de los materiales de ingreso, se emplearon las fichas técnicas de resina y pintura, así como bibliografía de caracterización de la viruta de cuero procesada en instalaciones de curtiembres locales realizada por Alvarez Oviedo y Zegarra Rondón (2017) tal como se muestra en la **Tabla 28**.

Tabla 28

Caracterización de elementos de materia prima ingresante al proceso

Materias primas	Descripción del elemento	Formato de ingreso a SPD
Viruta de cuero	Residuo de la etapa de rebajado del proceso de curtido de cuero convencional, tiene contenido de proteína, grasa, cromo y alto contenido de humedad.	Proteína 57.8%
		Grasa 1.7%
		Sulfato de Cromo
		25.5%
	La viruta que ingresa al sistema debe estar seca por lo que el componente agua se ha reducido hasta el 15% en lugar del 40%	Agua 15%
Agua	Agua de conducto de suministro potable, el SPD le confiere las características propias del elemento.	Agua 100%
Resina	Vinnapas 400 de Wacker es una resina de alcohol polivinílico, usado como base aglomerante.	
	Otorga características como fuerza y flexibilidad.	Alcohol polivinílico
		100%
	Alta resistencia a la humedad y temperatura. (Ver ficha técnica en Anexo 4)	

Pintura	La pintura tradicional para procesos de curtido se compone principalmente de anilina, metanol y pigmentos. Se toma de referencia los dos componentes principales. El material de pintado fue seleccionado por el origen y características de la materia prima.	Anilina 25% Metanol 75%
---------	--	---------------------------------------

Posteriormente se ingresaron los parámetros de operación por cada unidad, que incluyen condiciones de temperatura, presión, pH brindados por la base de datos del programa en base a la composición de la materia prima y fichas técnicas (**Tabla 28**), los tiempos de reacción, velocidad de agitación, caudales de alimentación y otros factores que afectan el rendimiento y la eficiencia del proceso (**Tabla 29**). Se presenta el desarrollo de las diferentes configuraciones de equipos y de proceso en las siguientes secciones.

En esta etapa inicial se consideró también la capacidad de la maquinaria del sistema, la demanda eléctrica de los equipos, así como sus capacidades operativas, la lista de equipos está conformada por un molino de cuchillos, tanques homogenizadores de base cóncava y con agitador mecánico, bombas centrífugas, bomba de vacío, prensa, rebajadora, lijadora y pigmentadora. En la **Tabla 29** se ha incluido también un equipo de cero consumos eléctricos para representar ordenadamente el proceso y porque el traslado de la materia hacia y desde el moldeador constituye parte fundamental para los pasos posteriores.

Tabla 29*Configuración de equipos y demanda eléctrica*

Equipos	Características	Demanda eléctrica (kW/h)
Molino de cuchillos	Capacidad: 100 kg/ hora Potencia 9 HP	2.61
Tanque homogeneizador de base cóncava	Capacidad: 1000 litros Potencia 0.5 HP	0.66
Bomba centrífuga con acoplamiento helicoidal	Corriente de operación: 2.52	1.04
Refinador de doble disco	6-10 Ton/día Frecuencia de disco: 970 rpm	25.9
Tanque de homogenización con agitador mecánico	1300 litros Velocidad 60-100 rpm Potencia 0.5 HP	0.66
Bomba centrífuga con acoplamiento helicoidal	Corriente de operación: 2.52	1.04
Moldeador (Cajas de vacío)	Cajas de base porosa, dimensiones de 1.00 x 1.40 m	0.00
Bomba de vacío de anillo líquido	200-260 m3/hora Potencia 7.5HP Presión de vacío de 33-900 milibar	3.92
Prensa	Capacidad: 1 banda Presión (PSI): 100-150	7.77
Rebajadora	Capacidad: 1 banda Velocidad: 1500 rpm	24.36
Cordel aéreo de secado	Potencia 10 HP	6.74
Lijadora	Capacidad: 1 banda Potencia 20 HP	13.47

Para abordar la cinemática del proceso, que comprende los tiempos de residencia, flujos de materiales y energía así como otros detalles de la dinámica del proceso se extrapolaron las duraciones de las operaciones unitarias de minutos a horas como se muestra en la **Tabla 30** así como el resto de información se proyectó a 12 batches de un mes de duración aproximada cada uno ya que SuperPro Designer hace por defecto una proyección anual de los procesos que modela.

Tabla 30

Tiempos de proceso proyectados y modelados

Proceso unitario	Tiempo de batch proyectado (minutos) <i>Medina (2019)</i>	Tiempo de batch ingresado al programa (horas)
Molido	33	120
Primera homogenización	11	55
Refinado	10	7
Segunda homogenización	11	55
Moldeado de planchas	24	60
Prensado de planchas	-	8
Rebajado	20	27
Secado	540 (*)	24
Lijado	18	14
Recorte	11	6
Pintado o estampado	11	6
Total Batch	139	382

Nota: () No considerado en la duración total del proceso proyectado, solo se tomó el tiempo de transferencia entre el proceso de rebajado y secado – secado y lijado.*

Siguiendo la misma estimación, se ingresaron los pesos de la materia prima que ingresarían al proceso (Tabla 31).

Tabla 31

Flujos de ingreso de materiales al proceso

Material	Cantidad (kg/mes)
Agua	400
Viruta de cuero	6000
Resina	2200
Pintura	870

Los costos operativos se ingresan en cada etapa de configuración y secuencia de operaciones del proceso, con el fin de agrupar los costos de inversión se agrupó toda la información tal como requiere el software en la **Tabla 32**.

Tabla 32

Costos operativos

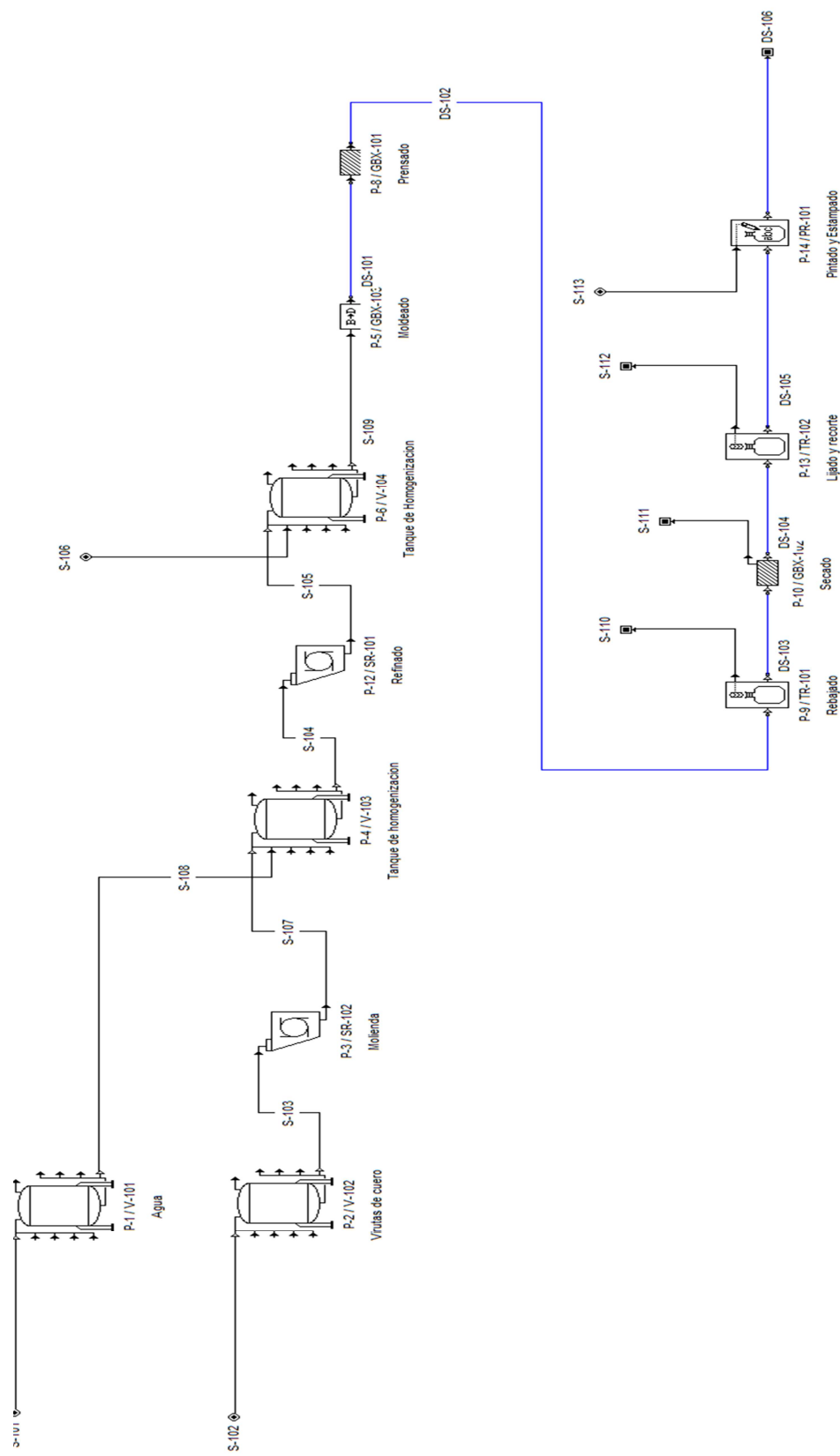
Costos de materia prima		
Item	Unidad	Valor
Agua	Soles/m ³	5.31
Electricidad	Soles/kWh	0.78
Viruta de cuero	kg	0
Resina	Soles/gal	17
Pintura	Soles/kg	13
Costo de mano de obra		
Tipo de puesto	Soles/mes	Cantidad de personal
Operario	1400	05
Supervisor	1900	01

Así mismo se consideró la información de costos del activo tangible por maquinarias, equipos y bienes duraderos de acuerdo con el presupuesto presentado a FIDECOM la cual

asciende a S/. 152,400.00 y fue ingresada en la moneda de dólares americanos USD al tipo de cambio promedio entre el nuevo sol y el dólar.

Una vez finalizado el input de toda la información, se obtuvo como primer resultado el gráfico de equipos y las conexiones a partir de los flujos y tipo de operaciones unitarias (***Figura 5***), de manera que en cada unidad se puede acceder a información detallada del flujo de materia, tiempo, energía, etc.

Figura 5
Proceso modelado en SuperPro Designer



La Figura 5 muestra el Diagrama de Flujos del proceso de Producción de Cuero Regenerado a partir de virutas de cuero, residuo sólido de la industria peletera. El diagrama señala el up-stream y el down-stream de dicho proceso.

Acorde a SuperPro Designer el up-stream inicia con la carga de las materias primas a los tanques de alimentación V-101 y V-102, y termina con la operación unitaria de mezclado entre el polímero aglomerante, las virutas de cuero pre tratadas y el agua, dentro del tanque de homogenización V-103. Mientras que, el down-stream inicia con la operación de moldeado y termina con la operación unitaria de pintado y estampado. Las corrientes que unen estas diferentes operaciones unitarias, están coloreadas de azul, para las que pertenecen al down-stream, y de negro, aquellas que conforman el up-stream.

Como segundo resultado de la modelación, el programa genera reportes de flujo de materiales, de costos y rentabilidad, impacto ambiental entre otros.

Los datos empleados para la validación en el índice de sostenibilidad fueron obtenidos a partir del Reporte de Corrientes y Materiales (**Anexo 5**), así como el Reporte de Evaluación Económica (**Anexo 6**) generados por SuperPro Designer para el proceso.

Los resultados mostrados en la **Tabla 33** son el resumen del reporte de materiales para un tamaño de planta de x6600, es decir que se ha aumentado o escalado hasta llegar a un flujo de alimentación de sustrato de 6600 kg de virutas de cuero por batch, y donde la relación virutas de cuero-agua es 15:1.

Si bien el proceso fue diseñado para trabajar un aproximado de 2600 horas por año, la simulación hecha por el SPD, arrojó un tiempo óptimo de operación de 2653.49 horas para asegurar la producción de la cantidad de planchas de cuero deseadas.

Tabla 33*Resumen ejecutivo del reporte de materiales SuperPro Designer*

Tiempo de Operación Anual (h)	2653.39
Velocidad Referencial de Producción Unitaria (unidades/año)	10490.1
Tamaño del Batch o Lote (unidades)	524.51
Tiempo del Batch o Lote (h)	293.59
Tiempo del Ciclo (h)	124.20
Numero de Batches por Año	20.00

Esta información indica que aproximadamente se tendrían 9 batches por año, por lo que en cada mes se lograría el trabajo de 0.75 batches. Se proyectó un ingreso de materia prima de 6600 kg por batch y cada batch duraría un mes, sin embargo, la cinemática y flujos de materia proyectados indicaron que con la cantidad de horas de trabajo ingresadas, la eficiencia del proceso se ve afectada aún después del ajuste del programa. Comparado con el tiempo que se podría haber utilizado en caso de hacer un batch continuo, la eficiencia del proceso es del 30.33%.

Dicho análisis se ve avalado por la Evaluación Económica hecha por el SPD, este proceso a una escala de x6600, no es rentable ni factible, los indicadores de rentabilidad y viabilidad como el ROI (Retorno de la inversión) y el NPV (Margen bruto) se muestran en negativo, lo cual no es una buena señal para la puesta en marcha de este proceso (**Tabla 34**).

Tabla 34*Resumen ejecutivo del reporte económico SuperPro Designer*

Inversión total de capital (\$)	2999000.00
Inversión total de capital cargada al proyecto (\$)	2999000.00
Costo operacional (\$/anual)	1353000.00
Ganancias (\$/anual)	797000.00
Proporción anual de costo base (unidades/anual)	10490.00
Costo por unidad de producción (\$/unidad)	129.02
Ganancia por unidad de producción (\$/unidad)	76,00
NPV: Margen bruto (%)	-69,76
ROI: Retorno de la inversión (%)	-10,2

El NPV o Valor Presente Neto es un indicador financiero que muestra la rentabilidad de un proyecto. Un ROI negativo indica que el proyecto no genera suficientes ganancias para cubrir el costo de la inversión inicial. Ambos indicadores fueron calculados en una escala de tiempo anual.

Si se considerara, a beneficio de la empresa de manufactura la subvención del 24% de la inversión total ,equivalente a 719,760 dólares lo cual reduce su inversión inicial a 2279240 USD pero sin reducir el costo operacional, el ROI a un año pasaría a ser del 34.99% lo que significa que por cada dólar invertido, el proyecto generaría 0.35 dólares de ganancia. Teniendo este flujo de efectivo en consideración se podría estimar que durante el primer año el NPV no mostraría mejoras significativas, pero podría generar ganancias netas positivas en caso el flujo se mantenga estable o incremente. Dicho análisis también fue abordado por Medina (2019) quien aplicando indicadores como VAN y TIR sugiere que la inversión generará ganancias suficientes para garantizar la rentabilidad del proyecto.

Sin embargo, queda claro que incrementando la eficiencia del proceso al trabajar por batches más largos se puede lograr la sostenibilidad financiera de la inversión incluso antes de la subvención económica recibida por el proyecto.

Autores como Gómez et al. (2020) compararon dos casos escenario en el que se emplearon los reportes del software SuperPro designer para sustentar la diferencia en ingresos económicos y factibilidad de la implementación de un proyecto de valoración de residuos, de modo que se facilite la elección de modalidades de trabajo en su proyecto. De manera similar al presente estudio, la proyección y simulación permiten mejorar la toma de decisiones previas a la implementación de modelos nuevos de negocio o proceso.

La principal diferencia entre ambos trabajos sería que los autores utilizaron la herramienta WARGUI para el análisis de factibilidad ambiental del proyecto, el cual identificó áreas potenciales para la reducción de residuos y estimación de su impacto. Mientras que, para el presente estudio, la información del Reporte del Impacto Ambiental (**Anexo 7**) fue la base de para la aplicación del Índice Compuesto de Sostenibilidad.

4.3.2. Aplicación del índice de sostenibilidad

Para validar la practicabilidad del uso de Índice Compuesto se evaluó el caso de estudio modelado en el punto anterior siguiendo el orden de la **Tabla 26** de la sección SISTEMATIZACION. Se recomienda el uso de la herramienta Microsoft Excel como guía para la validación. Como se ha comentado líneas arriba, cada batch tiene un mes aproximado de duración.

En el caso del indicador económico E1: Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura, para el cálculo de la Ganancia (Real o Proyectada) se consideran los ingresos totales por batch y el Costo total de manufactura, donde la viruta de cuero como materia prima

principal juega un rol importante puesto que su costo es cero y permite mantener un precio de venta al mercado que genera ingresos suficientes para exceder la Ganancia Proyectada. Como se muestra en la *Tabla 35*, la ganancia real obtenida fue aproximadamente 205% de la ganancia proyectada. Esto representa un cumplimiento excepcional de las expectativas de rentabilidad. Recalcando que este resultado refleja solamente los costos de fabricación y no de la inversión.

