



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,  
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS PARA LA FACULTAD  
DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE  
MEDIANTE UNA EVALUACIÓN MULTICRITERIO QUE CONSIDERE ASPECTOS  
ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

VICENTE ANDRÉS MORALES ARMIJO

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ÁLVARO OLIVERA NAPPA  
PABLO GARRIDO SZEGEDI

SANTIAGO DE CHILE  
2020



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO  
POR: VICENTE ANDRÉS MORALES ARMIJO  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS PARA LA FACULTAD  
DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE  
MEDIANTE UNA EVALUACIÓN MULTICRITERIO QUE CONSIDERE ASPECTOS  
ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Debido a la creciente tasa de generación de residuos en el mundo, diferentes organizaciones e instituciones se están haciendo responsables en la materia por los impactos negativos de la mala gestión de residuos, una de ellas son las universidades. En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas hay un Plan de Manejo Integral de Residuos desde el 2015, pero existe la necesidad de detectar y proponer mejoras. Para esto, el trabajo de título tiene por objetivo proponer un sistema de gestión que mejore la situación de la Facultad considerando aspectos económicos y ambientales. Dada la complejidad de estos sistemas, se utilizó una metodología que consiste en contextualizar la línea base, establecer escenarios, evaluarlos según Análisis de Ciclo de Vida y Proceso de Análisis Jerárquico en conjunto y proponer una solución.

Se obtuvo que la FCFM tiene un sistema planificado de gestión de residuos que procesa  $155 \text{ ton año}^{-1}$ , de las cuales 27 % se reciclan o tratan especialmente y, de lo que se va a relleno, el 39 % tiene el potencial de valorizarse. Dado este caso base, se generaron seis escenarios de manejo de residuos que involucran mejoras en cuanto a porcentajes de reducción y valorización, y variaciones de la institución que actúa como intermediario de reciclaje. De las evaluaciones realizadas se encontró que los casos más favorecidos cuantitativa y cualitativamente fueron los de mayor reducción y tasa de valorización. Al seguir la metodología de este trabajo, se combinaron ambas evaluaciones, lo que favoreció al Escenario 2, un caso en el cual existen esfuerzos de reducción y valorización cercanos al 50 % y se tiene como intermediario a la Municipalidad. Esta elección significa un compromiso entre lo ambiental y lo económico.

La propuesta de mejora se basa en el Escenario 2, lo que significa una reducción del 50 % de los residuos reducibles en conjunto con un aumento de los flujos valorizados, que se gestionen en, su mayoría, por la Municipalidad de Santiago. También presenta mejoras tanto en aspectos de impacto ambiental (reducciones entre 44 y 55 % en las categorías de impacto) como costo de operación (reducción de un 13 % del costo por kg tratado), sin embargo involucra inversión. En base a sus características principales se crearon metas normalizadas a la población de la Facultad, y por las dificultades asociadas a ellas, se propone seguir una estrategia de medidas basadas en una Política de Gestión de Insumos y Residuos que potencie la reducción, reutilización y reciclaje.

Se concluye que se logró el objetivo del trabajo de título. Además, la herramienta permitió llegar a una solución que no se prevé intuitivamente, facilitando la toma de decisiones de manera sistemática para un problema complejo. Finalmente, la metodología es replicable y mejorable, y puede ser utilizada en futuras instancias según como cambie el contexto de la Facultad.



# Agradecimientos

Agradezco a mi familia por las oportunidades que me dieron y el apoyo y cariño que siempre me dan.

Agradezco a mi profe guía y al grupo de memoristas que me ayudaron a desarrollar cosas desde específicas a generales, esenciales para mi trabajo y crecimiento.

Agradezco a todes mis compañeres de la OIS (... y Arquitectura... y Lore) con les que compartí gran parte del año, convivimos hartas cosas y me siento lleno de las experiencias que tuve con uds.

Agradezco a les amigues que me han acompañado por mi paso universitario, en especial a les Belles y a los Mortales (+ vedeto) que me han regalado cientos de almuerzos, ventanas y noches de compañía y juerga.

Agradezco a mis compañeres IQBT con quienes he estudiado y reído durante 5 años, sin uds. los ramos y la salita no hubieran sido los espacios que me dieron tantos momentos.

Agradezco a les chiquilles de Beauchef Antiespecista por darme comunidad y activismo, no saben como eso me ha ayudado estos últimos años.

*pimeja mi o kute e ni: mi pini e pali suli.*



# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El problema de los residuos sólidos . . . . .	1
1.2. Gestión de residuos sólidos universitarios . . . . .	4
1.3. Objetivos y alcances . . . . .	6
1.3.1. Objetivo general . . . . .	6
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	6
1.3.3. Alcances y limitaciones . . . . .	6
<b>2. Metodología</b>	<b>7</b>
2.1. Metodología general . . . . .	7
2.2. Metodologías específicas . . . . .	9
2.2.1. Caracterización de residuos . . . . .	9
2.2.2. Análisis de Ciclo de Vida . . . . .	10
2.2.3. Proceso Analítico Jerárquico . . . . .	11
2.2.4. Combinación de los resultados . . . . .	14
<b>3. Contexto tecnológico</b>	<b>16</b>
3.1. Tecnologías de tratamiento de residuos sólidos . . . . .	16
3.2. Infraestructura de tratamiento de residuos de la Región Metropolitana . . . . .	19
<b>4. Escenario actual de gestión de residuos</b>	<b>21</b>
4.1. Gestión de residuos sólidos en la FCFM . . . . .	21
4.1.1. Residuos no peligrosos . . . . .	22
4.1.2. Residuos orgánicos . . . . .	22
4.1.3. Residuos peligrosos . . . . .	23
4.1.4. Residuos electrónicos . . . . .	23
4.1.5. Otros residuos . . . . .	23
4.2. Caracterización de residuos . . . . .	24
4.2.1. Consideraciones metodológicas . . . . .	24
4.2.2. Resultados . . . . .	25
4.2.3. Discusiones . . . . .	26
4.3. Escenarios de gestión a evaluar . . . . .	28
<b>5. Análisis de Ciclo de Vida</b>	<b>30</b>
5.1. Objetivo y alcance . . . . .	30
5.2. Análisis de inventario . . . . .	32
5.3. Análisis de impacto . . . . .	32