Tabla 35

Cálculo de E1 - Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura

	Cálculo Ganancia real	Cálculo Ganancia proyectada
Ingresos totales (sol/mes)	66416.7	61712
Costo total de manufactura (sol/mes)	57529	57683.83
Total de unidades producidas (und)	874	812
Total	10.16899314	4.960800493
Formula de cálculo	$E1 = \frac{GR}{GP} \times 100\%$	
Resultado (%)	205	

Dado que el valor máximo admisible para el indicador es 100, se tomará ese valor para la fase de agregación.

Para el indicador E2, previo al sistema de valorización, la generación y gestión de residuos se hacía en base a 6600 kilos de viruta de cuero generada al mes, los cuales, al ser reaprovechados en otro sistema, dejan de ser gestionados. Acorde al reporte de Flujo de Materiales, los residuos generados por batch son 1042.69 kg. Considerando un valor referencial de 1000 soles por tonelada gestiona, se obtiene un resultado de 84.20%, lo que muestra una

reducción considerable en el costo de inversión por tonelada para la disposición de residuos sólidos. Los valores y fórmula de cálculo del indicador se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36

Cálculo de E2 - Reducción del costo de disposición de RRSS

	Inversión actual (sol)	Inversión previa (sol)
Inversión (sol/mes)	1042.69	6600
Formula de cálculo	$E2 = \left(1 - \frac{Inv. \text{ soles actual}}{Inv. \text{ soles previo}}\right) \times 100\%$	
Resultado (%)	84.20	

A pesar de que el Costo total de energía actual es menor que el Costo previo, el origen ha sido desde la misma fuente de SEAL, por lo que el costo es proporcional. En caso se tuviera energía de una fuente como la luz solar, los costos se reducirían y serían indicador de acción de sostenibilidad. El resultado de 0.00 indica que, según la fórmula aplicada, no se registró ninguna reducción (0%) en el costo de suministro energético, por lo que no hay aporte a la circularidad en este resultado. Se muestran los valores de cálculo en la Tabla 37.

Tabla 37

Cálculo de E3 - Reducción del costo de suministro energético

	Costo de energía actual	Costo de energía previo
Costo (Soles)	7345.72	18964.23
Cantidad de energía empleada (kW/h)	104.75	270.43
Total	70.13	70.13
Formula de cálculo	$E3 = \left(1 - \frac{CE_{actual}}{CE_{previo}}\right) \times 100\%$	

Resultado (%)	0.0
----------------------	------------

Para el cálculo del indicador E4, un resultado de **100.00** indica un **cumplimiento total del presupuesto**. Dado que el costo real de adquisición de materiales (41,952), el indicador registra que se cumplió la meta presupuestaria. Este resultado se justifica en la planificación previa por el piloto y el escalamiento industrial que tuvo como objetivo ajustar los parámetros y operaciones unitarias para el logro del presupuesto. Los valores de cálculo se muestran en la **Tabla 38**.

Tabla 38

Cálculo de E4 - Cumplimiento del presupuesto de adquisición de materiales

	Costo previsto	Costo real
Costo (sol/mes)	41952	41020
Formula de cálculo	$E4 = 100 + \left(\frac{D}{Costo\ previsto} \times 100\% \right)$	
Resultado (%)	100.00	

El primer indicador ambiental, A1, está enfocado en eficiencia de consumo de materiales y tuvo como resultado el **51.24%**. Esto significa que, de la masa total de materia prima ingresante (12.37 kg/plancha) **poco más de la mitad (51.24%) se convierte en el peso del producto final** (6.34). Esta pérdida de masa se justifica en el uso de materiales líquidos, como el agua que se evapora, la resina líquida que se filtra y el secado final del producto que reduce % de humedad. Se muestra el cálculo en la **Tabla 39**.

Tabla 39*Cálculo de A1 - Eficiencia de consumo de materiales*

	Peso del producto final	Peso de la materia prima
Peso por plancha (kg)	6.34	12.37
Formula de cálculo	$A1 = \frac{\text{Peso del producto final}}{\text{Peso de materia prima}} \times 100\%$	
Resultado (%)	51.24	

Para el cálculo del indicador A2, se tomaron como datos los valores de agua que ingresa al proceso versus el elfuente de agua, lo que refleja la cantidad de agua aprovechada. Este valor significa que **solo el 31.87% del agua consumida total es clasificada como agua aprovechada**, el resto fue identificado en el Reporte de Flujo de materiales como salida de agua. Se muestra el cálculo en la **Tabla 40**.

Tabla 40*Cálculo de A2 - Eficiencia de consumo de agua*

	Agua aprovechada	Agua consumida
Cantidad de agua (kg/mes)	1267.48	3977.19
Formula de cálculo	$A2 = \frac{\text{Agua aprovechada}}{\text{Agua consumida}} \times 100\%$	
Resultado (%)	31.87	

El resultado de **6.51%** del indicador A3 refleja que **se logró una reducción del 6.51% en la intensidad energética**. Esto se debe a que la intensidad energética real , simulada en SuperPro, fue menor que la intensidad prevista por Medina (2019), indicando una mejor

eficiencia energética por unidad producida de lo esperado. Se muestra el cálculo en la **Tabla 41**.

Tabla 41

Cálculo de A3 - Reducción de la intensidad energética

	Intensidad real	Intensidad prevista
Consumo total de energía (kW/h)	104.75	104.1
Energía de origen renovable (kW/h)	0	0
Total de planchas producidas (und)	874	812
Total	0.119851259	0.12820197
Fórmula de cálculo	$A3 = \left(\frac{DI}{Intensidad\ energetica\ prevista} \times 100\% \right)$	
Resultado (%)	6.51	

El resultado del indicador A4, equivalente a dos tercios (66.87%) de la materia prima total ingresada (kg/batch) proviene de origen circular. El peso de la materia prima con origen circular corresponde las virutas de cuero, mientras que el total de Materia Prima Ingresante es la sumatoria del peso de todos los materiales del batch. Se muestra el cálculo en la **Tabla 42**.

Tabla 42*Cálculo de A4 - Porcentaje de producto con origen circular*

	Peso de Materia Prima con origen circular (PMC)	Peso total de Materia Prima ingresante (PMT)
Peso (kg/batch)	4340	6490.35
Formula de cálculo	$A4 = \frac{PMC}{PMT} \times 100\%$	
Resultado (%)	66.87	

El resultado del indicador A5 demuestra un desempeño positivo, indicando una **reducción del 84.20% en el peso de los residuos sólidos y semisólidos generados**. La generación actual (947.9 kg) es significativamente menor que la generación previa del proceso tradicional (6000 kg) lo que aporta significativamente a un buen puntaje de transición a la circularidad y por ende a la sostenibilidad. Se muestra el cálculo en la **Tabla 43**.

Tabla 43*Cálculo de A5 - Porcentaje de reducción de generación de RRSS*

	RRSS generados previos	RRSS generados actual
Peso (Kg)	6000	947.9
Formula de cálculo	$A5 = \left(1 - \frac{\text{Peso de RRSS generados actual}}{\text{Peso de RRSS generados previamente}} \right) \times 100\%$	
Resultado (%)	84.20	

Para el cálculo del indicador social S1 respecto a los niveles de productividad, la productividad real fue menor que la productividad esperada, resultando en un logro del **93.46%**. Esto se justifica en el análisis previo que se hizo por la duración del batch que

considera una jornada estándar de trabajo, pudiendo ser mejor si se realizara de manera continua. Se muestra el cálculo en la **Tabla 44**.

Tabla 44

Cálculo de S1 - Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado

	Productividad real	Productividad esperada
Und. de prod. final producidas	874	812
Horas de trabajo en manufactura	221.11	192
Total	3.95	4.23
Formula de cálculo	$S1 = \frac{PR}{PE} \times 100\%$	
Resultado (%)	93.46	

Respecto al resultado del indicador social S2, el valor de **0** indica que **no hubo personas accidentadas** entre las 5 personas expuestas a accidentes, logrando una tasa de accidentabilidad del 0%. Este dato fue obtenido de los indicadores de SST evaluados dentro de la empresa, se considera que la información es de acceso fácil puesto que esta información es de reporte obligatorio por legislación. Se muestra el cálculo en la **Tabla 45**.

Tabla 45

Cálculo de S2 - Porcentaje de accidentabilidad laboral

	Personas expuestas a accidentes	Personas accidentadas
Nro. de personas	5	0
Formula de cálculo	$S2 = \frac{\# \text{ personas accidentadas}}{\# \text{ personas expuestas a accidentes}} \times 100\%$	

Resultado (%)	0
----------------------	----------

Para el cálculo del indicador social S3 sobre las horas de capacitación, formación al personal se logró cumplimiento total del programa de capacitaciones del periodo evaluado. Se muestra el cálculo en la **Tabla 46**.

Tabla 46

Cálculo de S3 - Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación

	Capacitación realizada	Capacitación planificada
Horas	8	8
Formula de cálculo	$S3 = \frac{\text{Hrs de capacitacion realizadas}}{\text{Hras de capacitacion planificadas}} \times 100\%$	
Resultado (%)	100	

El proceso de evaluación muestra una **fuerte tendencia positiva** en los aspectos económicos (E1) y ambientales (A3, A5), especialmente en la **reducción de costos de residuos y generación de desechos**. Sin embargo, existen desafíos en la **eficiencia del consumo de agua (A2)** y en el **logro de la productividad esperada (S1)**.

En la **Tabla 47** se presentan los valores obtenidos de la aplicación de cada indicador agrupadas por subíndices.

Tabla 47*Cálculo del resultado de subíndices para el caso de estudio*

Indicadores	Resultado cálculo	Resultado ponderado	Resultado subíndice
Económico			
E1	100.00	0.58	0.87
E2	84.20	0.07	
E3	0.00	0.00	
E4	100.00	0.22	
Ambiental			
A1	51.24	0.25	0.45
A2	31.87	0.03	
A3	6.51	0.01	
A4	66.87	0.07	
A5	84.20	0.08	
Social			
S1	93.46	0.68	0.75
S2	0.00	0.00	
S3	100.00	0.07	

Los indicadores económicos evaluados con los resultados más altos fueron E1: Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura y E4: Cumplimiento del presupuesto para la adquisición de materiales, ambos con logro del 100%, sin embargo, por el peso ponderado de cada indicador, su contribución al desempeño del subíndice económico se tradujo en 0.58 y 0.22 respectivamente.

De los indicadores ambientales, el indicador con mejor resultado fue aquel que contabiliza la Reducción de generación de RRSS con 84.2%, pero, su contribución al subíndice ambiental fue de un tercio del indicador de Eficiencia de uso de materiales a pesar de que éste logró un resultado del 51.24%.

Respecto a los indicadores sociales, el indicador con mejor resultado fue el relacionado con la Capacitación y formación de los trabajadores, sin embargo, el desempeño del indicador fue principalmente logrado por el aporte del indicador de Porcentaje de logro de productividad que obtuvo un resultado del 93.46%.

Posteriormente al cálculo de subíndices se procesaron los resultados en el Índice Compuesto de Sostenibilidad (*Véase Tabla 48*).

Tabla 48

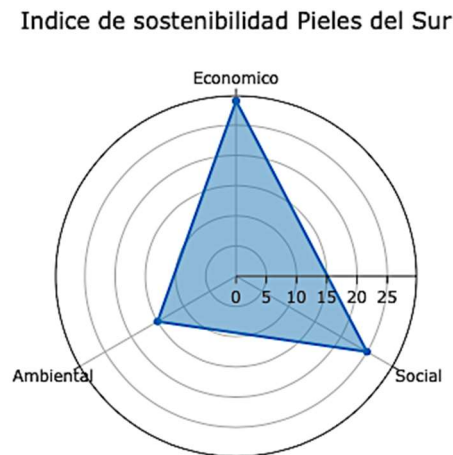
Cálculo del resultado del índice compuesto de sostenibilidad para el caso de estudio

Dimensión del subíndice	Calculo por subíndices	Factor de ponderación	Resultado ponderado
Económico	0.87	1/3	0.29
Ambiental	0.45	1/3	0.15
Social	0.75	1/3	0.25
RESULTADO TOTAL ICS			0.69

El Índice compuesto de sostenibilidad (ICS) para el sistema de valorización alcanzó un valor de **0.69**, indicando un desempeño moderado-alto hacia los objetivos de sostenibilidad. A continuación, se presenta el diagrama radar (*Figura 6*) que ilustra los subíndices por pilar de sostenibilidad:

Figura 6

Representación gráfica del resultado de la evaluación del ICS en el caso de estudio



Como se observa, el desempeño ambiental es significativamente menor (0.15), lo que refleja un impacto ambiental aún por gestionar y optimizar, especialmente en la gestión de energía. Por el contrario, se aprecia que el subíndice con mejor desempeño fue el económico (0.29), seguido del social (0.25) que presentan mejores resultados, destacando el cumplimiento de los indicadores relacionados con productividad y reducción de costos operativos.

El desempeño observado está directamente relacionado con los objetivos del estudio, el primer objetivo específico, diseñar indicadores de sostenibilidad, fue cumplido al evaluar los tres pilares de sostenibilidad. Sin embargo, el análisis de resultados destaca que el desempeño ambiental de 0.15 no se alinea con los principios de economía circular por los valores obtenidos en los indicadores críticos, sistematizados para su uso y efectivos para la evaluación del desempeño tal como se estableció en el objetivo específico segundo.

Por otro lado, el valor de 0.69 del índice compuesto valida la herramienta como un método eficaz para contextualizar la toma de decisiones, cumpliendo el tercer objetivo específico del siguiente estudio.

DISCUSIÓN

Modelamiento matemático

En el rubro ambiental, existen otros Software de modelamiento que podrían ser empleados para la validación de este estudio, se estructuró un análisis comparativo basado en enfoque principal, capacidad de generación de datos económicos, trazabilidad ambiental y aporte para el Índice Compuesto de Sostenibilidad, comparando *SuperPro Designer*, *WARGUI*, *Aspen Plus* y *SimaPro* como se detalla en la **Tabla 49**.

SuperPro Designer permite modelar las restricciones reales de la curtiembre Pieles del Sur E.I.R.L. (producción por lotes, costo de la resina aglutinante, consumo de energía, etc). Por otro lado, softwares como *SimaPro* se alimentarían de los resultados de *SuperPro* para calcular la huella ambiental global en categorías como la huella de carbono.

Aspen Plus no es ideal debido a que la viruta de cuero y sus interacciones biopoliméricas no poseen coeficientes termodinámicos tabulados en bases de datos de flujos continuos convencionales, lo que induciría a errores de simulación. *WARGUI*, aunque útil para medir toxicidad, carece de la dimensión financiera, un eje crítico para demostrar que la valorización de residuos es económicamente viable en el largo plazo para el sector privado.

SuperPro Designer se constituye, entonces, como la herramienta idónea para este caso de estudio porque equilibra la ingeniería de planta con la economía ecológica, permitiendo que el Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) se nutra de datos simulados realistas y contextualizados localmente.

Tabla 49

Análisis comparativo de aplicabilidad de Softwares de modelamiento.

	SuperPro Designer	WARGUI	Aspen Plus	SimaPro
Enfoque principal	Simulación, escalamiento, costeo y optimización de bioprocesos, tratamiento de efluentes y valorización de residuos industriales.	Evaluación, cuantificación y mitigación de la toxicidad e impactos ambientales potenciales en etapas tempranas de diseño químico.	Modelado termodinámico avanzado, simulación estacionaria y dinámica de procesos químicos/petroquímicos complejos de flujo continuo.	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EACV) de productos y procesos mediante bases de datos de inventario internacional (ecoinvent).
Balances de materia y energía	Altamente detallados por batches y continuos. Ideal para industria donde la producción es discontinua.	Estáticos y simplificados. Requiere que el usuario ingrese balances pre calculados; el software no simula cinéticas complejas.	Máximo nivel de rigor y precisión. Resuelve ecuaciones cinéticas, de transporte y equilibrios de fases moleculares continuos.	No realiza simulación de flujos. Depende exclusivamente de los datos de entrada (<i>inputs</i> y <i>outputs</i>) provistos por el usuario.
Análisis financiero	Genera reportes detallados de CAPEX/OPEX, costo unitario de producto y flujos de caja (VAN, TIR).	Está estrictamente enfocado en la física y toxicidad ambiental del algoritmo de reducción de residuos (WAR).	Posee módulos de costeo comercial enfocados a macroescala, requiriendo parametrización muy detallada.	Limitado a costos de ciclo de vida (LCC). Evalúa el impacto económico lineal del ciclo, pero no diseña la rentabilidad de la planta.
Balance de residuos y efluentes	Rastrea corrientes sólidas, líquidas y gaseosas emitiendo reportes de caracterización (DBO, DQO, COV) y su destino final.	Clasifica los efluentes en 8 categorías de impacto ambiental potencial (toxicidad humana, acuática, calentamiento, etc.).	Capaz de modelar la separación física y química de contaminantes.	Mapea la huella ambiental total (agua, carbono, toxicidad) extendiéndose fuera de la planta (transporte, disposición).
Aporte al ICS	Directo y multidimensional. Provee los datos primarios exactos para los subíndices Económicos (costos) y Ambientales (consumos de agua/energía).	Parcial (Ambiental). Alimenta subíndices de impacto y toxicidad local, pero deja vacíos los criterios económicos y operativos del ICS.	Exceso de parametrización física, inviable por la falta de datos cinéticos moleculares de la viruta. Indirecto. Sobredimensionado para la realidad de una MiPymes; genera incertidumbre en el ICS.	Directo (Socioambiental). Aporta métricas globales estandarizadas (ISO 14040/44) para validar científicamente el subíndice ambiental del ICS.

La aplicación del Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS) en la simulación del sistema de valorización de viruta de cuero de la empresa Piel del Sur E.I.R.L. permitió obtener una línea base para evaluar el desempeño del proceso desde una perspectiva de sostenibilidad integral. El puntaje global obtenido fue de 0.69 sobre 1, lo que representa un desempeño moderado-alto. Sin embargo, el análisis de las dimensiones individuales revela disparidades significativas, siendo el componente ambiental el de menor rendimiento.

Representación Gráfica del Desempeño del ICS

La visualización del desempeño mediante un diagrama poligonal (**Figura 6**) sigue la metodología propuesta por Georgakellos (1997), donde las puntas del polígono representan las dimensiones de sostenibilidad (ambiental, social, económica). En este formato gráfico, valores más alejados del centro reflejan mejor desempeño.

Además, este enfoque ha sido utilizado en estudios similares, como el de Papilo et al. (2018), quienes evaluaron sistemas de bioenergía en Indonesia y obtuvieron un índice compuesto de sostenibilidad del 35.02%, un desempeño significativamente bajo comparado con el 0.69 obtenido en el presente estudio. Tanto en este trabajo como en el de Papilo et al., se concluye que el análisis gráfico por subíndices facilita identificar áreas críticas para la mejora. En el caso de la empresa Piel del Sur, el puntaje ambiental bajo destaca como el aspecto más débil del sistema.

Análisis Crítico del Desempeño Ambiental

Aunque el proceso de valorización de viruta de cuero representa una mejora respecto al impacto del proceso tradicional de curtido, su desempeño ambiental es limitado debido a:

- Consumo elevado de energía: Los requerimientos energéticos del sistema son considerables, lo que aumenta la intensidad energética del proceso.

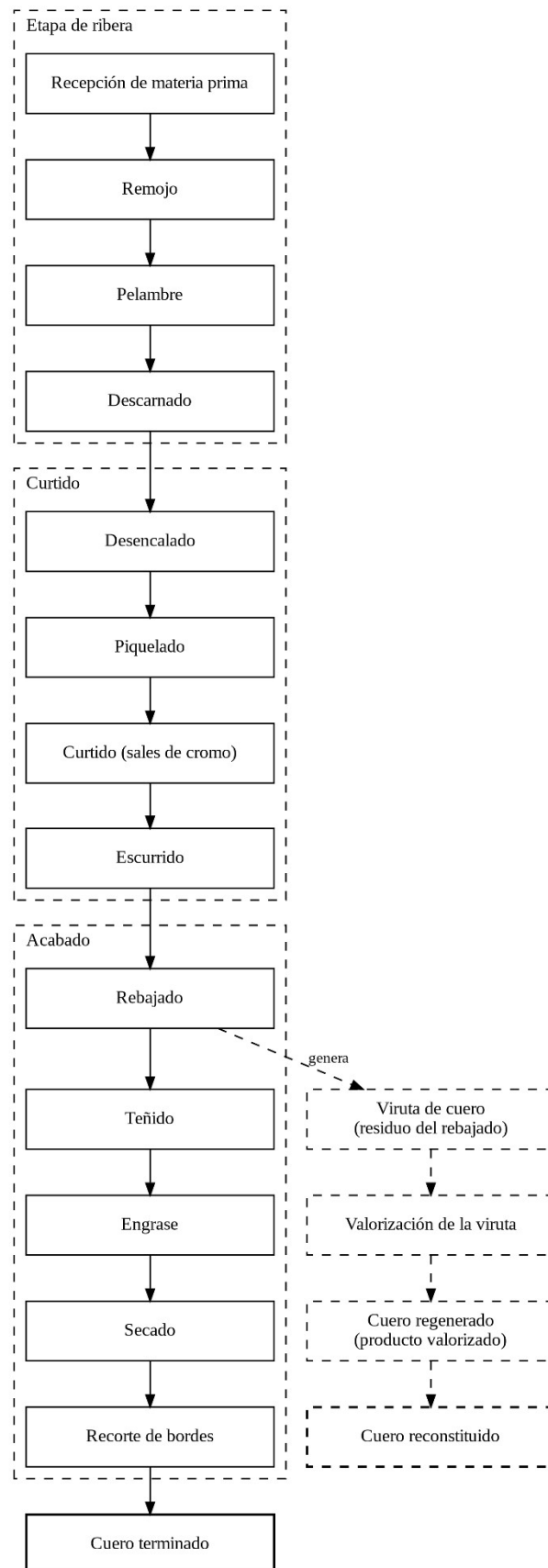
- Gestión ineficiente de residuos: Aunque se valorizan residuos sólidos, el proceso en sí tiene residuos como el subproducto de la fase de acabado de las planchas de cuero reconstituido y los efluentes que no son tratados o aprovechados adecuadamente, lo que mantiene un nivel alto de generación de desechos.
- Estas debilidades sugieren que el sistema no alcanza un nivel ambiental sostenible significativo. Se realizan las siguientes recomendaciones para mejorar el desempeño ambiental.
- Optimización del uso energético: Implementar tecnologías más eficientes, como sistemas de recuperación de calor, fuentes de energía renovable, o procesos energéticamente optimizados, reduciría la intensidad energética del proceso.
- Reutilización y tratamiento de residuos: Explorar tecnologías avanzadas para reciclar o tratar residuos sólidos generados, asegurando un mayor nivel de valorización y reduciendo el impacto ambiental.

Resultado circular del proceso

Se diseña la estructura lógica del diagrama para mapear visualmente cómo interactúa el proceso tradicional de la curtiembre con el sistema de valorización propuesto en Pielés del Sur E.I.R.L., evidenciando los puntos de fuga lineal y los bucles de retorno circular. Como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7

Diagrama de flujo del proceso implementando la valorización de viruta de cuero



En conclusión, la simulación en SuperPro Designer valida el uso del ICS como herramienta para evaluar el desempeño en sostenibilidad y establecer una línea base para la mejora continua. La representación gráfica y el análisis crítico destacan áreas clave, como la optimización energética y la gestión de residuos, que deben priorizarse. Este estudio proporciona una referencia útil para futuras implementaciones de sistemas similares en otros contextos industriales y regulatorios.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó un conjunto de doce indicadores de sostenibilidad bajo un enfoque micro-operativo, alineado con los principios de economía circular. Estos indicadores fueron seleccionados y validados mediante criterios de aplicabilidad, relevancia, y capacidad de medición. Se aseguraron sus atributos a través de metodologías reconocidas como el enfoque SMART y el checklist de Ramos y Caeiro (2010), garantizando su adecuación técnica, contextual y metodológica al sistema de valorización de viruta de cuero.
- Los indicadores seleccionados fueron jerarquizados y ponderados utilizando el Proceso Analítico Jerárquico, permitiendo construir tres subíndices representativos de cada dimensión de la sostenibilidad: económica, ambiental y social. Posteriormente, estos fueron integrados en un Índice Compuesto de Sostenibilidad (ICS), asignando pesos iguales ($1/3$) a cada dimensión, bajo el enfoque de sostenibilidad débil y compensatoria. El procedimiento cumplió con los criterios de consistencia y coherencia establecidos por la metodología AHP.
- El ICS fue validado mediante su aplicación al sistema de valorización de viruta de cuero modelado en SuperPro Designer. Los resultados evidenciaron un índice global de sostenibilidad de 0.69 (en escala de 0 a 1), con una contribución más alta del subíndice social, seguido por el económico y, finalmente, el ambiental. Este resultado refleja la necesidad de fortalecer los aspectos ambientales del proceso. La validación confirmó que el índice es funcional, replicable y útil para apoyar la toma de decisiones y orientar mejoras operativas bajo un enfoque de economía circular. Su utilidad trasciende el nivel empresa a

ser una célula de datos para los reportes de sostenibilidad que el Perú exige al 2026.

5.2. Recomendaciones

- **Recomendación 1 :** Se sugiere que futuras investigaciones incluyan indicadores a nivel de cadena de suministro y de impacto regional, para captar el verdadero alcance de la economía circular en otros contextos productivos y sectores de la industria, ampliando así el análisis hacia el suministro y transporte, y adaptándose a la variabilidad de datos disponible en otros sistemas y escalas geográficas.
- **Recomendación 2:** Dada la importancia de un adecuado seguimiento de datos, se recomienda que las empresas interesadas en utilizar el ICS implementen sistemas básicos de monitoreo de sostenibilidad y establezcan procedimientos para registrar información de forma continua. Además, realizar análisis de sensibilidad podría ser valioso para identificar los indicadores más críticos, permitiendo a las empresas enfocarse en mejorar los elementos que más impactan en su desempeño sostenible.
- **Recomendación 3:** Se recomienda que la empresa implemente estrategias de optimización en el consumo energético y explore alternativas de tratamiento y reducción de residuos en su proceso. Para contextualizar el valor obtenido en el índice, sería útil compararlo con datos de estudios en diferentes periodos de operación, otros procesos y diferentes años, a fin de identificar brechas y oportunidades de mejora en relación con la industria.
- **Recomendación 4:** Dado que la composición de la viruta de cuero (colágeno, cromo trivalente y sales residuales) habilita rutas de valorización distintas a la evaluada en el presente estudio, se recomienda que futuras investigaciones

apliquen el Índice Compuesto de Sostenibilidad para comparar el desempeño de alternativas como la extracción de colágeno y gelatina mediante hidrólisis enzimática-alcaldina (Alvarez Oviedo & Zegarra Rondón, 2017), la producción de biocarbón o carbón activado con capacidad adsorbente para el tratamiento de los propios efluentes cromados del curtido, y la elaboración de materiales de construcción a partir de la fracción sólida (Caycho, 2019). La evaluación comparativa de estas rutas permitiría identificar la opción de mayor sostenibilidad integral para cada contexto productivo y nivel de madurez empresarial, ampliando el alcance metodológico del índice propuesto.

CAPITULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriaanse, A. (1993). Environmental policy performance indicators.
- Alvarez Oviedo, E., & Zegarra Rondón, C. S. (2017). Estudio comparativo entre la enzima pancreática y la enzima microbiana en el proceso de hidrólisis alcalino enzimática para la obtención de colágeno a partir de las virutas de cuero en la Curtiembre Austral S.R.L. – Arequipa. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Atkinson, G., Dubourg, R., Hamilton, K., Munasinghe, M., & Pearce, D. (1997). Measuring Sustainable Development: Macroeconomy and Environment. *Edward Elgar Publishing*.
- Azapagic, A., & Perdan, S. (2000). Indicators of sustainable development for industry: A general framework. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 243-261.
- Baldassarre, B., Schepers, M., Bocken, N., Cuppen, E., Korevaar, G., & Calabretta, G. (2019). Industrial Symbiosis: Towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 216, 446-460.
- Bleischwitz, R., Yang, M., Huang, B., Xu, X., Zhou, J., McDowall, W., Andrews-Speed, P., Liu, Z., & Yong, G. (2022). The circular economy in China: Achievements, challenges and potential implications for decarbonisation. *Resources, Conservation and Recycling*, 183, 106350.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106350>.
- Brown, B. J., Hanson, M. E., Liverman, D. M., & Merideth, R. W. (1987). Global sustainability: toward definition. *Environmental management*, 11(6), 713-719.
- Caycho, M. (2019). Ladrillos ecológicos INNTA S.A.C. Presentación, II Foro Internacional de Economía Circular, Perú.

- Circle Economy. (2023). *The Circularity Gap Report 2023*. Circle Economy. <https://www.circularity-gap.world/2023>
- Circular Economy Network (2019). Report on Circular Economy in Italy. Available online at: www.circulareconomynetwork.it
- Circulator. (2020). The Circular Business Model Mixer. Recuperado de <https://www.circulator.eu/mix-your-strategies>.
- Clement, F., Le Billon, P., & Stadelmann, M. (2019). *Governance and circular economy policies: Exploring the role of public and private actors*. Environmental Policy and Governance, 29(5), 345-356. <https://doi.org/10.1002/eet.1872>
- Congreso de la República del Perú. (2024). *Ley N.º 32212: Modificación de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y otros*. Recuperado el 24 de octubre de 2025 de <https://busquedas.elperuano.pe/>
- Constitución Política del Perú (1993). Normales Legales, Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 19 de diciembre de 1993.
- Corporación Interamericana de Inversiones (BID Invest). (2024). *Diagnóstico general del financiamiento de la economía circular: Experiencia Perú*.
- Cruciani, C., Giove, S., Pinar, M., & Sostero, M. (2013). (Rep.). Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM). Recuperado: Setiembre 14, 2020, de: <http://www.jstor.org/stable/resrep00918>
- Decreto Legislativo N.º 1278. (2016). *Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Ministerio del Ambiente. Recuperado el 24 de octubre de 2025 de <https://www.minam.gob.pe/residuossolidos/ley-1278/>
- Decreto Legislativo 1501 (2020). Normas Legales, Decreto Legislativo que modifica el Decreto Legislativo No 1278, que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 10 de mayo de 2020.

- Decreto Legislativo 28611 (2005). Normas Legales, Ley General del Ambiente. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 13 de octubre de 2005.
- Decreto Supremo N.º 009-2019-MINAM. (2019). *Reglamento de Residuos Peligrosos*. Ministerio del Ambiente. Recuperado el 24 de octubre de 2025 de <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales>
- Decreto Supremo N.º 010-2023-MINAM. (2023). *Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de las actividades de curtido y adobo de cuero, así como adobo y teñido de pieles*. Ministerio del Ambiente. Recuperado el 24 de octubre de 2025 de <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4561259-010-2023-minam>
- Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM. (2017). Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Ministerio del Ambiente. Recuperado el 24 de octubre de 2025 de <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/722588>
- De Pascale, A., Arbolino, R., Szopik-Depczyńska, K., Limosani, M., & Ioppolo, G. (2021). A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. *Journal of Cleaner Production*, 281, 124942.
- Demastus, J., & Landrum, N. E. (2023). Organizational sustainability schemes align with weak sustainability. *Business Strategy and the Environment*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.3511>
- Díaz, A., Schögl, J., Reyes, T., & Baumgartner, R. J. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 1031-1045. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.47>

- Doran, G. T. (1981). There's a SMART way to write management's goals and objectives. *Management review*, 70(11), 35-36.
- EBC. (2020). Bien Común: Misión y Visión. Recuperado de <https://economydelbiencomun.org/somos/mision-y-vision/>
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone Publishing.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- Ellen Mac Arthur Foundation (2017). Circular Economy key ideas. Recuperado de: <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/key-ideas>
- Ellen Mac Arthur Foundation, Granta Design (2019). Material Circularity Indicator: An approach to measuring circularity - Methodology.
- Elsevier. (n.d.). *Scopus: Content coverage*. Retrieved September 11, 2025, from <https://www.scopus.com>
- Espinoza, R., (2023). Economía circular y sostenibilidad empresarial de la empresa agraria azucarera Andahuasi, sayán – 2022 [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/7130>
- Fischer, R. (2024). *Economía circular: herramientas para alcanzar una economía circular en las empresas*. AmCham Perú. <https://amcham.org.pe/news/economia-circular-herramientas-para-alcanzar-una-economia-circular-en-las-empresas/>
- Forman, E., Gass, S. (2001). The analytic hierarchy process—an exposition. *Operations Research*, 49(4), 469–486.