5.4. Interpretación . . . . .	35
<b>6. Proceso de Análisis Jerárquico</b>	<b>37</b>
6.1. Objetivo y estructura . . . . .	37
6.2. Evaluación económica . . . . .	39
6.3. Generación de indicadores. . . . .	40
6.4. Preferencias . . . . .	41
<b>7. Combinación de los resultados</b>	<b>45</b>
7.1. Estandarización de puntajes . . . . .	45
7.2. Comparación multivariable . . . . .	46
<b>8. Propuesta</b>	<b>48</b>
<b>Conclusión</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>
<b>A. Nomenclatura</b>	<b>60</b>
A.1. Unidades . . . . .	60
A.2. Nombres químicos . . . . .	60
A.3. Siglas . . . . .	61
<b>B. Escenario actual de gestión de residuos</b>	<b>62</b>
B.1. Gestión de residuos sólidos en la FCFM . . . . .	62
B.2. Caracterización de residuos . . . . .	63
B.2.1. Categorización de residuos utilizada . . . . .	63
B.2.2. Discusiones sobre las consideraciones metodológicas . . . . .	65
B.2.3. Comparación entre parámetros característicos de diferentes instituciones . . . . .	67
B.2.4. Tablas complementarias de los resultados obtenidos . . . . .	69
<b>C. Análisis de Ciclo de Vida</b>	<b>73</b>
C.1. Alcance específico de los escenarios . . . . .	73
C.2. Índice de Calidad de Información (DQI) . . . . .	76
C.3. Inventario específico de los escenarios . . . . .	79
C.4. Modelos de los escenarios . . . . .	85
C.5. Contribuciones mayoritarias a las categorías de impacto . . . . .	93
<b>D. Proceso Analítico Jerárquico</b>	<b>100</b>
D.1. Respuestas de preguntas sobre indicadores y cálculo . . . . .	100
D.2. Archivos utilizados en el cálculo del PAJ . . . . .	102
<b>E. Combinación de los resultados</b>	<b>109</b>
E.1. Comparación de los resultados del ACV con el aspecto ambiental del PAJ . . . . .	109



# Índice de Tablas

1.1. Jerarquía de los residuos. . . . .	3
2.1. Escala de Saaty . . . . .	12
2.2. Matriz de comparación binaria de los subcriterios. . . . .	12
2.3. Matriz normalizada, vector de prioridad y vector de preferencias. . . . .	12
2.4. Matriz de alternativas, vector de preferencias globales de los criterios y preferencias totales de las alternativas. . . . .	13
2.5. Transformación de puntajes del PAJ. . . . .	14
3.1. Principales materiales reciclados en la Región Metropolitana y su nivel de tratamiento. . . . .	20
4.1. Distribución de la composición del flujo diario de generación de residuos según categorías. . . . .	25
4.2. Comparación de indicadores de generación de diferentes instituciones de educación superior. . . . .	25
4.3. Fracciones máxicas de diferentes tipos de residuos según potencial de tratamiento. . . . .	26
4.4. PPC por país . . . . .	27
4.5. Resumen del sistema de gestión de residuos Rebeauchef. . . . .	28
4.6. Resumen de la descripción de los escenarios de gestión a evaluar. . . . .	29
5.1. Flujos generales de tratamiento de residuos de los diferentes escenarios en ton año <sup>-1</sup> . . . . .	32
5.2. Resultados del análisis de impacto de cada escenario por unidad funcional. . . . .	33
5.3. Comparación de los resultados absolutos per cápita con referencias globales per cápita. . . . .	34
5.4. Resumen del análisis de calidad. . . . .	35
6.1. Costos operacionales de los escenarios (primera parte). . . . .	39
6.2. Costos operacionales de los escenarios (segunda parte). . . . .	39
6.3. Indicadores para el experto 1. . . . .	40
6.4. Indicadores para el experto 2. . . . .	40
6.5. Comparaciones binarias según expertos, nivel: criterios. . . . .	41
6.6. Comparaciones binarias según expertos, nivel: subcriterios económicos. . . . .	41
6.7. Comparaciones binarias según expertos, nivel: subcriterios ambientales. . . . .	41
6.8. Comparación binaria de las alternativas según EEI y vector de pesos. . . . .	41
6.9. Comparación binaria de las alternativas según EOE y vector de pesos. . . . .	42
6.10. Comparación binaria de las alternativas según COP y vector de pesos. . . . .	42

6.11. Comparación binaria de las alternativas según LOG y vector de pesos. . . . .	42
6.12. Comparación binaria de las alternativas según INV y vector de pesos. . . . .	42
7.1. Estandarización de los resultados del ACV. . . . .	45
7.2. Estandarización de los resultados extraídos de la parte económica del PAJ. . .	45
7.3. Comparación de los resultados de los análisis de los escenarios. . . . .	47
8.1. Características principales de la propuesta. . . . .	48
8.2. Diferencia porcentual entre el escenario propuesto y el actual. . . . .	49
B.1. Resumen del comportamiento del año según contexto, en equivalentes de Semana 17 y Promedio Normal. . . . .	65
B.2. Integrantes de la Facultad según tipo. . . . .	66
B.3. Comparación entre los parámetros característicos de diferentes instituciones de educación superior. . . . .	67
B.4. Comparación entre los parámetros característicos de diferentes instituciones de educación superior (continuación). . . . .	67
B.5. Distribución de la composición del flujo diario de generación de residuos según categorías y corrientes específicas. . . . .	69
B.6. Detalle, por categoría, de las fracciones másicas de residuos valorizados. . . .	70
B.7. Detalle, por corrientes, de las fracciones másicas de residuos valorizados y su potencial de valorización. . . . .	71
C.1. Alcance específico del caso base. . . . .	73
C.2. Alcance específico de los casos 1 y 4. . . . .	74
C.3. Alcance específico de los casos 2 y 5. . . . .	74
C.4. Alcance específico de los casos 3 y 6. . . . .	75
C.5. Rúbrica de DQI. . . . .	76
C.6. DQI de los procesos del modelo. . . . .	78
C.7. Flujos específicos para cada tratamiento, según caso. . . . .	79
C.8. Distancias de recorrido entre instituciones de la red de tratamiento. . . . .	80
C.9. Contribuciones mayoritarias del escenario base. . . . .	93
C.10. Contribuciones mayoritarias del escenario 1. . . . .	94
C.11. Contribuciones mayoritarias del escenario 2. . . . .	95
C.12. Contribuciones mayoritarias del escenario 3. . . . .	96
C.13. Contribuciones mayoritarias del escenario 4. . . . .	97
C.14. Contribuciones mayoritarias del escenario 5. . . . .	98
C.15. Contribuciones mayoritarias del escenario 6. . . . .	99
D.1. Respuestas experto 1. . . . .	100
D.2. Respuestas experto 2. . . . .	100
D.3. Dependencia de las variables a características de los escenarios. . . . .	101
D.4. Valores de cada característica asociada a las variables. . . . .	101
D.5. Normalización de las variables. . . . .	102
E.1. Estandarización de los resultados extraídos de la parte ambiental del PAJ. . .	109

# Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema de la metodología general. . . . .	8
2.2. Diagrama de las etapas de la caracterización de residuos. . . . .	9
2.3. Diagrama de las etapas del Análisis de Ciclo de Vida. . . . .	10
2.4. Diagrama de la estructura de un modelo de análisis jerárquico. . . . .	11
2.5. Ejemplificación del resultado gráfico de la aplicación del AAD bajo dos características. . . . .	15
4.1. Distribución másica de los residuos gestionados por Rebeauchef a la fecha. . . . .	22
5.1. Límites del sistema global. . . . .	30
5.2. Cambio porcentual de las categorías de impacto, relativo al escenario base. . . . .	34
6.1. Estructura de decisión. . . . .	38
6.2. Resultados finales según el PAJ. . . . .	43
7.1. Comparación de los datos estandarizados del ACV y la parte económica del PAJ. . . . .	46
8.1. Resumen de la situación de gestión de residuos actual y potenciales. . . . .	50
B.1. Mapa de la infraestructura de Rebeauchef. . . . .	62
B.2. <i>Scatterplot</i> de los parámetros de las Tablas B.3 y B.4. . . . .	68
C.1. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario base. . . . .	86
C.2. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 1. . . . .	87
C.3. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 2. . . . .	88
C.4. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 3. . . . .	89
C.5. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 4. . . . .	90
C.6. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 5. . . . .	91
C.7. Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 6. . . . .	92
E.1. Comparación de los datos estandarizados del ACV y la parte ambiental del PAJ. . . . .	110



# Introducción

## 1.1. El problema de los residuos sólidos

El crecimiento mundial de la población ha traído consigo el desarrollo tecnológico que permite abastecer a la creciente demanda humana de bienes y servicios. Este desarrollo está inmerso dentro de un sistema económico que se basa en la idea de que los recursos naturales son infinitos y de que la Tierra tiene la capacidad de recuperarse y degradar los residuos generados. Este concepto provocó una cadena de producción en la que se utilizan materias primas y se generan residuos sin importar el impacto medio-ambiental que conllevan estas actividades. Dado que los recursos y capacidades de la Tierra son finitos, el planeta se ve enfrentado a un problema: se están agotando los recursos y se están acumulando los desechos [1].

El crecimiento de la economía se relaciona directamente con la generación de residuos. Cuando crece la economía aumenta el ingreso de los consumidores, quienes tienden a rechazar los bienes inferiores (como los artículos de segunda mano) y a no darle el uso completo a los bienes normales desechándolos antes del término de su vida útil. En respuesta, los productores adaptan su estrategia diversificando la variedad de los productos y reduciendo su vida útil con el objetivo de aumentar las utilidades, lo que a su vez provoca que el usuario esté en la búsqueda constante de la versión más actualizada del producto [1]. De esta manera, hay una retroalimentación positiva entre el consumo y el crecimiento económico que fomenta la producción de residuos.

Lo anterior representa un problema en un mundo en el que la generación de residuos al 2016 era de 2,01 mil millones de toneladas, o el equivalente a 803 Complejos Costanera Center en peso<sup>1</sup>, con una proyección de aumento de un 70% en el año 2050 si se mantiene en el comportamiento actual. Cerca de la mitad de los residuos en los países de bajo y medio ingreso son alimentarios y vegetales. Por otra parte, en los países de alto ingreso la fracción orgánica es aproximadamente un tercio del total, principalmente porque aumentan los residuos no orgánicos y relacionados al empaquetado de productos [3]. La generación de residuos, además de ser alta globalmente, se diferencia por el nivel de ingreso.

La gestión de residuos sólidos a nivel global se basa principalmente en la disposición en rellenos (37%) y directo al suelo (33%). Sólo el 19% se recupera a través de algún proceso como el reciclaje y el resto es tratado por incineración moderna. El desglose de estas cifras muestra que en los países de alto ingreso suele haber alta cobertura de recolección de residuos,

---

<sup>1</sup>Estimado con información de *Los números que sostienen al Costanera Center* [2].

alto control en rellenos, mayor tasa de reciclaje y menor desecho directo al suelo; y en los países de bajo ingreso la situación se revierte, llegando a depender en su mayoría de la disposición al suelo [3]. Por lo tanto, la gestión de residuos es diferente según el nivel de desarrollo, aunque en todos los casos significa una acumulación de desechos importante en medios de disposición final.

La situación específica de Latinoamérica y El Caribe es característica de la situación de países de medio o bajo ingreso. El 52 % de los residuos corresponde a residuos de origen vegetal, la recolección de residuos es cubierta en un 84 % en ciudades, pero en zonas rurales baja hasta el 30 %. Adicionalmente, el 69 % es dispuesto en rellenos sanitarios, el 29 % se desecha directamente al suelo y existe un bajo porcentaje de reciclaje (4,5 %) [3]. Del total de 231 millones de toneladas generadas en la región, Chile aporta 21,2 y es el segundo país continental con mayor índice de generación per cápita (1,15 kg d<sup>-1</sup>, México: 1,16 kg d<sup>-1</sup>). Es decir, Chile es un país con alta intensidad de generación.

El 97 % de los residuos municipales en Chile equivale a residuos no peligrosos, de los cuales sólo el 24 % es valorizado. Los residuos son descartados principalmente en rellenos sanitarios y vertederos. Para mejorar esta situación, se han puesto en marcha diferentes mecanismos, entre ellos los legales, contando a partir del 2016 con la Ley de Fomento al Reciclaje que permitirá regular la gestión de residuos del país. Esta ley fomenta la minimización de los residuos y el aumento del reciclaje junto con otras estrategias de valorización<sup>2</sup>, para lo cual se plantea una implementación gradual que empieza por la regulación de productos prioritarios (como los neumáticos y baterías) [4], [5]. De esta manera, el marco legal permitirá disminuir los impactos ambientales del sistema de manejo actual de residuos.

La gestión de los residuos y sus diferencias geo-socioeconómicas tienen consecuencias de diversos tipos. Por ejemplo, la dependencia en los rellenos sanitarios de diversas calidades y la disposición directa al suelo producen contaminación del aire, agua y suelo aledaños, atraen animales que se transforman en vectores de enfermedades, impactan la salud de la fauna y de las comunidades cercanas (generalmente de bajo ingreso), contribuyen al cambio climático por medio de la generación de gases de efecto invernadero, entre otros [6], [7]. En consecuencia, este sistema, que produce problemas ambientales y sanitarios, tiene alta potencialidad de cambio.

Dado al creciente impacto del sistema actual y a la visibilización de sus efectos en el medio ambiente y la sociedad, el concepto de unir el desarrollo económico con los aspectos ambientales y sociales (por ejemplo, la salud) ha dado origen a diferentes formas de pensar el progreso de la sociedad [8]. Estos nuevos modelos de gestión se basan en la jerarquía de los residuos<sup>3</sup> (ver Tabla 1.1), la cual permite preferir acciones de manejo responsables. Esta priorización de actividades permite la minimización de los desechos que llegan a disposición final, teniendo como objetivo reducir los impactos para lograr un desarrollo sostenible.

---

<sup>2</sup>La valorización, en el contexto de la Ley [5], significa un conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y/o el poder calorífico de los mismos. La valorización comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética.

<sup>3</sup>Adicionalmente, en este trabajo se incluirá en el término *valorización* la gestión responsable de los residuos especiales, y se excluirá la recuperación energética del biogás capturado en rellenos sanitarios.

Tabla 1.1: Jerarquía de los residuos. Prioridad de medidas descrita en orden descendente [5].

Medida	Descripción
1. Reducción	Se refiere a las medidas de minimización de la generación de residuos en el origen, es decir, en la cantidad consumida de productos y en las etapas anteriores al consumo (diseño, fabricación, transporte, etc.)
2. Reutilización	Consiste en la limpieza, reparación u otras medidas que permitan seguir dándole uso a los productos antes de transformarlos.
3. Reciclaje	Transformación de los productos en desuso a nuevos materiales o productos. Se incluye el compostaje o reciclaje vegetal.
4. Recuperación	Cualquier tipo de operación que involucre la valorización de un producto que ya no puede ser reutilizado o reciclado. Generalmente, se refiere a la transformación de los residuos en energía.
5. Disposición final	Disposición de los residuos no valorizables en acopios especializados.