- Franco, M. A., Rodríguez, M., & Hernández, L. (2021). Monitoring circular economy performance using composite indicators: Methodological insights and empirical application. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124802>
- Franco, N. G., Almeida, M. F. L., & Calili, R. F. (2021). A strategic measurement framework to monitor and evaluate circularity performance in organizations from a transition perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1165-1182.
- Gan, X., Fernandez, I. C., Guo, J., Wilson, M., Zhao, Y., Zhou, B., & Wu, J. (2017). When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. *Ecological indicators*, 81, 491-502.
- Gallopin, G. C. (1997). Indicators and their use: Information for decision-making. En B. Moldan & A. Billharz (Eds.), *Sustainability indicators: Report of the project on indicators of sustainable development* (pp. 13–27). Wiley.
- Garcia, S., (2023). Economía circular y logística inversa en la cooperativa Granja Porcón – Cajamarca 2022 [Tesis, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/34898>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.
- Georgakellos, D. A. (1997). Waste packaging management: Life cycle analysis of different packages in Greece and the consequences on environmental quality (PhD Thesis). Department of Business Administration, University of Piraeus, Greece.
- Goepel, K.(2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3). Recuperado de: <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>

- Gómez, J. A., Sánchez, Ó. J., & Correa, L. F. (2020). Techno-economic and environmental evaluation of cheesemaking waste valorization through process simulation using SuperPro designer. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 6025-6045.
- Gómez-Limón, J. A., & Sanchez-Fernandez, G. (2010). Empirical evaluation of agricultural sustainability using a composite indicator. *Ecological Economics*, 69(5), 1062–1075. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.027>
- Google. (n.d.). *Google Scholar*. Retrieved September 11, 2025, from <https://scholar.google.com>
- GRI (2002). Sustainability reporting guidelines. Global Reporting Initiative. Boston, Estados Unidos.
- Global Reporting Initiative (GRI). (2021). *GRI Standards 2021: Universal Standards*. GRI. <https://www.globalreporting.org/>
- Gularte, A. (2023). Economía circular y desarrollo sustentable en el sector agricultura en la provincia de Barranca, 2022 [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/139071>
- Hatzfeld, T., Backes, J. G., Guenther, E., & Traverso, M. (2022). Modeling circularity as Functionality Over Use-Time to reflect on circularity indicator challenges and identify new indicators for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134797.
- Hettiarachchi, H., & Ardakanian, R. (Eds.). (2016). Environmental Resource Management and the Nexus Approach: Managing Water, Soil, and Waste in the Context of Global Change. Springer International Publishing.
- Hopkinson, P., Whitaker, M. (1998). Corporate Environmental Reporting and the UNEP/Sustainability benchmarking tool. University of Bradford.

- Idowu, S. O., Zu, L., & Gupta, A. D. (2013). Encyclopedia of corporate social responsibility (Vol. 21). N. Capaldi (Ed.). New York: Springer.
- Intelligen, I. (2020). SuperPro designer product features. Recuperado de: <https://www.intelligen.com/products/superpro-product-features/>
- Intelligen, Inc. (2024). *SuperPro Designer v.12.0: User's Guide*. Intelligen, Inc. <https://www.intelligen.com>
- ISO, I. (2008). ISO:15392. Sustainability in building construction—general principles. International Organization for Standardization, Geneva.
- INACAL. (2019). NTP 900.058: Gestión de residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos. INACAL.
- INACAL. (2024). NTP-ISO 59004:2024 Economía circular — Vocabulario, principios y orientación para la implementación. Instituto Nacional de Calidad (INACAL).
- Johnston, P., Everard, M., Santillo, D., & Robèrt, K. H. (2007). Reclaiming the definition of sustainability. *Environmental science and pollution research international*, 14(1), 60-66.
- Joint Research Centre-European Commission. (2008). Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. OECD publishing.
- Joung, C. B., Carrell, J., Sarkar, P., & Feng, S. C. (2013). Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological Indicators*, 24, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.030>
- Kang, S. (2004). Korean Complex Environment Index. National Statistical Office, Statistical Research & Development Division. Corea del Sur Recuperado de: "www.stat.fi/isi99/proceedings/arkisto/varasto/kang0854.pdf.

- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Krajnc, D., & Glavič, P. (2005). A model for integrated assessment of sustainable development. *Resources, conservation and recycling*, 43(2), 189-208.
- Latif, H. H., Gopalakrishnan, B., Nimbarte, A., & Currie, K. (2017). Sustainability index development for manufacturing industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 82-95.
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). *Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry*. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- López, D., Maicelo, R., Sifuentes, L., Santiago, D. (2023). Economía circular y su impacto en la industria del calzado de Trujillo, en el periodo de 2021-2022 [Trabajo de investigación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <http://hdl.handle.net/10757/668466>
- Lüdeke-Freund, F., Gold, S., & Bocken, N. M. (2019). A review and typology of circular economy business model patterns. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 36-61.
- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2, 23- 44.
- Mariátegui, L. (2024). *Economía circular: mucho más que reciclar*. Gestión. <https://gestion.pe/blog/conexion-universitaria/2024/06/economia-circular-mucho-mas-que-reciclar.html/>
- Mazziotta, M., & Pareto, A. (2013). Methods for constructing composite indicators: One for all or all for one? *Italian Journal of Economic Demographic and Statistical Studies*, 67(2), 67–80.

- McBride, A. C., Dale, V. H., Baskaran, L. M., Downing, M. E., Eaton, L. M., Efroymson, R. A., Garten, C. T., Kline, K. L., Jager, H. I., Mulholland, P. J., Parish, E. S., Schweizer, P. E., & Storey, J. M. (2011). Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. *Ecological Indicators*, 11(5), 1277–1289.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.010>
- McMichael, A. J., Butler, C. D., & Folke, C. (2003). New visions for addressing sustainability. *Science*, 302(5652), 1919-1920.
- Medina, K. (2019). Propuesta de diseño y modelamiento de una planta industrial para el aprovechamiento de residuos sólidos del proceso de curtido en la empresa Pielés del Sur E.I.R.L. de la región Arequipa [Tesis, Universidad Católica San Pablo].
<http://repositorio.ucsp.edu.pe/handle/UCSP/15972>
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2013). Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador.
- MEF. (2018). Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional de Competitividad y Productividad. D.S. N.o 345-2018-MEF. Diario Oficial El Peruano.
- MEF. (2019). Decreto Supremo que aprueba el Plan Nacional de Competitividad y Productividad. D.S. N.o 237-2019-MEF. Diario Oficial El Peruano.
- Microsoft Corporation. (2021). *Microsoft Excel*.
Microsoft. <https://www.microsoft.com/excel>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). Decreto Supremo N.º 009-2019-MINAM Aprueban el Régimen Especial de Gestión y Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Diario Oficial *El Peruano*.

- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2025). *Decreto Supremo N.º 003-2025-MINAM que aprueba la Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular al 2030*. Diario Oficial *El Peruano*.
- MINAM. (2019). *Régimen de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y Gestión de Residuos*. Ministerio del Ambiente.
<https://www.minam.gob.pe/responsabilidad-extendida-del-productor>
- Moss, M., & Grunkemeyer, T. (2007, June). Using Resident Formulated Multi-Dimensional Indicators to Assess Urban Communities' Progress Toward Meeting Sustainability Goals. In International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment.
- Morsy, M. I., & Nasr, A. (2018). Engineering Properties of Gypsum Composite Containing Chrome Tanned Leather Shaving Waste. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 35(4), 1441-1456.
- Munda, G. (2005). Measuring sustainability: A multi-criterion framework. *Environment, Development and Sustainability*, 7(1), 117–134. <https://doi.org/10.1007/s10668-003-4713-0>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Netherlands Enterprise Agency. (2020). Circular Economy & SDGs: How circular economy practices help to achieve the Sustainable Development Goals.
Recuperado

- de https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/3228_brochure_sdg_-_hch_cmyk_a4_portrait_-_0520-012.pdf.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorizing tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60(3), 498–508.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- OECD. (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Ocampo, L., Impas, C., Tordillo, J. A., & Pastoril, J. (2015). Identifying critical indicators in sustainable manufacturing using analytic hierarchy process (AHP). *Manufacturing and Industrial Engineering*, 14(3-4).
- Parisi, M., Pizzi, A., Sacconi, A., & Di Maggio, R. (2021). Recycling of chrome-tanned leather and its utilization as a secondary raw material: A review. *Polymers*, 13(3), 429. <https://doi.org/10.3390/polym13030429>
- Papilo, P., Hambali, E., & Sitanggang, I. S. (2018). Sustainability index assessment of palm oil- based bioenergy in Indonesia. *Journal of cleaner production*, 196, 808-820.
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J., Rechberger, H. (2019). Measuring the Circular Economy - a Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200-216.
- Peñalver, P. (2019). Situación de la pesca y acuicultura: oportunidades en la economía circular. Asociación española de basuras marinas (AEBAM). Presentación, II Foro Internacional de Economía Circular, Perú.
- Potting, J., Hanemaaijer, A., Delahaye, R., Ganzevles, J., Hoekstra, R., & Lijzen, J. (2018). Circular Economy: What We Want to Know and Can Measure-System and Baseline Assessment for Monitoring the Progress of the Circular Economy in

- the Netherlands. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: Hage, The Netherlands.
- PRODUCE. (2020). Decreto Supremo que aprueba la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria D.S. No 003-2020-PRODUCE. Diario Oficial El Peruano.
- Ramos, T. B., & Caeiro, S. (2010). Meta-performance evaluation of sustainability indicators. *Ecological Indicators*, 10(2), 157-166.
- Ritchey, T. (2011). *General morphological analysis: A general method for non-quantified modeling*. Swedish Morphological Society.
- Rodriguez-Anton, J. M., Rubio-Andrada, L., Celemín-Pedroche, M. S., & Alonso-Almeida, M. D. M. (2019). Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(8), 708–720.
- Saaty, T.L., (1986). Axiomatic foundations of the analytic hierarchy process. *Management Science*, 32(7), 841–855.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542-559.
- Saini, N., Singhania, M., Hasan, M., Yadav, M. P., & Abedin, M. Z. (2022). Non-financial disclosures and sustainable development: A scientometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135173.
- Saisana, M., & Tarantola, S. (2002). State-of-the-art report on current methodologies and practices for composite indicator development. European Commission – Joint Research Centre.

- Salazar Nishi, J. (2019). APROCompost, modelo de comunidades sostenibles. Presentación, II Foro Internacional de Economía Circular, Perú.
- Saltelli, A., Tarantola, S., & Campolongo, F. (2005). Composite indicators: The controversy and the way forward. *OECD Statistics Working Paper*. <https://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>
- Samaniego, J., Rondón Toro, E., Herrera Jiménez, J., & Santori, S. (2022). Panorama de las hojas de ruta de economía circular en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
- Santos, M., Montenegro, A. (2023). Propuesta del sistema de economía circular en Lonya grande para mejorar el nivel de vida de los habitantes [Tesis, Universidad Señor de Sipán]. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/10613>
- Sarkar, P., Joung, C. B., Carrell, J., & Feng, S. C. (2011). Sustainable manufacturing indicator repository. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 54792, pp. 943-950).
- Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 229, 440-453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95.
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.
- Shah, S. A. A., Zhou, P., Walasai, G. D., & Mohsin, M. (2019). Energy security and environmental sustainability index of South Asian countries: *A composite index approach*. *Ecological Indicators*, 106, 105507.

- Shahidi, S., & Mirzadeh, H. (2008). Leather processing and the environment impact. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 103(2), 49–57.
- Silva, M., & Pariapaza, C. (2025). Asignación de capital y dinámicas de producción: un análisis del modelo de economía circular. *Revista Moneda*, (201), 83–90. Banco Central de Reserva del Perú.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological indicators*, 9(2), 189-212.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2007). Development of composite sustainability performance index for steel industry. *Ecological Indicators*, 7(3), 565-588.
- Social Value UK. (2020). What are the Principles of Social Value? Recuperado de <http://www.socialvalueuk.org/what-is-social-value/the-principles-of-social-value/>
- Soto de la Rosa, H., & Schuschny, A. R. (2009). Guía metodológica: diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible.
- Spangenberg, J., & Bonniot, O. (1998). Sustainability Indicators - A Compass on the Road Towards Sustainability. Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy, (81). Recuperado de <https://epub.wupperinst.org>
- Sustainability Guide. (2018). Circular Economy - Sustainability Guide. Recuperado 6 Setiembre 2020, de <https://sustainabilityguide.eu/sustainability/circular-economy/>.
- Sustainable Measures (2009). Recuperado 27 de octubre de 2022, de Sustainable Measures website: <https://sustainablemeasures.com>
- Sutherland, W. J., & Wood, K. (2019). *Technological innovations in recycling systems*. *Resources, Conservation & Recycling*, 140, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.004>

- Tan, H. X., Yeo, Z., Ng, R., Tjandra, T. B., & Song, B. (2015). A sustainability indicator framework for Singapore small and medium-sized manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 29, 132-137.
- "Trivino-Tarradas, P., Gomez-Ariza, M. R., Basch, G., & Gonzalez-Sanchez, E. J. (2019). Sustainability assessment of annual and permanent crops: The INSPIA model. *Sustainability*, 11(3), 738."
- UNEP. (2020). *The Emissions Gap Report 2020*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Vander Werf, W. N. (1999). A weighted Environmental Indicator at Unox. *Sustainable Measures, Evaluation and Reporting of Environmental and Social Performance*. Greenleaf Publishing Limited, Sheffield, UK.
- WBCSD (2018). Circular Metrics – Landscape Analysis. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Recuperado de: <https://www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy/Factor-10/Metrics-Measurement/Resources/Landscape-analysis>
- WBCSD (2020). Circular Transition Indicators V3.0– Metrics for business, by business. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Recuperado de: <https://www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy/Metrics-Measurement/Resources/Circular-Transition-Indicators-V3.0-Metrics-for-business-by-business>
- WCED (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2006). Comparing aggregating methods for constructing composite indicators. *Ecological Economics*, 59(3), 305–311.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.10.020>
- Zhou, L., Tokos, H., Krajnc, D., & Yang, Y. (2012). Sustainability performance evaluation in industry by composite sustainability index. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(5), 789-803.
- Zwicky, F. (1969). *Discovery, invention, research through the morphological approach*. New York: Macmillan Publishers.

ANEXOS

Anexo 1. Resumen de atributos de indicadores

Tabla 50

Resumen de indicadores y atributos

Indicador	Fórmula		Unidad	Dirección	Escala temporal
Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura	$E1 = \frac{GR}{GP} \times 100\%$	(3)	%	Maximizar	Anual
Reducción del costo de disposición de residuos sólidos	$E2 = \left(1 - \frac{Inv. soles actual}{Inv. soles previo}\right) \times 100\%$	(5)	%	Maximizar	Anual
Reducción del costo de suministro energético	$E3 = \left(1 - \frac{CE_{actual}}{CE_{previo}}\right) \times 100\%$	(6)	%	Maximizar	Anual
Logro del presupuesto de adquisición de materiales	$E4 = 100 + \left(\frac{D}{Costo previsto} \times 100\%\right)$	(8)	%	Maximizar	Anual
Eficiencia de uso de materiales	$A1 = \frac{Peso del producto final}{Peso de materia prima} \times 100\%$	(10)	%	Maximizar	Anual
Eficiencia de uso de agua	$A2 = \frac{Agua aprovechada}{Agua consumida} \times 100\%$	(11)	%	Maximizar	Anual

Reducción de la intensidad energética	$A3 = \left(\frac{DI}{Intensidad\ energetica\ prevista} \times 100\% \right)$	(13)	%	Maximizar	Anual
Porcentaje del producto con origen circular	$A4 = \frac{PMC}{PMT} \times 100\%$	(16)	%	Maximizar	Anual
Porcentaje de reducción de generación de residuos sólidos	$A5 = \left(1 - \frac{Peso\ de\ RRSS\ generados\ ahora}{Peso\ de\ RRSS\ generados\ previamente} \right) \times 100\%$	(17)	%	Maximizar	Anual
Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado	$S1 = \frac{PR}{PE} \times 100\%$	(18)	%	Maximizar	Anual
Porcentaje de accidentabilidad laboral	$S2 = \frac{\# personas\ accidentadas}{\# personas\ expuestas\ a\ accidentes} \times 100\%$	(20)	%	Minimizar	Anual
Porcentaje de cumplimiento de horas de capacitación	$S3 = \frac{Hrs\ de\ capacitacion\ realizadas}{Hras\ de\ capacitacion\ planificadas} \times 100\%$	(21)	%	Maximizar	Anual

Anexo 2. Evaluación de indicadores por checklist

Tabla 51

Validación del indicador E1

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: E1				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de diseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		

10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X
11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 52

Validación del indicador E2

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: E2				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		

Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X		
11	Alcance temporal y espacial definidos	X		
12	Relación costo/beneficio razonable.	X		
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X		

Tabla 53

Validación del indicador E3

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: E3				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		

5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X		
11	Alcance temporal y espacial definidos	X		
12	Relación costo/beneficio razonable.	X		
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X		

Tabla 54

Validación del indicador E4

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: E4				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente.	X		

El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.

11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 55

Validación del indicador A1

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: A1				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando	X		

	información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	
	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política,	
9	valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X
	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los	
10	indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X
11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 56

Validación del indicador A2

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: A2				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse	X		

periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.

11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 57

Validación del indicador A3

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES			
Indicador evaluado: A3			
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X	
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X	
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X	
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X	
Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas:			
5	población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X	
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X	
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X	
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No No es claro

8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X
11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 58

Validación del indicador A4

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: A4				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		

5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X		
11	Alcance temporal y espacial definidos	X		
12	Relación costo/beneficio razonable.	X		
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X		

Tabla 59

Validación del indicador A5

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: A5				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		

2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X		
11	Alcance temporal y espacial definidos	X		
12	Relación costo/beneficio razonable.	X		
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X		

Tabla 60

Validación del indicador S1

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: S1				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente.	X		

El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.

11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 61

Validación del indicador S2

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES			
Indicador evaluado: S2			
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X	
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X	
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X	
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X	
Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas:			
5	población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X	
6	Considera la facilidad de disseminación de la información resultante	X	
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X	
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No No es claro

8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X
11	Alcance temporal y espacial definidos	X
12	Relación costo/beneficio razonable.	X
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X

Tabla 62

Validación del indicador S3

CHECKLIST DE VALIDACIÓN DE INDICADORES				
Indicador evaluado: S3				
Nivel 1 — Desempeño del sistema de indicadores: procesos de planificación y conceptualización, actores y enfoques metodológicos		Si	No	No es claro
1	Abarca las dimensiones básicas del desarrollo sostenible: económico, social, ambiental	X		
2	Refleja la naturaleza de la audiencia principal del indicador: caso de estudio	X		
3	Uso de un marco de trabajo conceptual: economía circular, valorización de RRSS industriales	X		
4	Concordancia con los procesos del sistema a evaluar: diagrama de flujo	X		
5	Consideración de indicadores relevantes para las partes interesadas: población aledaña, gobierno, empleador, accionistas, clientes, proveedores	X		

6	Considera la facilidad de diseminación de la información resultante	X		
7	Vínculo entre los indicadores y los objetivos de las políticas, planes, programas.	X		
Nivel 2: Desempeño de indicadores individuales y agregados en la etapa de implementación y operación / acción		Si	No	No es claro
8	Coherencia conceptual: El indicador debe responder a una pregunta de evaluación identificada o múltiples preguntas, proporcionando información útil para los usuarios finales en general y en particular para los tomadores de decisiones.	X		
9	Sensibilidad a los objetivos y límites: basados en objetivos de política, valores legales obligatorios, históricos existentes, valores de referencia científicos o técnicos.	X		
10	Enfoque metodológico para recolección de datos y análisis: Los indicadores y su unidad deben ser adecuados, consistentes y confiables, la propuesta de medición debe permitir su reproducción y comparación. Los indicadores deben tener datos existentes fácilmente disponibles y no requerir habilidades de recopilación de datos excesivas y deben tener la capacidad de actualizarse periódicamente. El método de recopilación de datos debe tener un mínimo impacto en el ambiente.	X		
11	Alcance temporal y espacial definidos	X		
12	Relación costo/beneficio razonable.	X		
13	Los indicadores son de fácil entendimiento para los usuarios finales.	X		

Anexo 3. Módulos del software AHP

AHP Criteria Names

Please fill out

AHP priorities

Name of Criteria

1

Logro de ganancias esperadas

2

Reducción costo disp. RRSS

3

Reducción costo energía

4

Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales

max. 45 character ea.

AHP-OS author: Klaus D. Goepel, BPMSG. [Contact](#) . Last update: Sep 19, 2019 Rev: 49

Ingreso de indicadores económicos al software AHP

Pairwise Comparison

6 pairwise comparison(s). Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

To improve consistency, slightly adjust highlighted judgments by plus or minus one or two points in the scale.

With respect to AHP priorities, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1 ☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Reducción costo disp. RRSS	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2 ☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Reducción costo energía	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3 ☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4 ☐ Reducción costo disp. RRSS	☒ Reducción costo energía	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5 ☐ Reducción costo disp. RRSS	☒ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6 ☐ Reducción costo energía	☒ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

CR = 28.1% Adjust highlighted judgments to improve consistency

☐ dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Corrección de juicio del software para mejorar la consistencia

A - wrt AHP priorities - or B?			Equal	How much more?
1	☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Reducción costo disp. RRSS	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☒ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Reducción costo energía	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☒ Logro de ganancias esperadas	☐ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☐ Reducción costo disp. RRSS	☒ Reducción costo energía	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☐ Reducción costo disp. RRSS	☒ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☐ Reducción costo energía	☒ Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

CR = 1.2% OK

Calculate [Download_\(.csv\)](#) ☐ dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Comparación por pares corregida

Resulting Priorities

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat		Priority	Rank	(+)	(-)
1	Logro de ganancias esperadas	57.7%	1	8.8%	8.8%
2	Reducción costo disp. RRSS	7.7%	4	1.4%	1.4%
3	Reducción costo energía	12.5%	3	1.9%	1.9%
4	Cumplim Presupuesto Adquisición de materiales	22.2%	2	2.4%	2.4%

Number of comparisons = 6
Consistency Ratio CR = 1.2%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4
1	1	6.00	5.00	3.00
2	0.17	1	0.50	0.33
3	0.20	2.00	1	0.50
4	0.33	3.00	2.00	1

Principal eigen value = 4.034
Eigenvector solution: 4 iterations, delta = 4.4E-10

Prioridades resultantes con pesos de ponderación de indicadores económicos

AHP Criteria Names

Please fill out

AHP priorities	
Name of Criteria	
1	Eficiencia de materiales
2	Eficiencia de agua
3	Reducción de intensidad energética
4	Porcentaje circular del producto
5	Porcentaje de reducción de RRSS
max. 45 character ea.	
OK	

AHP-OS author: Klaus D. Goepel, BPMSG. [Contact](#) . Last update: Sep 19, 2019 Rev: 49

Ingreso de indicadores ambientales al software AHP

Pairwise Comparison

10 pairwise comparison(s). Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

To improve consistency, slightly adjust highlighted judgments by plus or minus one or two points in the scale.

With respect to AHP priorities, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1 ☒ Eficiencia de materiales	☐ Eficiencia de agua	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2 ☒ Eficiencia de materiales	☐ Reducción intensidad energética	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3 ☒ Eficiencia de materiales	☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4 ☒ Eficiencia de materiales	☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5 ☐ Eficiencia de agua	☒ Reducción intensidad energética	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6 ☒ Eficiencia de agua	☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
7 ☒ Eficiencia de agua	☐ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8 ☒ Reducción intensidad energética	☒ Porcentaje circular del producto	☒ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9 ☒ Reducción intensidad energética	☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10 ☐ Porcentaje circular del producto	☒ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
CR = 48.7% Adjust highlighted judgments to improve consistency			
Calculate		Download_(.csv) ☐ dec. comma	

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Primera corrección de juicio del software para mejorar la consistencia

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	☒ Eficiencia de materiales ☐ Eficiencia de agua	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☒ Eficiencia de materiales ☐ Reducción intensidad energética	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☒ Eficiencia de materiales ☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☒ Eficiencia de materiales ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☐ Eficiencia de agua ☒ Reducción intensidad energética	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☒ Eficiencia de agua ☐ Porcentaje circular del producto	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
7	☒ Eficiencia de agua ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☒ Reducción intensidad energética ☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☒ Reducción intensidad energética ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☐ Porcentaje circular del producto ☒ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
CR = 10.4% Adjust highlighted judgments to improve consistency			
Calculate		Download_(.csv) ☐ dec. comma	

Segunda corrección de juicio del software para mejorar la consistencia

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	☒ Eficiencia de materiales ☐ Eficiencia de agua	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☒ Eficiencia de materiales ☐ Reducción intensidad energética	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☒ Eficiencia de materiales ☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☒ Eficiencia de materiales ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☐ Eficiencia de agua ☒ Reducción intensidad energética	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☒ Eficiencia de agua ☐ Porcentaje circular del producto	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
7	☒ Eficiencia de agua ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☒ Reducción intensidad energética ☐ Porcentaje circular del producto	☐ 1	☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☒ Reducción intensidad energética ☐ Porcentaje reducción de RRSS	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☐ Porcentaje circular del producto ☒ Porcentaje reducción de RRSS	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
CR = 1.5% OK			
Calculate		Download_(.csv) ☐ dec. comma	

Comparación por pares corregida

Resulting Priorities

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat		Priority	Rank	(+)	(-)
1	Eficiencia de materiales	47.9%	1	10.6%	10.6%
2	Eficiencia de agua	10.1%	4	0.8%	0.8%
3	Reducción intensidad energética	21.3%	2	4.3%	4.3%
4	Porcentaje circular del producto	11.3%	3	2.6%	2.6%
5	Porcentaje reducción de RRSS	9.4%	5	1.5%	1.5%

Number of comparisons = 10
Consistency Ratio CR = 1.5%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4	5
1	1	5.00	3.00	3.00	5.00
2	0.20	1	0.50	1.00	1.00
3	0.33	2.00	1	2.00	3.00
4	0.33	1.00	0.50	1	1.00
5	0.20	1.00	0.33	1.00	1

Principal eigen value = 5.069
Eigenvector solution: 4 iterations, delta = 4.3E-9

Prioridades resultantes con pesos de ponderación de indicadores ambientales

AHP Criteria Names

Please fill out

AHP priorities

Name of Criteria

1 Logro de productividad esperado

2 Accidentabilidad Laboral

3 Cumplimiento Hrs Capacitación

4

5

max. 45 character ea.

OK

AHP-OS author: Klaus D. Goepel, BPMSG. [Contact](#) . Last update: Sep 19, 2019 Rev: 49

Ingreso de indicadores sociales al software AHP

Pairwise Comparison

3 pairwise comparison(s). Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

With respect to AHP priorities, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1 ☒ Logro de productividad esperado	☐ Accidentabilidad Laboral	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2 ☒ Logro de productividad esperado	☐ Cumplimiento Hrs Capacitación	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9
3 ☒ Accidentabilidad Laboral	☐ Cumplimiento Hrs Capacitación	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

CR = 1% OK

Calculate [Download_\(.csv\)](#) ☐ dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Comparación por pares de indicadores sociales

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat		Priority	Rank	(+)	(-)
1	Logro de productividad esperado	72.7%	1	7.0%	7.0%
2	Accidentabilidad Laboral	20.0%	2	1.9%	1.9%
3	Cumplimiento Hrs Capacitación	7.3%	3	0.7%	0.7%

Number of comparisons = 3
Consistency Ratio CR = 1.0%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3
1	1	4.00	9.00
2	0.25	1	3.00
3	0.11	0.33	1

Principal eigen value = 3.009
Eigenvector solution: 3 iterations, delta = 7.0E-9

Prioridades resultantes con pesos de ponderación de indicadores sociales

Anexo 4. Ficha técnica resina Vinnapas



Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

1. Identificación del producto y de la compañía

1.1 Datos sobre el producto:

Nombre comercial: VINNAPAS® 400
Product group: Dispersión polimérica
Uso de la sustancia o del preparado: Industrial.
Productos aglomerantes para: Productos de construcción .
La correspondiente aplicación debe realizarse de acuerdo con la técnica de uso/marketing técnico del fabricante.

1.2 Datos sobre el fabricante/proveedor:

Fabricante/proveedor: Wacker Chemical Corporation
3301 Sutton Road
Adrian, MI 49221-9397
EE UU
Customer information: Wacker Chemical Corporation, Polymers Division
3301 Sutton Road
Adrian, Michigan 49221-9397
USA
InfoLine:
Teléfono (800) 523-9476, Fax (517) 264-4088
Horas de la operación:
Lunes a viernes, 8 am a 5 pm
Website corporativo: www.wacker.com
Emergency telephone no. (24h): (517) 264-8500
Transportation emergency: (800) 424-9300 (CHEMTREC, USA)
(703) 527-3887 (CHEMTREC, international)

El Departamento de Seguridad de Productos y Asuntos Regulatorios preparó esta MSDS.

2. Composición/información sobre los componentes

2.1 Caracterización química (preparación)

Caracterización química
Copolímero de: Acetato de vinilo + etileno (dispersión en agua) .

2.2 Indicaciones acerca de los componentes:

Este material no contiene ninguna sustancia peligrosa en concentraciones iguales o superiores a las sujetas a declaración obligatoria por la OSHA y el VHMIS.
Las sustancias referidas en los subapartados HAPS (sustancias dañinas peligrosas) y en la "Proposición California 65" calificadas como carcinógenas o tóxicas y que no se incluyan en la sección 2, sólo están presentes en cantidades inferiores al 0,1 % por sustancias de la lista Proposición California 65 o debajo de 1% por no-cancerígenos HAPS-sustancias o están ligadas al producto de forma inseparable.

3. Identificación de los peligros

3.1 Aventura clasificaciones

CLASIFICACIÓN HMIS® (Producto tal como fue embalado):

Salud: 1 Incendio: 1 Reactividad: 0 PPE: B

Hazardous Materials Identification System y HMIS son marcas comerciales registradas de National Paint and Coatings Association. (Los códigos de HMIS están basados en contacto con el producto tal como fue embalado y con cualquier subproducto de la hidrólisis, si estuviera presente.)

Clasificación según la WHMIS canadiense: Ninguna.

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

3.2 Descripción de la emergencia y peligros potenciales

Este material no es peligroso de acuerdo con los criterios de OSHA. Este material no es peligroso de acuerdo con los criterios de WHMIS.

Peligros físicos:

No presenta riesgos físicos conocidos.

Efectos de salud agudos**Ruta de la entrada o del contacto posible:**

ojos , piel , Inhalación , Ingestión .

Contacto visual:

Puede causar irritación leve y temporal de los ojos

Contacto de la piel:

Puede causar una reacción alérgica en la piel

Inhalación:

No cabe esperar toxicidad respiratoria aguda.

Ingestión:

Se estima descartada la posibilidad de ingestión en las aplicaciones industriales.

Información adicional sobre efectos de salud agudos:

La evaluación toxicológica se basa en efectos conocidos de la sustancia o sustancias activas.

3.3 Indicaciones adicionales:**Efectos de salud crónicos:**

Contiene uno o varios productos químicos en concentraciones inferiores al 0,1 % que pueden causar: sensibilización de la piel .

Condiciones médicas que se pueden agravar por la exposición:

desconocido

Toxinas carcinógenas y reproductivas:

Este material no contiene ninguna toxinas reproductiva en o sobre los niveles denunciados del OSHA o de WHMIS. No hay ingredientes carcinógenos presentes en este material a un valor del 0,1% o superior.

Consulte la sección 11 para determinar la información toxicológica, si la hubiere.

4. Primeros auxilios**4.1 Indicaciones generales:**

En caso de irritación u otros síntomas, solicitar asistencia médica. Antes de acudir al médico, quítase la ropa y los zapatos contaminados. Lleve siempre consigo la ficha de datos sobre seguridad cuando acuda al médico.

4.2 Después de la inhalación

En caso de inhalación de aerosol, llevar a la persona afectada al aire libre. No es necesario aplicar medidas especiales.

4.3 Después del contacto con la piel

Si hay contacto con la piel, inmediatamente enjuague la piel con agua abundante por al menos 15 min. Lavar con agua y jabón.

4.4 Después del contacto con los ojos

Si hay contacto con los ojos, inmediatamente separe los párpados y enjuague con agua abundante por al menos 15 min.

4.5 Después de la ingestión

En caso de ingestión, dé varios vasos de agua perno no induzca el vómito. Si ocurre el vómito dé fluidos otra vez. Si hay vómitos, suministre fluidos adicionales.

5. Medidas de lucha contra incendios**5.1 Características inflamables:****propiedad:**

Punto de inflamación.....: no es aplicable
Punto / intervalo de ebullición: aprox. 100 °C (212 °F) a 1013 hPa
Límite de explosión inferior: no es aplicable
Temperatura de ignición: no es aplicable

Valor:**Método:**

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

5.2 Peligros del fuego y de la explosión:

Este material es combustible cuando se encuentra en estado seco. Este material no presenta ningún tipo de peligro inusual de incendio o explosión.

5.3 Medios recomendados de extinción:

En función de la causa del fuego, utilizar los medios de extinción adecuados. Se puede usar agua para enfriar tanques y estructuras adyacentes al incendio.

5.4 Medios de extinción no idóneos:

No aplicable

5.5 Peligros especiales que conllevan la sustancia o la misma preparación, los productos de su combustión o los gases generados

no procede .

5.6 Procedimientos de la lucha contra el fuego:

Los bomberos deben estar equipados con indumentaria de protección completa, incluido un aparato respiratorio de circulación cerrada.

6. Medidas en caso de liberación accidental**6.1 Medidas de prevención:**

Usar un equipo de protección personal (ver punto 8). Si el material de derrama, existe el peligro de resbalarse.

Nivel de HAZWOPER PPE: C

6.2 Contención:

No verter a las aguas o al alcantarillado. Contener el líquido derramado con el material adecuado (por ejemplo, tierra).

Los derrames de material que podrían alcanzar las aguas superficiales deben notificarse al número telefónico gratuito del Centro Nacional de Respuesta de la Guardia Costera de los Estados Unidos: (800) 424-8802.

6.3 Métodos de limpieza/recogida

Recoger con medios mecánicos y eliminar de forma adecuada. En pequeñas cantidades: Recoger con un material absorbente, p.ej. con kieselgur y eliminar de forma adecuada. Grandes cantidades de producto deben encerrarse en diques y trasvasarse a recipientes adecuados. Limpiar a continuación con agua en abundancia. Eliminar adecuadamente el agua del lavado.

7. Manipulación y almacenamiento**7.1 Indicaciones generales:**

Evitar exposición mediante medidas técnicas o con equipo protector personal.

7.2 Manipulación

Indicaciones sobre el manipulado seguro:

Cuando se derrama esta sustancia aumenta el peligro de resbalar.