Sin embargo, lograr un modelo de gestión de residuos que integre las estrategias de la jerarquía es un proceso complejo. Desde el punto de vista de un consumidor (sea persona o institución) existen limitaciones. Por ejemplo, se puede controlar la cantidad consumida de productos, pero de igual forma no se tiene injerencia sobre los impactos de las etapas anteriores al consumo, a menos que se opte por el rechazo siempre que existan alternativas. Por otro lado, la reutilización, reciclaje y recuperación están sujetas a la tecnología implementada disponible y suponen desafíos logísticos por diversos motivos, como la diversidad de la composición de los residuos, la falta de normas o leyes que establezcan un manejo responsable, las diferencias entre actores de interés en la toma de decisiones institucionales, etc. Es por esta razón que, si se quiere lograr un cambio en la gestión de residuos actual, es necesario realizar un diagnóstico del contexto local junto con una caracterización de los residuos generados, para así establecer una línea base y detectar oportunidades de mejora reales [9].

## 1.2. Gestión de residuos sólidos universitarios

Las universidades son instituciones con diferentes actividades generadoras de residuos. Algunas de estas fuentes son las cafeterías y servicios de alimentos, jardinería, actividades específicas de oficinas, salas de clase, laboratorios, etc. donde participan los diferentes integrantes de la comunidad: estudiantes, funcionarios, académicos y externos. Como entidades generadoras de residuos, las universidades son responsables de la debida gestión y para ello es necesaria la cooperación de todas las partes de interés [10].

Así también, estas instituciones cumplen otras funciones con respecto a la gestión de residuos. Por un lado, forman futuros profesionales que, generalmente, ejercerán su profesión según los valores de la universidad [11], [12]. Por otro lado, sirven como ejemplo para otras instituciones y para la localidad de que se pueden tomar medidas efectivas en la materia de gestión de residuos [13]. Por lo tanto, las universidades además de responsabilizarse de sus actividades tienen la capacidad y oportunidad de difundir las prácticas de gestión responsable a otros lugares y organismos, lo que se alinea con el rol de vincularse con el medio para lograr, entre otras metas, que la sociedad avance en el contexto del bien común y la visión a largo plazo.

Para lograr una buena organización y gestión universitaria de residuos, las instituciones en general se basan en la planificación por objetivos y metas. Estos planes siguen lineamientos definidos en políticas, procedimientos o manuales de gestión integral de residuos, en los cuales se declara el valor de la sustentabilidad como principal motor del proceso. De esta manera, se pueden integrar estrategias basadas en la jerarquía de los residuos para lograr mejoras de gestión, es decir, se prioriza la reducción sobre las otras formas de valorización. Dentro de este área, se destaca el objetivo de algunas universidades de ser instituciones *cero basura* [14].

Como en el diseño de los sistemas de gestión de residuos universitarios se apunta a lograr la sustentabilidad, se tienen que considerar tres aspectos principales: el económico, el social y el ambiental; además de conocer la situación particular de una institución para generar medidas que se sostengan en el tiempo. Lo económico implicará tomar prácticas rentables y justas, lo social tiene que ver con el compromiso con la comunidad y la sociedad y lo ambiental con decisiones ecológicamente racionales. Por su parte, una caracterización de los residuos da a conocer las fracciones de desechos reducibles y las oportunidades de valorización según la infraestructura disponible, es decir, las diferentes tecnologías de tratamiento que existen en el contexto local. Estas dimensiones de la sustentabilidad y el conocimiento de la línea base son fundamentales en los procesos de diseño de manejo de residuos [15].

En el contexto de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM), la gestión integral de residuos tiene origen en la Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad (OIS). Este organismo nace el 2013 como un espacio de planificación, gestión y discusión de temáticas relacionadas a sustentabilidad en la educación superior [16]. Algunos de los avances en la materia son el cumplimiento del Acuerdo de Producción Limpia y la Política de Sustentabilidad de la Facultad [17].

Bajo el proceso de mejora continua de la OIS, se están desarrollando políticas específicas para mejorar y direccionar la operación de diferentes áreas hacia objetivos específicos. Una de estas áreas es la Política de Gestión de Insumos y Residuos, que requiere el diseño de un



sistema de gestión que tenga por fines la reducción, valorización y disposición responsable. Por lo tanto, existe la necesidad de evaluar y proponer un sistema de gestión de residuos que sirva de referencia para la definición de las metas de la Facultad, considerando criterios ambientales y económicos.

Pero existen varias posibilidades de lo qué es un sistema de gestión más adecuado. Debido a que la gestión de residuos es un problema complejo, que contiene varias aristas, surgen dificultades para definir qué es lo mejor: ¿se optimizarán los impactos ambientales del sistema?, ¿es mejor la alternativa que posee menor costo económico?, ¿cómo se considera la experiencia de los agentes involucrados en la toma de decisiones?, entre otras preguntas. Es por esta razón, que para capturar la complejidad de estos sistemas, en otras instancias se han utilizado herramientas de decisión multicriterio, que consideran múltiples variables para la elección de qué es lo mejor [18].

Las herramientas de decisión multicriterio evalúan múltiples criterios que se encuentran bajo conflicto en la toma de decisiones. Por ejemplo, al examinar un sistema de gestión de residuos, los criterios en conflicto comunes son el costo de operación de un sistema y su impacto ambiental, que generalmente se encuentran en relación opuesta: mientras más caro es un sistema, menos impacto tiene [19]. En el diario vivir, las personas toman decisiones contrapesando estos criterios por medio de la intuición, pero en decisiones cuyas consecuencias son mayores, la sistematización de la decisión es fundamental y estas herramientas la permiten. De esta manera, para satisfacer la necesidad de evaluación y propuesta de un sistema de gestión de residuos que mejore la situación actual de la Facultad, se define el presente trabajo de memoria de título, cuyos objetivos se enmarcan en la aplicación de una metodología que considera herramientas de decisión multicriterio, principalmente en los aspectos ambientales y económicos.

## **1.3. Objetivos y alcances**

### **1.3.1. Objetivo general**

Proponer un sistema de gestión de residuos sólidos que mejore la situación actual de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en la materia, por medio de una evaluación multicriterio.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Recopilar los antecedentes del sistema actual de gestión de residuos de la Facultad.
- Estimar los flujos y composición de los residuos sólidos de las diferentes fuentes de generación de la Facultad.
- Investigar sobre tecnologías apropiadas para el tratamiento de residuos sólidos, tanto a nivel nacional como internacional.
- Evaluar el impacto ambiental de diferentes sistemas de tratamiento de residuos, definiendo escenarios y comparándolos por medio de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida.
- Comparar los diferentes escenarios de gestión de residuos, en aspectos económicos y de juicio ambiental de expertos, por medio de un análisis de decisión multicriterio.
- Proponer el escenario de gestión de residuos que optimice los criterios ambientales y económicos, a través de la combinación de las herramientas de evaluación utilizadas.