Indicaciones para la protección contra incendios y explosión:

No se requieren medidas especiales de protección contra incendios y explosiones.

7.3 Almacenamiento

Requisitos que deben cumplir los locales de almacenamiento y los envases:

Proteger de las heladas.

Indicaciones para el almacenamiento conjunto:

no procede .

Otros datos sobre las condiciones de almacenamiento:

no procede .

Temperatura mínima en almacenamiento y transporte: 0 °C (32 °F)

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

8. Delimitación de la exposición y protección personal**8.1 Controles de la ingeniería****Ventilación:**

Utilizar con una ventilación suficiente.

Extractor local:

no es necesario

8.2 Sustancias relacionadas junto con los valores límite, asignados a los puestos de trabajo y que deben vigilarse**Valores límite del aire en el puesto de trabajo:**

N° CAS	Sustancia	Tipo	mg/m ³	ppm	E/A
108-05-4	Acetato de vinilo	ACGIH TWA		10.0	

Re acetato de vinilo (CAS no. 108-05-4): STEL es 15 ppm, carcinogenicidad: A3 (ACGIH).

8.3 Personal del equipo de la protección (PPE)**Protección respiratoria:**

no es necesario

Protección de la mano:

Guantes de goma

Protección de ojo:

Gafas de protección para productos químicos

La otra ropa protectora o equipo:

Indumentaria de protección para cubrir las partes de los brazos, piernas y cuerpo no protegidas.

8.4 Medidas generales de la higiene y de la protección:

Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. No comer ni beber durante el trabajo. Lávese minuciosamente después de manejar el producto.

9. Propiedades físicas y químicas**9.1 Apariencia**

Estado físico / forma: líquido
Color: blanco
Olor: Débil

9.2 Datos relevantes para la seguridad**propiedad:****Valor:****Método:**

Punto / intervalo de fusión.....: aprox. 0.00 °C (32 °F)
Punto / intervalo de ebullición: aprox. 100 °C (212 °F) a 1013 hPa
Punto de inflamación.....: no es aplicable
Temperatura de ignición: no es aplicable
Límite de explosión inferior: no es aplicable
Presión de vapor: 23 hPa a 20 °C (68 °F)
Densidad: 1.05 g/cm³

(método específico)

Solubilidad en agua.....: moderadamente soluble
Índice pH.....: 4.0 - 5.0
Viscosidad (dinámica): 1800 - 2700 mPa.s

(ASTM E 70)
(BROOKFIELD)**9.3 Indicaciones adicionales**

VOC: 2.43 g/l

(Valor de cálculo)

10. Estabilidad y reactividad**10.1 Indicaciones generales:**

No se conocen reacciones peligrosas si el producto se almacena y maneja correctamente.

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

10.2 Condiciones que deben evitarse

no se conocen .

10.3 Materias que deben evitarse

no se conocen .

10.4 Productos de descomposición peligrosos

Si se almacena y manipula de acuerdo con las normas: no se conocen . A temperatura más elevada: ácido acético .

10.5 Indicaciones adicionales:

La polimerización peligrosa no puede ocurrir.

11. Información toxicológica**11.1 Información sobre los efectos toxicológicos****11.1.1 Indicaciones generales**

Los datos determinados para el producto completo tienen prioridad sobre los datos de los ingredientes individuales.

La prueba toxicológica se ha conducido con los productos similares.

11.1.2 Toxicidad aguda**Evaluación:**

A partir de los datos existentes, no se esperan efectos tóxicos agudos tras una única exposición oral.

Datos sobre el producto:

Vía de exposición	Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
oral	LD ₅₀ : > 2000 mg/kg	rata	Final de la analogía OECD 423

11.1.3 Corrosión o irritación cutáneas**Evaluación:**

A partir de los datos existentes, no se espera una irritación de la piel clínicamente relevante.

Datos sobre el producto:

Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
no irritante	conejo	Final de la analogía OECD 404

11.1.4 Lesiones oculares graves o irritación ocular**Evaluación:**

A partir de los datos existentes, no se espera una irritación de los ojos clínicamente relevante.

Datos sobre el producto:

Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
no irritante	conejo	Final de la analogía OECD 405

11.1.5 Sensibilización respiratoria o cutánea**Evaluación:**

Sobre este parámetro de peligro no se dispone de datos de prueba toxicológicos para el producto completo.

Datos sobre los ingredientes:

5-cloro-2-metil-4-isotiazolina-3-on y 2-metil-4-isotiazolina-3-on (mezcla con una relación 3:1):

Vía de exposición	Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
dermal	sensibilizante Induction threshold: 10-20 ppm	Voluntarios; Prueba del parche dérmico en seres humanos	literatura

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

11.1.6 Mutagenicidad en células germinales**Evaluación:**

Los datos disponibles no han aportado ningún indicio de un potencial mutagénico relevante.

Datos sobre el producto:

Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
negativo/a	mutation assay (in vitro) células bacterianas	Final de la analogía OECD 471

11.1.7 Carcinogenicidad**Evaluación:**

Sobre este parámetro de peligro no se dispone de datos de prueba toxicológicos para el producto completo.

11.1.8 Toxicidad para la reproducción**Evaluación:**

Sobre este parámetro de peligro no se dispone de datos de prueba toxicológicos para el producto completo.

11.1.9 Toxicidad específica en determinados órganos (stot) (exposición única)**Evaluación:**

Sobre este parámetro de peligro no se dispone de datos de prueba toxicológicos para el producto completo.

11.1.10 Toxicidad específica en determinados órganos (stot) (exposiciones repetidas)**Evaluación:**

Sobre este parámetro de peligro no se dispone de datos de prueba toxicológicos para el producto completo.

11.1.11 Peligro por aspiración**Evaluación:**

En base a las propiedades fisicoquímicas del producto, no se espera riesgo de aspiración.

12. Información ecológica**12.1 Toxicidad****Evaluación:**

No cabe esperar efectos nocivos en organismos acuáticos. Según la experiencia hecha hasta la fecha no son de prever efectos negativos para las depuradoras.

Datos sobre el producto:

Resultado/Efecto	Muestra/sistema de pruebas	Fuente
LC ₅₀ : > 100 mg/l	trucha irisada (Oncorhynchus mykiss) (96 h)	Final de la analogía OECD 203
EC ₁₀ : > 1000 mg/l	lodo activado (0.5 h)	Final de la analogía

12.2 Persistencia y degradabilidad**Evaluación:**

Componente polímero: No fácil de degradar biológicamente. Eliminación por adsorción con lodos activados. La separación puede realizarse mediante precipitación de floculación.

12.3 Potencial de bioacumulación**Evaluación:**

No es de esperar que tengan lugar efectos contraproducentes.

12.4 Movilidad en el suelo**Evaluación:**

No es de esperar que tengan lugar efectos contraproducentes.

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

12.5 Otros efectos adversos

ningunos sabidos

12.6 Observaciones adicionales

Los resultados ecotoxicológicos indicados se obtuvieron mediante pruebas con productos similares.

13. Consideraciones sobre eliminación**13.1 Disposición del producto**

Recomendación:

Eliminación correcta mediante incineración en una incineradora para residuos especiales. Cantidades pequeñas pueden incinerarse en una incineradora para basuras domésticas en observancia de la normativa local.

13.2 Disposición de empaquetado

Recomendación:

Vaciar los envases por completo (no debe gotear ni caer producto; limpiar las paredes con una espátula). Preferentemente los envases deben reutilizarse o aprovecharse observando la normativa local/nacional aplicable en cada caso.

Producto de limpieza recomendado:

agua

14. Información sobre el transporte**14.1 Transporte (DOT - Estados Unidos; TDG - Canada)**

Valoración no es un material peligroso

Información adicional Proteger del congelamiento cuando el producto esté expuesto a temperaturas frías próximas a los 0 °C (32 °F) o inferiores.

14.2 Transporte por el mar IMDG-Code

Valoración no es un material peligroso

14.3 Transporte aéreo ICAO-TI/IATA-DGR

Valoración no es un material peligroso

15. Información reglamentaria**15.1 Los Estados Unidos regulaciones federales****Estatus del inventario de TSCA e información de TSCA:**

Este material o sus componentes se enumera encendido o está en conformidad con los requisitos del inventario químico de la sustancia de TSCA.

Notificación de exportación TSCA 12(b):

Este material no contiene ninguna sustancia química reglamentada por TSCA 12(b).

Sustancias químicas reglamentadas por CERCLA:

Este material no contiene ninguna sustancia química reglamentada por CERCLA.

Sustancias químicas según SARA 302 EHS:

Este material no contiene ninguna sustancia extremadamente peligrosa según SARA.

Clase de peligro según SARA 311/312:

Este producto no presenta ningún peligro según SARA 311/312.

Sustancias químicas según SARA 313:

Este material no contiene ninguna sustancia química SARA 313 por encima de los niveles mínimos.

HAPS (Hazardous Air Pollutants):

108-05-4	acetato de vinilo
67-56-1	Metanol
50-00-0	formaldehído

15.2 Los Estados Unidos regulaciones del estado

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

Carcinógenos según la Proposición 65 de California:

50-00-0 formaldehído

AVISO. Este producto contiene una sustancia química clasificada como carcinógena en el estado de California.

Toxinas reproductivas según la Proposición 65 de California:

67-56-1 Metanol

AVISO. Este producto contiene una sustancia química clasificada como tóxica para la reproducción en el estado de California.

Lista de Sustancias de Massachusetts:

Este material no contiene ningún compuesto listado.

New Jersey Right-to-Know Hazardous Substance List (lista de Sustancias Peligrosas de Nueva Jersey con Derecho a Saber):

Este material no contiene ningún compuesto listado.

Pennsylvania Right-to-Know Hazardous Substance List (Lista de Sustancias Peligrosas de Pennsylvania con Derecho a Saber):

Este material no contiene ningún compuesto listado.

15.3 Regulaciones canadienses

Este producto ha sido clasificado de acuerdo con los criterios de peligro de la CPR y la MSDS contiene toda la información requerida por la CPR.

Clases de peligro según WHMIS:

Ninguna.

Estado según DSL:

Este material o sus componentes están listados en la Lista Canadiense de Sustancias Nacionales.

Sustancias químicas no DSL:

Este material no contiene ninguna sustancia química no DSL.

Canadian Ingredient Disclosure List (Lista Canadiense de Divulgación de Ingredientes):

Este material no contiene ningún compuesto listado.

15.4 Otras normativas internacionales**Símbolos de peligro de la UE:**

	Xi	Irritante
---	----	-----------

Frases de riesgo de la UE:

Frase R	Denominación
R43	Posibilidad de sensibilización en contacto con la piel.

Frases de seguridad de la UE:

Frase S	Denominación
S36/37	Úsense indumentaria y guantes de protección adecuados.

Indicaciones sobre el Estado de Registro Internacional

Incluido o conforme a las listas siguientes:

EINECS - Europe

ECL - Korea

ENCS - Japan

IECSC - China

DSL - Canada

TSCA - USA

16. Otra información**16.1 Información adicional:**

Esta hoja de datos sobre seguridad de los materiales (MSDS) cumple con los requisitos de la Norma Federal de Comunicación de Riesgos (29 CFR 1910.1200) de la OSHA. Este producto se ha clasificado de acuerdo con los criterios de peligro de las Regulaciones de Productos Controlados (CPR), y la MSDS contiene toda la información requerida por las CPR. Esta información se refiere al material específico designado y podría no ser válido para tal material utilizado en combinación con cualquier otro

Hoja De Datos Material De Seguridad

Material: 60066201

VINNAPAS® 400

Versión: 1.6 (US)

Fecha de Impresión: 03/20/2013

Revisada: 12/17/2012

material o en cualquier proceso. Tal información es a nuestro mejor entender precisa y confiable, en el momento de la fecha de compilación. No obstante ello, no se hace ningún tipo de representación o garantía, expresa o implícita, con respecto a su exactitud, confiabilidad o idoneidad. Es responsabilidad del usuario satisfacerse con respecto a lo apropiada y completa que resulte tal información para su propio uso particular. No aceptamos ningún tipo de responsabilidad por pérdida o daño algunos que pudieran ocurrir debido al uso de esta información. No hay nada en este documento que se puede interpretar como una recomendación de usos que infringen patentes válidas o como una emisión de una licencia bajo patentes válidas. Esta MSDS proporciona información selecta sobre las regulaciones de este producto, inclusive sus componentes. No se preparó para que incluya todas las Es responsabilidad del usuario saber y cumplir con todas las reglas, reglamentos y leyes aplicables relacionados al producto que se está usando.

Las líneas verticales del margen izquierdo hacen referencia a modificaciones en relación con la versión anterior.

16.2 Glosario de términos:

ACGIH - Conferencia Norteamericana de Higienistas
Industriales Gubernamentales (Estados Unidos)
DOT - Departamento de Transporte (Estados Unidos)
hPa - Hectopascales
mPa's - Milí Pascal-Segundos
OSHA - Administración de Seguridad y Salud Ocupacional
(Estados Unidos)
PEL - Límite de exposición permitida (Estados Unidos)

ppm - Partes por millón
SARA - Ley de Enmiendas y Reautorización del Fondo
Superfund (Estados Unidos)
STEL - Límite de exposición a corto plazo (Estados Unidos)
TSCA - Ley de Control de Sustancias Tóxicas (Estados Unidos)
TWA - Time Weighted Average (Estados Unidos)
WHMIS - Canadian Workplace Hazardous Materials
Identification System

Métodos de la determinación de la punta de destello	Nombre común
ASTM D56	Tagliabue (Tag) closed cup
ASTM D92, DIN 51376, ISO 2592	Cleveland open cup
ASTM D93, DIN 51758, ISO 2719	Pensky-Martens closed cup
ASTM D3278, DIN 55680, ISO 3679	Setaflash or Rapid closed cup
DIN 51755	Abel-Pensky closed cup

16.3 Vector de conversión:

Presión: 1 hPa * 0.75 = 1 mm Hg = 1 torr; 1 bar = 1000 hPa
Viscosidad: 1 mPa's = 1 centipoise (cP)

Anexo 5. Reporte de corriente de materiales

Materials & Streams Report July 27, 2021 **for TESIS AMBIENTAL-AGLOMERADO DE VIRUTAS DE CUERO-x6600**

1. OVERALL PROCESS DATA

Annual Operating Time	2,653.39h
Unit Production Ref. Rate	10,490.11 MP Entities
Batch Size	524.51 MP Entities
Recipe Batch Time	293.59h
Recipe Cycle Time	124.20h
Number of Batches per Year	20.00

MP = Flow of Discrete Entity 'CUERO REG. IMP. Y PINTADO' in Stream 'DS-106'

2.1 STARTING MATERIAL REQUIREMENTS (per Section)

Section	Starting Material	Active Product	Amount Needed (kg Sin/MP Entity)	Molar Yield (%)	Mass Yield (%)	Gross Mass Yield (%)
Main Section	(none)	(none)	0.00	Unknown	Unknown	Unknown

Sin = Section Starting Material, Aout = Section Active Product

2.2 BULK MATERIALS (Entire Process)

Material	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Water	5,800	290.000	0.553
VIRUTAS DE CUER	86,800	4,340.000	8.274
Aniline	2,623	131.126	0.250
Methanol	7,868	393.379	0.750
ALCOHOL POLIVIN	26,717	1,335.840	2.547
TOTAL	129,807	6,490.345	12.374

2.3 BULK MATERIALS (per Section)

SECTIONS IN: Main Branch

Main Section

Material	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Water	5,800	290.000	0.553
VIRUTAS DE CUER	86,800	4,340.000	8.274
Aniline	2,623	131.126	0.250
Methanol	7,868	393.379	0.750
ALCOHOL POLIVIN	26,717	1,335.840	2.547
TOTAL	129,807	6,490.345	12.374

2.4 BULK MATERIALS (per Material)

Water

Procedure	% Total	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Main Section (Main Branch)				
P-1	100.00	5,800	290.000	0.553
TOTAL	100.00	5,800	290.000	0.553

VIRUTAS DE CUER

Procedure	% Total	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Main Section (Main Branch)				
P-2	100.00	86,800	4,340.000	8.274
TOTAL	100.00	86,800	4,340.000	8.274

Aniline

Procedure	% Total	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Main Section (Main Branch)				
P-14	100.00	2,623	131.126	0.250
TOTAL	100.00	2,623	131.126	0.250

Methanol

Procedure	% Total	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Main Section (Main Branch)				
P-14	100.00	7,868	393.379	0.750
TOTAL	100.00	7,868	393.379	0.750

ALCOHOL POLIVIN

Procedure	% Total	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Main Section (Main Branch)				
P-6	100.00	26,717	1,335.840	2.547
TOTAL	100.00	26,717	1,335.840	2.547

2.5 BULK MATERIALS: SECTION TOTALS (kg/MP Entity)

Raw Material	Main Section
Water	0.553
VIRUTAS DE CUER	8.274
Aniline	0.250
Methanol	0.750
ALCOHOL POLIVIN	2.547
TOTAL	12.374

2.6 BULK MATERIALS: SECTION TOTALS (kg/batch)

Raw Material	Main Section
Water	290.000
VIRUTAS DE CUER	4,340.000
Aniline	131.126
Methanol	393.379
ALCOHOL POLIVIN	1,335.840
TOTAL	6,490.345

2.7 BULK MATERIALS: SECTION TOTALS (kg/yr)

Raw Material	Main Section
Water	5,800
VIRUTAS DE CUER	86,800
Aniline	2,623
Methanol	7,868
ALCOHOL POLIVIN	26,717
TOTAL	129,807

3. STREAM DETAILS

Stream Name	S-101	S-108	S-102	S-103
Source	INPUT	P-1	INPUT	P-2
Destination	P-1	P-4	P-2	P-3
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	1.01	10.13	1.01	10.13
Density (g/L)	994.70	994.70	1,024.72	1,023.59
Total Enthalpy (kW-h)	8.41	8.41	29.50	29.50
Specific Enthalpy (kcal/kg)	24.96	24.96	5.85	5.85
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	1.00	1.00	0.23	0.23
Component Flowrates (kg/batch)				
Fats	0.000	0.000	73.780	73.780
Proteins	0.000	0.000	2,508.520	2,508.520
SULFATO DE CROM	0.000	0.000	1,106.700	1,106.700
Water	290.000	290.000	651.000	651.000
TOTAL (kg/batch)	290.000	290.000	4,340.000	4,340.000
TOTAL (L/batch)	291.544	291.544	4,235.323	4,239.965
Stream Name	S-107	S-104	S-105	S-106
Source	P-3	P-4	P-12	INPUT
Destination	P-4	P-12	P-6	P-6
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	10.13	10.13	10.13	1.01
Density (g/L)	1,023.59	1,021.73	1,021.73	994.70
Total Enthalpy (kW-h)	29.50	37.91	37.91	0.16
Specific Enthalpy (kcal/kg)	5.85	7.04	7.04	0.10
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	0.23	0.28	0.28	0.00
Component Flowrates (kg/batch)				
ALCOHOL POLIVIN	0.000	0.000	0.000	1,335.840
Fats	73.780	73.780	73.780	0.000
Proteins	2,508.520	2,508.520	2,508.520	0.000
SULFATO DE CROM	1,106.700	1,106.700	1,106.700	0.000
Water	651.000	941.000	941.000	0.000
TOTAL (kg/batch)	4,340.000	4,630.000	4,630.000	1,335.840
TOTAL (L/batch)	4,239.965	4,531.509	4,531.509	1,342.952

Stream Name	S-109	DS-101	DS-102	S-110
Source	P-6	P-5	P-8	P-9
Destination	P-5	P-8	P-9	OUTPUT
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	10.13	10.13	10.13	10.13
Density (g/L)	1,015.56	1,015.56	1,015.56	1,015.56
Total Enthalpy (kW-h)	38.07	38.07	38.07	0.08
Specific Enthalpy (kcal/kg)	5.49	5.49	5.49	5.49
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	0.22	0.22	0.22	0.22
Component Flowrates (kg/batch)				
ALCOHOL POLIVIN	1,335.840	1,335.840	1,335.840	2.936
Fats	73.780	73.780	73.780	0.162
Proteins	2,508.520	2,508.520	2,508.520	5.514
SULFATO DE CROM	1,106.700	1,106.700	1,106.700	2.432
Water	941.000	941.000	941.000	2.068
TOTAL (kg/batch)	5,965.840	5,965.840	5,965.840	13.113
TOTAL (L/batch)	5,874.461	5,874.461	5,874.461	12.912
Stream Name	DS-103	S-111	DS-104	S-112
Source	P-9	P-10	P-10	P-13
Destination	P-10	OUTPUT	P-13	OUTPUT
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	10.13	10.13	10.13	10.13
Density (g/L)	1,015.56	994.70	1,019.51	1,019.51
Total Enthalpy (kW-h)	37.98	26.96	11.02	0.01
Specific Enthalpy (kcal/kg)	5.49	24.96	1.89	1.89
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	0.22	1.00	0.08	0.08
Component Flowrates (kg/batch)				
ALCOHOL POLIVIN	1,332.904	0.000	1,332.904	1.392
Fats	73.618	0.000	73.618	0.077
Proteins	2,503.006	0.000	2,503.006	2.614
SULFATO DE CROM	1,104.268	0.000	1,104.268	1.153
Water	938.932	929.542	9.389	0.010
TOTAL (kg/batch)	5,952.727	929.542	5,023.185	5.245
TOTAL (L/batch)	5,861.549	934.491	4,927.058	5.145

Stream Name	DS-105	S-113	DS-106
Source	P-13	INPUT	P-14
Destination	P-14	P-14	OUTPUT
Stream Properties			
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	10.13	1.01	1.01
Density (g/L)	1,019.51	836.26	998.80
Total Enthalpy (kW-h)	11.01	8.84	19.86
Specific Enthalpy (kcal/kg)	1.89	14.51	3.08
Heat Capacity (kcal/kg-°C)	0.08	0.58	0.12
Component Flowrates (kg/batch)			
ALCOHOL POLIVIN	1,331.512	0.000	1,331.512
Aniline	0.000	131.126	131.126
Fats	73.541	0.000	73.541
Methanol	0.000	393.379	393.379
Proteins	2,500.393	0.000	2,500.393
SULFATO DE CROM	1,103.114	0.000	1,103.114
Water	9.380	0.000	9.380
TOTAL (kg/batch)	5,017.940	524.505	5,542.445
TOTAL (L/batch)	4,921.913	627.207	5,549.121

4. OVERALL COMPONENT BALANCE (kg/batch)

COMPONENT	INITIAL	INPUT	OUTPUT	FINAL	OUT-IN
ALCOHOL POLIVIN	0.000	1,335.840	1,335.840	0.000	0.000
Aniline	0.000	131.126	131.126	0.000	0.000
Fats	0.000	73.780	73.780	0.000	0.000
Methanol	0.000	393.379	393.379	0.000	0.000
Nitrogen	15.014	0.000	0.000	15.014	0.000
Oxygen	4.558	0.000	0.000	4.558	0.000
Proteins	0.000	2,508.520	2,508.520	0.000	0.000
SULFATO DE CROM	0.000	1,106.700	1,106.700	0.000	0.000
Water	0.000	941.000	941.000	0.000	0.000
TOTAL	19.572	6,490.345	6,490.345	19.572	0.000

Anexo 6. Reporte de evaluación económica

Economic Evaluation Report **for TESIS AMBIENTAL-AGLOMERADO DE VIRUTAS DE CUERO-x6600**

July 27, 2021

1. EXECUTIVE SUMMARY (2021 prices)

Total Capital Investment	2,999,000 \$
Capital Investment Charged to This Project	2,999,000 \$
Operating Cost	1,353,000 \$/yr
Revenues	797,000 \$/yr
Cost Basis Annual Rate	10,490 MP Entities/yr
Unit Production Cost	129.02 \$/MP Entity
Unit Production Revenue	76.00 \$/MP Entity
Gross Margin	- 69.76 %
Return On Investment	- 10.20 %
Payback Time	N/A
IRR (After Taxes)	N/A
NPV (at 7.0% Interest)	- 5,478,000 \$

MP = Flow of Discrete Entity 'CUERO REG. IMP. Y PINTADO' in Stream 'DS-106'

2. MAJOR EQUIPMENT SPECIFICATION AND FOB COST (2021 prices)

Quantity/ Standby/ Staggered	Name	Description	Unit Cost (\$)	Cost (\$)
1 / 0 / 0	V-101	Vertical-On-Legs Tank Vessel Volume = 323.94 L	25,000	25,000
1 / 0 / 0	V-102	Vertical-On-Legs Tank Vessel Volume = 4711.07 L	34,000	34,000
1 / 0 / 0	V-103	Vertical-On-Legs Tank Vessel Volume = 5035.01 L	34,000	34,000
1 / 0 / 0	V-104	Vertical-On-Legs Tank Vessel Volume = 6527.18 L	39,000	39,000
1 / 0 / 0	SR-101	Shredder Size/Capacity = 2013.04 kg/h	109,000	109,000
1 / 0 / 0	SR-102	Shredder Size/Capacity = 571.05 kg/h	101,000	101,000
		Unlisted Equipment		86,000
			TOTAL	428,000

3. FIXED CAPITAL ESTIMATE SUMMARY (2021 prices in \$)

3A. Total Plant Direct Cost (TPDC) (physical cost)

1. Equipment Purchase Cost	428,000
2. Installation	201,000
3. Process Piping	150,000
4. Instrumentation	171,000
5. Insulation	13,000
6. Electrical	43,000
7. Buildings	192,000
8. Yard Improvement	64,000
9. Auxiliary Facilities	171,000
TPDC	1,432,000

3B. Total Plant Indirect Cost (TPIC)

10. Engineering	358,000
11. Construction	501,000
TPIC	859,000

3C. Total Plant Cost (TPC = TPDC+TPIC)

TPC	2,291,000
------------	------------------

3D. Contractor's Fee & Contingency (CFC)

12. Contractor's Fee	115,000
13. Contingency	229,000
CFC = 12+13	344,000

3E. Direct Fixed Capital Cost (DFC = TPC+CFC)

DFC	2,634,000
------------	------------------

4. LABOR COST - PROCESS SUMMARY

Labor Type	Unit Cost (\$/h)	Annual Amount (h)	Annual Cost (\$)	%
Operator	69.00	12,051	831,503	100.00
TOTAL		12,051	831,503	100.00

5. MATERIALS COST - PROCESS SUMMARY

Bulk Material	Unit Cost (\$)	Annual Amount		Annual Cost (\$)	%
Water	0.000	5,800	kg	0	0.00
VIRUTAS DE CUER	0.000	86,800	kg	0	0.00
Aniline	0.880	2,623	kg	2,308	9.03
Methanol	0.240	7,868	kg	1,888	7.38
ALCOHOL POLIVIN	0.800	26,717	kg	21,373	83.59

Discrete Material	Unit Cost (\$/Entity)	Annual Amount (Entities)		Annual Cost(\$)	%
TOTAL				25,569	100.00

NOTE: Bulk material consumption amount includes material used as:

- Raw Material
- Cleaning Agent
- Heat Transfer Agent (if utilities are included in the operating cost)

Anexo 7. Reporte de impacto ambiental

Environmental Impact Report for TESIS AMBIENTAL-AGLOMERADO DE VIRUTAS DE CUERO-x6600

July 27, 2021

1. WASTE GENERATION BY TYPE

1A. Aqueous Waste

Component	kg/MP Entity	kg/Batch	kg/Year	%
TOTAL		0.000	0	

1B. Organic Waste

Component	kg/MP Entity	kg/Batch	kg/Year	%
TOTAL		0.000	0	

1C. Solid Waste

Component	kg/MP Entity	kg/Batch	kg/Year	%
ALCOHOL POLIVIN	0.008	4.328	87	23.58
Fats	0.000	0.239	5	1.30
Proteins	0.015	8.127	163	44.27
SULFATO DE CROM	0.007	3.586	72	19.53
Water	0.004	2.078	42	11.32
TOTAL	0.035	18.358	367	100.00

1D. Emissions

Component	kg/MP Entity	kg/Batch	kg/Year	%
Water	1.772	929.542	18,591	100.00
TOTAL	1.772	929.542	18,591	100.00

1E. Total Waste

Component	kg/MP Entity	kg/Batch	kg/Year	%
ALCOHOL POLIVIN	0.008	4.328	87	0.46
Fats	0.000	0.239	5	0.03
Proteins	0.015	8.127	163	0.86
SULFATO DE CROM	0.007	3.586	72	0.38
Water	1.776	931.620	18,632	98.28
TOTAL	1.807	947.900	18,958	100.00

MP = Flow of Discrete Entity 'CUERO REG. IMP. Y PINTADO' in Stream 'DS-106'

2.1 WASTE GENERATION BY SECTION

Main Section (kg/Year)

Component	Aqueous Waste	Organic Waste	Solid Waste	Gaseous Emissions	Subtotal
ALCOHOL POLIVIN	0	0	87	0	87
Aniline	0	0	0	0	0
Fats	0	0	5	0	5
Methanol	0	0	0	0	0
Nitrogen	0	0	0	0	0
Oxygen	0	0	0	0	0
Proteins	0	0	163	0	163
SULFATO DE CROM	0	0	72	0	72
Water	0	0	42	18,591	18,632
TOTAL	0	0	367	18,591	18,958

Entire Process (kg/Year)

Component	Aqueous Waste	Organic Waste	Solid Waste	Gaseous Emissions	Subtotal
ALCOHOL POLIVIN	0	0	87	0	87
Aniline	0	0	0	0	0
Fats	0	0	5	0	5
Methanol	0	0	0	0	0
Nitrogen	0	0	0	0	0
Oxygen	0	0	0	0	0
Proteins	0	0	163	0	163
SULFATO DE CROM	0	0	72	0	72
Water	0	0	42	18,591	18,632
TOTAL	0	0	367	18,591	18,958

2.2 WASTE GENERATION BY SECTION AND TYPE (kg/Year)

Section Name	Aqueous Waste	Organic Waste	Solid Waste	Gaseous Emissions
Main Section	0	0	367	18,591
TOTAL	0	0	367	18,591

2.3 WASTE GENERATION DISTRIBUTION BY SECTION AND TYPE (%)

Section Name	Aqueous Waste	Organic Waste	Solid Waste	Gaseous Emissions
Main Section	0	0	100	100
TOTAL	0	0	100	100

3. LUMPED ENVIRONMENTAL STREAM PROPERTIES SECTION

Batch Time = 293.6 h

Stream Name	S-101	S-102	S-106	DS-106
Source	INPUT	INPUT	INPUT	P-14
Destination	P-1	P-2	P-6	OUTPUT
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	1.01	1.01	1.01	1.01
Concentrations				
TOC (mg C/l)	0.000	302,100.402	0.000	274,678.708
COD (mg O/l)	0.000	1,126,735.902	0.000	1,061,752.134
ThOD (mg O/l)	0.000	1,126,735.902	0.000	1,061,752.134
BODu (mg O/l)	0.000	1,025,866.212	0.000	988,799.812
BOD5 (mg O/l)	0.000	705,100.597	0.000	536,418.971
TKN (mg N/l)	0.000	67,520.537	0.000	54,912.077
NH3 (mg N/l)	0.000	67,520.537	0.000	54,912.077
NO3/NO2 (mg N/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
TP (mg P/l)	0.000	11,845.708	0.000	9,011.853
TS (mg Slds/l)	0.000	592,285.415	0.000	450,592.631
TSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
VSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
DVSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
TDS (mg Slds/l)	0.000	592,285.415	0.000	450,592.631
VDS (mg Slds/l)	0.000	592,285.415	0.000	450,592.631
DVDS (mg Slds/l)	0.000	592,285.415	0.000	450,592.631
Daily Throughputs				
TOC (kg C/d)	0.000	104.593	0.000	124.599
COD (kg O/d)	0.000	390.098	0.000	481.629
ThOD (kg O/d)	0.000	390.098	0.000	481.629
BODu (kg O/d)	0.000	355.175	0.000	448.537
BOD5 (kg O/d)	0.000	244.120	0.000	243.329
TKN (kg N/d)	0.000	23.377	0.000	24.909
NH3 (kg N/d)	0.000	23.377	0.000	24.909
NO3/NO2 (kg N/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
TP (kg P/d)	0.000	4.101	0.000	4.088
TS (kg Slds/d)	0.000	205.061	0.000	204.397
TSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
VSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
DVSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
TDS (kg Slds/d)	0.000	205.061	0.000	204.397
VDS (kg Slds/d)	0.000	205.061	0.000	204.397
DVDS (kg Slds/d)	0.000	205.061	0.000	204.397

Stream Name	S-111	S-110	S-112	S-113
Source	P-10	P-9	P-13	INPUT
Destination	OUTPUT	OUTPUT	OUTPUT	P-14
Stream Properties				
Activity (U/ml)	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperature (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Pressure (bar)	10.13	10.13	10.13	1.01
Concentrations				
TOC (mg C/l)	0.000	217,805.981	259,116.182	396,803.291
COD (mg O/l)	0.000	812,345.221	966,418.791	1,809,866.223
ThOD (mg O/l)	0.000	812,345.221	966,418.791	1,809,866.223
BODu (mg O/l)	0.000	739,620.982	879,901.299	1,843,364.532
BOD5 (mg O/l)	0.000	508,357.903	604,775.676	0.000
TKN (mg N/l)	0.000	48,680.428	57,913.408	31,359.586
NH3 (mg N/l)	0.000	48,680.428	57,913.408	31,359.586
NO3/NO2 (mg N/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
TP (mg P/l)	0.000	8,540.426	10,160.247	0.000
TS (mg Slds/l)	0.000	427,021.297	508,012.352	0.000
TSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
VSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
DVSS (mg Slds/l)	0.000	0.000	0.000	0.000
TDS (mg Slds/l)	0.000	427,021.297	508,012.352	0.000
VDS (mg Slds/l)	0.000	427,021.297	508,012.352	0.000
DVDS (mg Slds/l)	0.000	427,021.297	508,012.352	0.000
Daily Throughputs				
TOC (kg C/d)	0.000	0.230	0.109	20.345
COD (kg O/d)	0.000	0.857	0.406	92.795
ThOD (kg O/d)	0.000	0.857	0.406	92.795
BODu (kg O/d)	0.000	0.781	0.370	94.512
BOD5 (kg O/d)	0.000	0.537	0.254	0.000
TKN (kg N/d)	0.000	0.051	0.024	1.608
NH3 (kg N/d)	0.000	0.051	0.024	1.608
NO3/NO2 (kg N/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
TP (kg P/d)	0.000	0.009	0.004	0.000
TS (kg Slds/d)	0.000	0.451	0.214	0.000
TSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
VSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
DVSS (kg Slds/d)	0.000	0.000	0.000	0.000
TDS (kg Slds/d)	0.000	0.451	0.214	0.000
VDS (kg Slds/d)	0.000	0.451	0.214	0.000
DVDS (kg Slds/d)	0.000	0.451	0.214	0.000