### **1.3.3. Alcances y limitaciones**

Con el siguiente trabajo se logrará evaluar y proponer mejoras a la gestión de residuos sólidos de la FCFM. De esta manera el resultado de la memoria servirá como un insumo para definir objetivos y metas de gestión en un marco institucional, y como un ejemplo de una metodología de evaluación y propuesta que puede ser replicada a futuro.

El trabajo se enfocará en las actividades de la Facultad y tomará en cuenta su contexto local, lo que limitará las opciones de tratamiento disponibles. Además, se debe considerar que los resultados están sujetos a los datos y modelos aplicados y las herramientas computacionales usadas que están especializadas para ellos.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Metodología general

Para determinar un escenario de gestión que mejore la situación actual de la FCFM en el manejo de residuos sólidos se sigue la metodología expuesta (ver representación esquemática en Figura 2.1).

Primero, se compilarán los antecedentes del sistema por medio de entrevistas con las autoridades pertinentes y la recopilación de documentos oficiales. Una vez obtenida esta información, se realizará un estudio de caracterización de residuos para conocer el flujo y composición de los desechos generados por la institución. Con los datos y antecedentes recolectados se obtendrá la situación inicial o caso base. A su vez, se realizará una investigación de las tecnologías de tratamiento de residuos sólidos a nivel internacional y nacional, en específico de la Región Metropolitana. Con los resultados del caso base y la investigación de tratamientos, se podrán construir los escenarios a evaluar modificando las fracciones de tratamiento, tipos de tecnologías y otros parámetros.

Tras la composición de los nuevos escenarios, se procederá con la metodología propuesta por P. T. Ghazvinei *et al.* (2018) [10] para evaluar las diferentes alternativas de gestión bajo las herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). El ACV es una técnica que evalúa los diversos impactos ambientales asociados a un sistema, mientras que el PAJ es una técnica de decisión multicriterio que asiste a los tomadores de decisiones a encontrar una solución que se ajuste al contexto de un problema complejo. Como resultado de la aplicación de ambas herramientas se podrá obtener una cuantificación de los impactos ambientales de cada escenario y un indicador multicriterio que considere el análisis económico y la opinión experta de los efectos ambientales de cada caso.

Finalmente, se analizarán los resultados del ACV y PAJ combinando su información por medio de herramientas del Análisis de Agrupamiento de Datos (AAD), una técnica estadística que tiene por objetivo agrupar los elementos de un análisis multivariable. De esta forma se puede integrar la información entregada por cada evaluación para proponer el mejor escenario de gestión según lo analizado. Así, se presentará la propuesta junto con sus ventajas y desventajas respecto de la situación inicial.

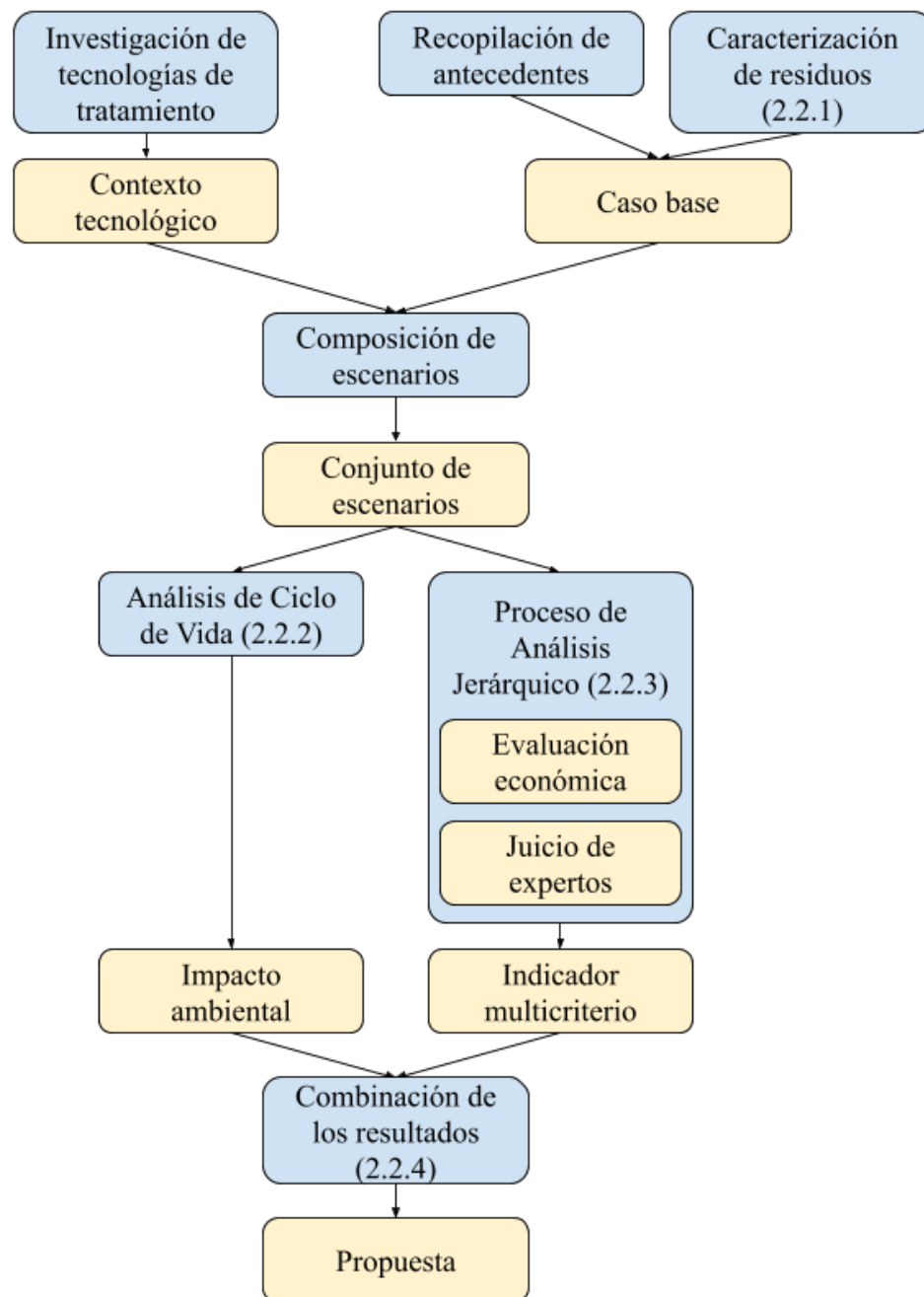


Figura 2.1: Esquema de la metodología general. Rectángulos azules: etapas; rectángulos amarillos: resultados. Entre paréntesis, se señala el capítulo donde se detalla la metodología específica.