4. OVERALL BALANCE SECTION

ENVIRONMENTAL LOAD (per Batch)

hs per Batch = 293.6

Environmental Property	IN (kg/batch)	OUT (kg/batch)	(IN-OUT)/IN (% Reduction)
TOC	1,528.371	1,528.371	0.000
COD	5,907.251	5,907.251	0.000
ThOD	5,907.251	5,907.251	0.000
BODu	5,501.046	5,501.046	0.000
BOD5	2,986.329	2,986.329	0.000
TKN	305.640	305.640	0.000
NH3	305.640	305.640	0.000
NO3/NO2	0.000	0.000	0.000
TP	50.170	50.170	0.000
TS	2,508.520	2,508.520	0.000
TSS	0.000	0.000	0.000
VSS	0.000	0.000	0.000
DVSS	0.000	0.000	0.000
TDS	2,508.520	2,508.520	0.000
VDS	2,508.520	2,508.520	0.000
DVDS	2,508.520	2,508.520	0.000
CaCO3	0.000	0.000	0.000

ENVIRONMENTAL LOAD (per Year)

hs per Year = 2653.4

Environmental Property	IN (kg/year)	OUT (kg/year)	(IN-OUT)/IN (% Reduction)
TOC	30,567	30,567	0
COD	118,145	118,145	0
ThOD	118,145	118,145	0
BODu	110,021	110,021	0
BOD5	59,727	59,727	0
TKN	6,113	6,113	0
NH3	6,113	6,113	0
NO3/NO2	0	0	0
TP	1,003	1,003	0
TS	50,170	50,170	0
TSS	0	0	0
VSS	0	0	0
DVSS	0	0	0
TDS	50,170	50,170	0
VDS	50,170	50,170	0
DVDS	50,170	50,170	0
CaCO3	0	0	0

5. ENVIRONMENTAL PROPERTIES BY WASTE TYPE

ENVIRONMENTAL LOAD (per Batch)

hs per Batch = 293.6

Environmental Property	Solid Waste (kg/batch)	Aqueous Waste (kg/batch)	Organic Waste (kg/batch)	Emission (kg/batch)
TOC	4.145	0.000	0.000	0.000
COD	15.461	0.000	0.000	0.000
ThOD	15.461	0.000	0.000	0.000
BODu	14.077	0.000	0.000	0.000
BOD5	9.675	0.000	0.000	0.000
TKN	0.926	0.000	0.000	0.000
NH3	0.926	0.000	0.000	0.000
NO3_NO2	0.000	0.000	0.000	0.000
TP	0.163	0.000	0.000	0.000
TS	8.127	0.000	0.000	0.000
TSS	0.000	0.000	0.000	0.000
VSS	0.000	0.000	0.000	0.000
DVSS	0.000	0.000	0.000	0.000
TDS	8.127	0.000	0.000	0.000
VDS	8.127	0.000	0.000	0.000
DVDS	8.127	0.000	0.000	0.000
CaCO3	0.000	0.000	0.000	0.000

ENVIRONMENTAL LOAD (per Year)

hs per Year = 2653.4

Environmental Property	Solid Waste (kg/year)	Aqueous Waste (kg/year)	Organic Waste (kg/year)	Emission (kg/year)
TOC	83	0	0	0
COD	309	0	0	0
ThOD	309	0	0	0
BODu	282	0	0	0
BOD5	194	0	0	0
TKN	19	0	0	0
NH3	19	0	0	0
NO3_NO2	0	0	0	0
TP	3	0	0	0
TS	163	0	0	0
TSS	0	0	0	0
VSS	0	0	0	0
DVSS	0	0	0	0
TDS	163	0	0	0
VDS	163	0	0	0
DVDS	163	0	0	0
CaCO3	0	0	0	0

6. COMPONENT FATE SECTION

Component Allocation (Per Batch)

Component Name	Total In (kg/batch)	Out As Solid Waste (kg/batch)	Out As Aqueous Waste (kg/batch)	Out As Organic Waste (kg/batch)	Out As Emission (kg/batch)
ALCOHOL POLIVIN	1,335.840	4.328	0.000	0.000	0.000
Aniline	131.126	0.000	0.000	0.000	0.000
Fats	73.780	0.239	0.000	0.000	0.000
Methanol	393.379	0.000	0.000	0.000	0.000
Nitrogen	15.014	0.000	0.000	0.000	0.000
Oxygen	4.558	0.000	0.000	0.000	0.000
Proteins	2,508.520	8.127	0.000	0.000	0.000
SULFATO DE CROM	1,106.700	3.586	0.000	0.000	0.000
Water	941.000	2.078	0.000	0.000	929.542
TOTAL	6,509.917	18.358	0.000	0.000	929.542

Component Allocation (Per Year)

Component Name	Total In (kg/yr)	Out As Solid Waste (kg/yr)	Out As Aqueous Waste (kg/yr)	Out As Organic Waste (kg/yr)	Out As Emission (kg/yr)
ALCOHOL POLIVIN	26,717	87	0	0	0
Aniline	2,623	0	0	0	0
Fats	1,476	5	0	0	0
Methanol	7,868	0	0	0	0
Nitrogen	300	0	0	0	0
Oxygen	91	0	0	0	0
Proteins	50,170	163	0	0	0
SULFATO DE CROM	22,134	72	0	0	0
Water	18,820	42	0	0	18,591
TOTAL	130,198	367	0	0	18,591

7. SARA 313 CHEMICALS SECTION

ENVIRONMENTAL LOAD (per Batch)

Component Name	In (kg/batch)	Out As Emission (kg/batch)	Out As Aqueous Waste (kg/batch)	Out As Organic Waste (kg/batch)	Out As Solid Waste (kg/batch)
Aniline	131.126	0.000	0.000	0.000	0.000
Methanol	393.379	0.000	0.000	0.000	0.000
TOTAL	524.505	0.000	0.000	0.000	0.000

ENVIRONMENTAL LOAD (per Year)

Component Name	In (kg/year)	Out As Emission (kg/year)	Out As Aqueous Waste (kg/year)	Out As Organic Waste (kg/year)	Out As Solid Waste (kg/year)
Aniline	2,623	0	0	0	0
Methanol	7,868	0	0	0	0
TOTAL	10,490	0	0	0	0

8. 33/50 CHEMICALS SECTION

ENVIRONMENTAL LOAD (per Batch)

Component Name	In (kg/batch)	Out As Emission (kg/batch)	Out As Aqueous Waste (kg/batch)	Out As Organic Waste (kg/batch)	Out As Solid Waste (kg/batch)
ALCOHOL POLIVIN	1,335.840	0.000	0.000	0.000	4.328
Aniline	131.126	0.000	0.000	0.000	0.000
SULFATO DE CROM	1,106.700	0.000	0.000	0.000	3.586
Water	941.000	929.542	0.000	0.000	2.078
TOTAL	3,514.666	929.542	0.000	0.000	9.991

ENVIRONMENTAL LOAD (per Year)

Component Name	In (kg/year)	Out As Emission (kg/year)	Out As Aqueous Waste (kg/year)	Out As Organic Waste (kg/year)	Out As Solid Waste (kg/year)
ALCOHOL POLIVIN	26,717	0	0	0	87
Aniline	2,623	0	0	0	0
SULFATO DE CROM	22,134	0	0	0	72
Water	18,820	18,591	0	0	42
TOTAL	70,293	18,591	0	0	200

9. SOLID WASTE SECTION

By Output Location

At Output Stream Locations

S-110	Component	Composition (Mass %)	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	ALCOHOL POLIVIN	22.39	2.936	59
	Fats	1.24	0.162	3
	Proteins	42.05	5.514	110
	SULFATO DE CROM	18.55	2.432	49
	Water	15.77	2.068	41
	TOTAL	100.00	13.113	262

S-112	Component	Composition (Mass %)	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	ALCOHOL POLIVIN	26.54	1.392	28
	Fats	1.47	0.077	2
	Proteins	49.83	2.614	52
	SULFATO DE CROM	21.98	1.153	23
	Water	0.19	0.010	0
	TOTAL	100.00	5.245	105

By Component

ALCOHOL POLIVIN	Output Location	Mass %	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	S-110	67.84	2.936	59
	S-112	32.16	1.392	28
	TOTAL	100.00	4.328	87

Fats	Output Location	Mass %	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	S-110	67.84	0.162	3
	S-112	32.16	0.077	2
	TOTAL	100.00	0.239	5

Proteins	Output Location	Mass %	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	S-110	67.84	5.514	110
	S-112	32.16	2.614	52
	TOTAL	100.00	8.127	163

SULFATO DE CROM	Output Location	Mass %	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	S-110	67.84	2.432	49
	S-112	32.16	1.153	23
	TOTAL	100.00	3.586	72

Water	Output Location	Mass %	Component Flow (kg/batch)	Component Flow (kg/year)
	S-110	99.53	2.068	41
	S-112	0.47	0.010	0
	TOTAL	100.00	2.078	42

Anexo 8. Cálculo del ICS del caso de estudio en Microsoft Excel

INDICADORES ECONOMICOS

E1	Logro de ganancias esperadas del sistema de manufactura		
$GR = \frac{(\text{Ingresos totales} - \text{Costo total de manufactura})}{\text{Total de unidades producidas}}$			
Ganancia real	Valor	Ganancia proyectada	Valor
Ingresos totales	66416.7	Ingresos totales	61712
Costo total de manufactura	57529	Costo total de manufactura	57683.83
Total de unidades producidas	874	Total de unidades producidas	812
Resultado	10.16899314	Resultado	4.960800493
$E1 = \frac{GR}{GP} \times 100\%$			
Ganancia real	10.16899314	RESULTADO E1	204.99
Ganancia proyectada	4.960800493		

E2	Reducción del costo de disposición de residuos sólidos		
$E2 = \left(1 - \frac{Inv. soles actual}{Inv. soles previo}\right) \times 100\%$			
Inversión actual (sol/t)	1042.69	RESULTADO E2	84.20
Inversión previa (sol/t)	6600		

E3	Reducción del costo de suministro energético		
$CE = \frac{\text{Costo total de energía}}{\text{Cantidad total de energía}}$			
Costo de energía actual	Valor	Costo de energía previo	Valor
Costo total de energía	7345.72	Costo total de energía	18964.23
Cantidad total de energía	104.75	Cantidad total de energía	270.43
Resultado	70.13	Resultado	70.13
$CE = \left(1 - \frac{CE_{actual}}{CE_{previo}}\right) \times 100\%$			
Costo de energía actual	70.13	RESULTADO E3	0.00
Costo de energía previo	70.13		

E4	Cumplimiento presupuesto de adquisición de materiales		
$D = Costo\ previsto - Costo\ real$			
Costo previsto	41952	Resultado Desviación (D)	932
Costo real	41020		
$E4 = 100 + \left(\frac{D}{Costo\ previsto} \times 100\%\right)$			
D*	0	RESULTADO E3	100
Costo previsto	41952		

*En caso de tener una desviación positiva, el valor del indicador excedería el 100% por lo que se toma el valor mínimo posible de desviación que es 0.

INDICADORES AMBIENTALES

A1	Eficiencia de consumo de materiales		
$A1 = \frac{\text{Peso del producto final}}{\text{Peso de materia prima}} \times 100\%$			
Peso del producto final	6.34	RESULTADO A1	51.24
Peso de la materia prima	12.37		

A2	Eficiencia del consumo de agua		
$Agua\ aprovechada = Agua\ consumida - efluentes$			
Agua aprovechada		Valor	
Agua consumida		3977.19	
Efluentes		2709.71	
Resultado		1267.48	
$A2 = \frac{Agua\ aprovechada}{Agua\ consumida} \times 100\%$			
Agua aprovechada	1267.48	RESULTADO A2	31.87
Agua consumida	3977.19		

A3	Reducción de la intensidad energética		
$I = \frac{\text{Consumo total de energía} - \text{Energía de FR}}{\text{Total de unidades producidas}}$			
Intensidad real	Valor	Intensidad prevista	Valor
Consumo total de energía	104.75	Consumo total de energía	104.1
Energía de origen renovable	0	Energía de origen renovable	0
Total de unidades producidas	874	Total de unidades producidas	812
Resultado	0.119851259	Resultado	0.12820197
$DI = \text{Intensidad prevista} - \text{Intensidad real}$			
Intensidad real	0.119851259	Resultado DI	0.008350712
Intensidad prevista	0.12820197		
$A3 = \left(\frac{DI}{\text{Intensidad energetica prevista}} \times 100\% \right)$			
DI	0.008350712	RESULTADO A3	6.51
Intensidad prevista	0.12820197		

A4	Porcentaje de producto con origen circular		
$A4 = \frac{PMC}{PMT} \times 100\%$			
Peso de MP de origen Circular	4340	RESULTADO A4	66.87
Peso total de MP ingresante	6490.35		

A5	Porcentaje de reducción de generación de RRSS		
$A5 = \left(1 - \frac{\text{Peso de RRSS generados ahora}}{\text{Peso de RRSS generados previamente}} \right) \times 100\%$			
Peso RRSS generados previo	6000	RESULTADO A5	84.20
Peso RRSS generados actual	947.9		

INDICADORES SOCIALES

S1	Porcentaje de logro de nivel de productividad esperado		
$Productividad = \frac{\text{unidades de producto final producidas}}{\text{horas empleadas para su manufactura}}$			
Productividad real	Valor	Productividad esperada	Valor
Und. de prod. final producidas	874	Und. de prod. final producidas	812
Horas de trabajo en manufactura	221.11	Horas de trabajo en manufactura	192
Resultado	3.95	Resultado	4.23
		$S1 = \frac{PR}{PE} \times 100\%$	
Nivel de productividad real	3.95	RESULTADO S1	93.46
Nivel de productividad esperado	4.23		

S2	Porcentaje de accidentabilidad laboral		
$S2 = \frac{\# \text{ personas accidentadas}}{\# \text{ personas expuestas a accidentes}} \times 100\%$			
# personas expuestas a accidentes	5	RESULTADO S2	0
# personas accidentadas	0		

S3	Porcentaje de accidentabilidad laboral		
$S3 = \frac{\text{Hrs de capacitacion realizadas}}{\text{Hras de capacitacion planificadas}} \times 100\%$			
Hrs de capacitación realizadas	8	RESULTADO S3	100
Hrs de capacitación planificadas	8		

CÁLCULO DEL SUB INDICE ECONOMICO

INDICADORES	RESULTADO	NORMALIZACION	FACTOR DE PONDERACION	RESULTADO PONDERADO
E1	100	1.00	0.58	0.58
E2	84.20	0.84	0.08	0.07
E3	0.00	0.00	0.12	0.00
E4	100	1.00	0.22	0.22
SUMA				0.87

CÁLCULO DEL SUB INDICE AMBIENTAL

INDICADOR	RESULTADO	NORMALIZACION	FACTOR DE PONDERACION	RESULTADO PONDERADO
A1	51.24	0.51	0.48	0.25
A2	31.87	0.32	0.10	0.03
A3	6.51	0.07	0.21	0.01
A4	66.87	0.67	0.11	0.07
A5	84.20	0.84	0.10	0.08
SUMA				0.45

CÁLCULO DEL SUB INDICE SOCIAL

INDICADORES	RESULTADO	NORMALIZACION	PONDERACION	RESULTADO PONDERADO
S1	93.46	0.93	0.73	0.68
S2	0.00	0.00	0.20	0.00
S3	100.00	1.00	0.07	0.07
SUMA				0.75

Sub indice	Resultado por sub indice	Factor de ponderacion	Resultado ponderado
ECONOMICO	0.87	1/3	0.29
AMBIENTAL	0.45	1/3	0.15
SOCIAL	0.75	1/3	0.25
Resultado final (Suma aritmetica)			0.69

Sub indice	Resultado ponderado
ECONOMICO	0.29
AMBIENTAL	0.15
SOCIAL	0.25