## 2.2. Metodologías específicas

### 2.2.1. Caracterización de residuos

Para cuantificar los residuos y su composición se utilizará una metodología de caracterización basada en la de K. Sakurai (2000) [20]. El proceso sigue tres etapas principales (representadas en la Figura 2.2):

1. **Recolección de la muestra:** se selecciona aleatoriamente una cantidad de bolsas de cada acopio de desechos de la Facultad. Esta cantidad es calculada estadísticamente para que la muestra escogida sea representativa del total. Las bolsas recogidas son almacenadas para su posterior medición.
2. **Cuantificación:** se vierte el contenido de las bolsas en contenedores de dimensiones conocidas. De esta manera, se conoce el volumen total y se mide la masa total con una balanza. Con ambos datos se puede calcular la densidad aparente.
3. **Caracterización:** la muestra se reduce por medio de un proceso de cuarteo consecutivo. Es decir, la pila de residuos se divide en cuatro y se seleccionan dos cuartos opuestos que se vuelven a cuartear hasta obtener la muestra deseada. Cuando se tiene la muestra reducida, se separa según la clasificación de residuos escogida. Cada corriente y sus subdivisiones son pesadas y medidas de manera homóloga a la etapa de cuantificación, pero con recipientes de menor volumen. Con los datos recolectados se calculan las composiciones de masa y volumen de los residuos. Finalmente, con los resultados de cada etapa y la información de gestión de residuos de la FCFM, se calculan los indicadores de producción y las fracciones de recuperación y potencialidad.

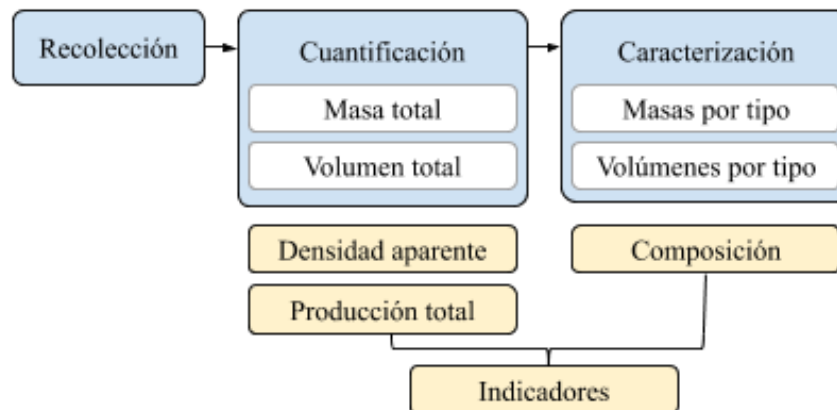


Figura 2.2: Diagrama de las etapas de la caracterización de residuos. Rectángulos azules: etapas; rectángulos blancos: resultado medido; rectángulos amarillos: resultado calculado.

La generación y medición de residuos varía según múltiples factores, algunos de ellos son la época del año, las condiciones meteorológicas, las condiciones socioculturales, entre otros [20]. Por este motivo, se realizarán diferentes muestreos en el año para detectar estacionalidad u otros comportamientos. Así, se podrá obtener un resultado que considere los cambios inherentes a este proceso.

### 2.2.2. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de evaluación que considera todo el ciclo vital de un producto, servicio, proceso, etc. Uno de los objetivos del ACV es proveer de información útil sobre impacto ambiental a los tomadores de decisiones. Se ha aplicado múltiples veces en la gestión de residuos sólidos, demostrando su utilidad como metodología de evaluación [21]. Según los requerimiento de la norma ISO 14044 [22], el ACV es un proceso iterativo que posee cuatro etapas principales que están bajo constante revisión (ver Figura 2.3):

1. Objetivo y alcance: se define el propósito del análisis, sus limitaciones, las decisiones y supuestos tomados, etc. En esta fase se identifican los límites del sistema de gestión y la unidad funcional que se utilizará como referencia.
2. Análisis de inventario: se cuantifican las entradas y salidas materiales y energéticas asociadas a los procesos de tratamiento a estudiar.
3. Evaluación de impacto: se estima el potencial impacto de los procesos al calcular indicadores de categorías de impacto ambiental para el inventario cuantificado. Con estos cálculos se podrán visualizar los efectos de cada escenario de gestión.
4. Interpretación: se comprueba que los datos calculados y las conclusiones que se puedan establecer estén bien fundamentadas. Para ello existen diferentes métodos como descritos en la norma.

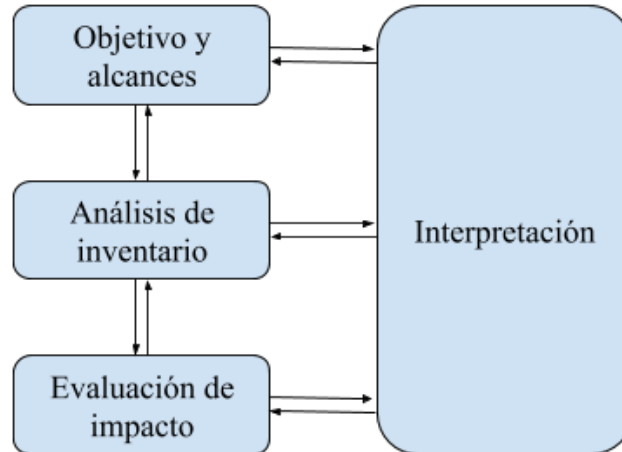


Figura 2.3: Diagrama de las etapas del Análisis de Ciclo de Vida.

### 2.2.3. Proceso Analítico Jerárquico

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) es un tipo de herramienta de decisión multicriterio que permite evaluar problemas complejos y multidisciplinarios como la gestión de residuos sólidos. Es uno de los métodos más utilizados en el área debido a que permite integrar diferentes criterios de evaluación y compararlos de manera jerárquica [23]. Estos criterios pueden ser cualitativos como la opinión de expertos y tomadores de decisiones, o cuantitativos como las evaluaciones económicas o sociales.

En la aplicación de esta herramienta primero se define el objetivo de la evaluación y la estructura del modelo, es decir, la relación de jerarquía entre la decisión, los criterios (y subcriterios) y las alternativas (ver ejemplo en Figura 2.4). Luego se realizan comparaciones binarias entre cada criterio (y subcriterio) para determinar los pesos relativos de cada uno, en otras palabras, su nivel de importancia. Con la cuantificación de los pesos se puede hacer un *ranking* de las alternativas para determinar cual es la decisión a tomar. Se debe asegurar que las conclusiones estén bien fundamentadas mediante el análisis del nivel de consistencia de las matrices de comparación binaria obtenidas.

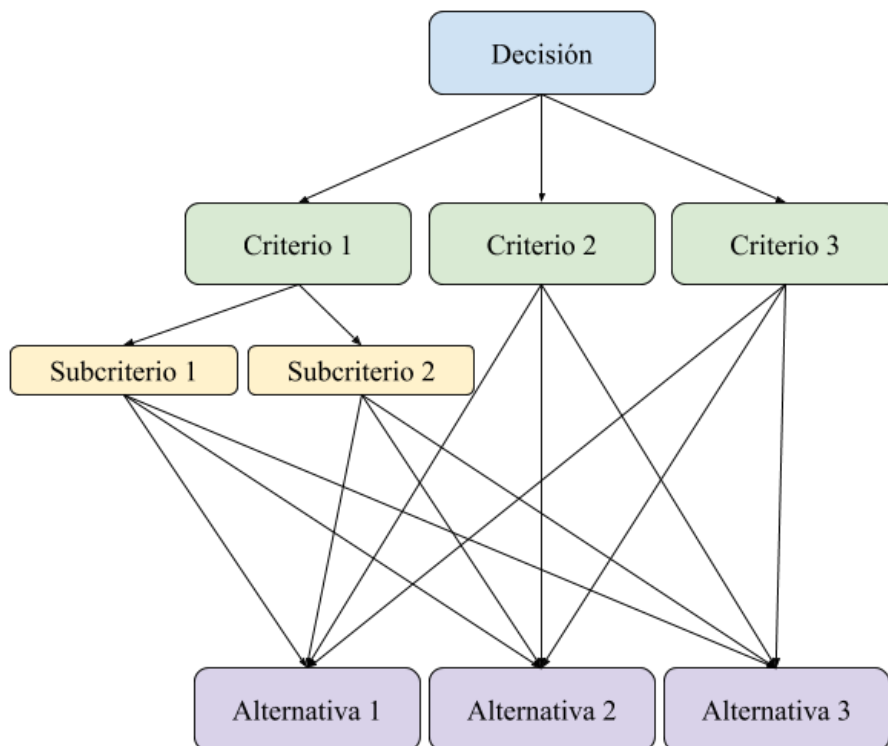


Figura 2.4: Diagrama de la estructura de un modelo de análisis jerárquico. En el ejemplo se muestran las relaciones entre la decisión, los criterios, subcriterios y las alternativas.

La comparación binaria entre criterios y subcriterios se realiza por medio de preguntas, indicadores u otros medios que permitan establecer el nivel de importancia que tenga uno por sobre el otro. En la Tabla 2.1 se indica la escala de comparación de Saaty utilizada frecuentemente en la aplicación de PAJs [24]. El instrumento matemático que permite el procesamiento de estas comparaciones son las matrices de comparación binaria. A continuación, se explica el desarrollo matemático del método para la comparación entre tres

critérios y dos subcriterios.

Tabla 2.1: Escala de Saaty. Los número 2, 4, 6 y 8 sirven de matices en la escala para cuando no hay claridad de la prioridad.

Escala	Definición	Aplicación
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo.
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro.
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro.
7	Muy fuertemente preferida	Un criterio es favorecido muy fuertemente frente al otro. En la práctica se puede demostrar su dominio.
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro.

Como ejemplo, se comparan los dos subcriterios en la Tabla 2.2. Aquí puede verse el puntaje asignado a cada uno, siendo preferente el subcriterio 1 en un nivel de extrema preferencia.

Tabla 2.2: Matriz de comparación binaria de los subcriterios.

Subcriterios	1	2
1	1	9
2	1/9	1

A continuación, se normaliza la matriz, es decir, se divide cada celda por la suma de la columna. El vector propio normalizado de esta matriz se denomina vector de prioridad, y la multiplicación de la matriz normalizada con el vector de prioridades resulta en el vector de preferencia (ver Tabla 2.3). En el ejemplo resulta que el Subcriterio 1 pesa el 90 % dentro del Criterio 1. Si, por ejemplo, los criterios poseen el vector de preferencia (10 %, 50 %, 40 %), el Subcriterio 1 tendría el 9 % de la preferencia global por principio de jerarquía (y el Subcriterio 2 obtendría el 1 %).

Tabla 2.3: Matriz normalizada, vector de prioridad y vector de preferencias.

Subcriterio	1	2	Vector de prioridad	Vector de preferencias
1	9/10	9/10	9/10	0,9
2	1/10	1/10	1/10	0,1

Este procedimiento también se aplica para comparar las alternativas bajo cada criterio y subcriterio que las relaciona. Los vectores de preferencia de estas comparaciones forman las columnas de la matriz final de alternativas. En esta matriz, las filas representan las alternativas y las columnas a cada criterio o subcriterio. En la Tabla 2.4 se describe el ejemplo anterior, completando los valores faltantes para demostrar el paso final, en el cual se multiplica esta matriz por los pesos globales de cada criterio o subcriterio y se obtienen



los puntajes totales de las alternativas. De esta manera, resulta que la Alternativa 2 posee la mejor prioridad (60,2%).

Tabla 2.4: Matriz de alternativas, vector de preferencias globales de los criterios y preferencias totales de las alternativas. Alt: Alternativa; Subc: Subcriterio; Crit: Criterio; Pref. globales: Vector de preferencias globales de los criterios y los subcriterios; Total: Vector de preferencias totales de las alternativas.

Alt.	Subc. 1	Subc. 2	Crit. 2	Crit. 3	Criterio	Pref. globales	Alt.	Total
1	0,33	0,70	0,15	0,10	Subc. 1	0,09	1	0,152
2	0,33	0,20	0,50	0,80	Subc. 2	0,01	2	0,602
3	0,33	0,10	0,35	0,10	Crit. 2	0,50	3	0,246
					Crit. 3	0,40		

Finalmente, se calcula el cociente de consistencia (CC), que mide la validez de los juicios en base a que no existan contradicciones entre los mismos. Este índice se calcula de la siguiente manera [24]:

1. Se calcula el valor propio principal ( $\lambda_{max}$ ) de cada matriz de comparación binaria.
2. Se calcula el índice de consistencia  $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ , con  $n$  el número de alternativas.
3. El IC se divide con el promedio de IC generados por matrices aleatorias recíprocas, obteniéndose el CC. Se considera que un valor de 0,1 es aceptable y para los casos en que sea mayor, se deben reevaluar las comparaciones binarias ya que serían inconsistentes.

## 2.2.4. Combinación de los resultados

Una vez obtenidos el impacto ambiental y las prioridades de decisión multicriterio, se utilizan técnicas del Análisis de Agrupamiento de Datos (AAD) para combinar los resultados del impacto ambiental y del criterio económico del PAJ. Este procedimiento permite la comparación de escenarios de gestión a través de la visualización del caso que optimiza los resultados del ACV y el PAJ. También permite la extracción de nuevas conclusiones al relacionar de diferentes maneras los resultados de las dos metodologías de evaluación. El resultado de este tipo de análisis es un gráfico que caracteriza las alternativas o escenarios de decisión. Por lo tanto, la opción que optimiza las características es la que tiene valor positivo en ambos ejes de comparación.

La combinación de resultados se realiza de la siguiente manera:

1. Se estandarizan los resultados de impacto ambiental obtenidos en el ACV por medio de la Ecuación 2.1:

$$N_i = - \left( \frac{P_i - P_p}{P_p} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $N_i$  es el puntaje estandarizado del escenario  $i$ ,  $P_i$  es el puntaje del escenario  $i$ , y  $P_p$  es el promedio de los puntajes de todos los escenarios.

2. Se extraen los resultados del criterio económico del PAJ por medio de una transformación de puntajes (ver Tabla 2.5) para obtener las prioridades de las alternativas dentro del criterio ( $T_i$ ), es decir, a cada peso se le atribuye una puntuación ( $E_{ij}$ , donde  $i$  representa el escenario y  $j$  el subcriterio económico) la cual es ponderada por los pesos de cada subcriterio ( $w_j$ ) según la Ecuación 2.2.

Tabla 2.5: Transformación de puntajes del PAJ [25].

Rango de prioridad PAJ	Valor transformado
$0,0 \leq x < 0,1$	1
$0,1 \leq x < 0,2$	2
$0,2 \leq x < 0,3$	3
$0,3 \leq x < 0,4$	4
$0,4 \leq x < 0,5$	5
$0,5 \leq x < 0,6$	6
$0,6 \leq x < 0,7$	7
$0,7 \leq x < 0,8$	8
$0,8 \leq x < 0,9$	9
$0,9 \leq x < 1,0$	10

$$T_i = \sum_j w_j \cdot E_{ij} \quad (2.2)$$

3. Se estandarizan los puntajes transformados del PAJ según la Ecuación 2.3:

$$M_i = \frac{T_i - T_p}{T_p} \quad (2.3)$$

Donde  $M_i$  es el puntaje normalizado del escenario  $i$ ,  $T_i$  es el puntaje transformado del PAJ del escenario  $i$ , y  $T_p$  es el promedio de los puntajes transformados de todos los escenarios.

4. Finalmente, se grafican los puntos  $N_i$  versus los  $M_i$  en un gráfico multivariable (ver Figura 2.5) y se selecciona el óptimo.

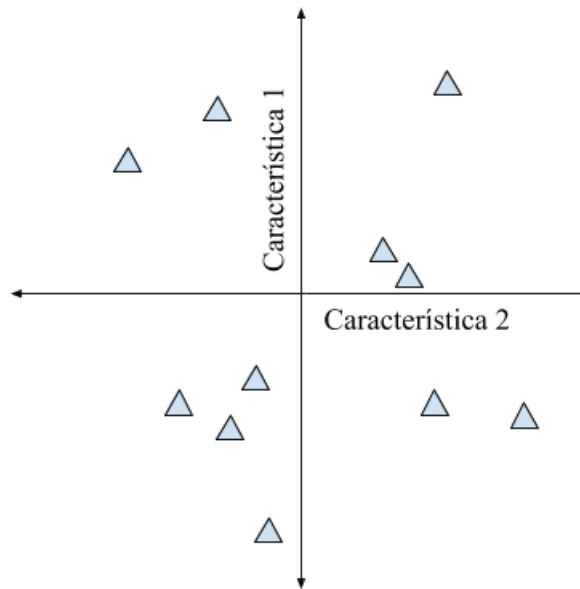


Figura 2.5: Ejemplificación del resultado gráfico de la aplicación del AAD bajo dos características. Triángulos azules: representación de los puntos coordenados.

# Capítulo 3

## Contexto tecnológico

### 3.1. Tecnologías de tratamiento de residuos sólidos

Existen diferentes tecnologías de tratamiento de residuos sólidos. Estas se pueden clasificar bajo la jerarquía de los residuos. Por este motivo, en primer lugar estaría la reducción y reutilización, que se basan principalmente en estrategias diferentes para lograr su objetivo. Por ejemplo, se puede diseñar la infraestructura para que se minimicen los residuos y optimicen los retiros usando tecnologías emergentes como el *Internet-of-Things* para obtener información de monitoreo y medición [26]. En cuanto a reutilización, existen medidas estratégicas internas al ente generador de residuos, como el manejo de inventario de los elementos dados de baja en buen estado (o los no utilizados), que permiten la transferencia de unidades a las que se les puede dar un segundo uso [27], pero también se tienen tratamientos por empresas como el relleno de *cartridges* de impresión o el uso de neumáticos para otras funciones diferentes a la original.

En segundo lugar, se encuentran las tecnologías de reciclaje. Estos procesos poseen varias etapas. Típicamente, las primeras son etapas de preparación del residuo para su reciclaje: separaciones de materiales indeseados, limpieza y categorización. Luego de que se tiene el material preparado, se somete a procesos químicos o físicos que lo transforman en materia prima reciclada. A continuación, se especifican las tecnologías de transformación de los residuos sólidos principales:

- Plásticos: los principales plásticos son el PET, PE, PVC y PS. Al ser materiales termoplásticos (se vuelven deformables a altas temperaturas), se pueden calentar y fundir para formar nueva materia prima, pero de menor calidad. Por otra parte, los plásticos de condensación (formados por la unión de dos monómeros bajo condensación), como el Nylon, PU y PET, pueden ser sometidos a reacciones químicas para obtener los compuestos que los conforman, con los cuales se pueden generar nuevos polímeros. Finalmente, cuando no se pueden someter a los procesos anteriores, se procede a la recuperación por pirólisis, gasificación, hidrogenación o incineración [28]. Adicionalmente, hay tecnologías emergentes que hacen uso de la biotecnología para degradar o transformar los plásticos con enzimas o microorganismos, pero todavía tienen baja conversión [29].

- Metales: los metales poseen dos caminos de reciclaje comunes: la refundición, refinamiento y fundición; y la reducción química y refinamiento. Los principales metales reciclados son la chatarra de fierro y acero, el plomo de las baterías, el cobre y el bronce. El reciclaje de metales gasta menos energía y requiere menos recursos que la extracción primaria de los mismos, y también necesita menos espacio de instalaciones. A pesar de lo anterior, globalmente la industria de reciclaje de metales es de menor escala que la de extracción [30].
- Papeles y cartones: los papeles y cartones están hechos de celulosa, la cual se extrae de la pulpa de madera. El reciclaje de papel y cartón tiene como objetivo transformar estos materiales en pulpa. Para lograr esto, primero se separan los materiales por tipo, ya que cada uno debe ser procesado en una máquina diferente. Luego, se humedecen y se procesan en pulpeadoras que contienen agua y químicos específicos al tipo de material. Al calentarse esta mezcla, se transforma en pulpa, la que después pasa por etapas de limpieza como la centrifugación y el *screening*. Este material es utilizado para generar diferentes productos de papel y cartón [31].
- Envases Tetra Pak: el proceso de reciclaje del Tetra Pak es parecido al de papeles y cartones. Los envases de este tipo están conformados por capas de PE, aluminio y cartón. Para procesarlo se utilizan hidropulpeadoras que transforman el material en una pulpa, que además de contener celulosa posee restos de PE y PE-aluminio, los cuales pueden ser reciclados tras su separación [32].
- Vidrios: el reciclaje de vidrio empieza con su separación por tipo. Luego, cada categoría es convertida en una corriente de pedazos de vidrio de diferente granulometría (*glass cullets*) que se agregan como parte del material de producción en la fundición de nuevo vidrio, lo que reduce el uso de reactivos en el proceso (principalmente soda) [33].
- Materia orgánica: el principal proceso de reciclaje de orgánicos es el compostaje, que consiste en la degradación biológica de los residuos en fase sólida a un material con valor agrícola (compost). En este proceso los microorganismos transforman la materia orgánica en una serie de reacciones oxidativas, lo que produce cambios de acidez, temperatura, humedad y otras condiciones que facilitan cada etapa de descomposición. La diferencia entre tecnologías recae en el tipo de aireamiento, que puede ser manual por medio de volteo de pilas, o industrializado con equipos especiales que mezclan y controlan el flujo de aire [34].
- Materiales electrónicos: son una corriente heterogénea y de diferentes materiales electrónicos, pueden llegar a tener más de 60 elementos de interés, elementos peligrosos o ambos. Su reciclaje consta de etapas de preparación, eliminación de tóxicos, extracción de elementos y disposición de los residuos. La extracción es la etapa principal y puede ser ejecutada por medios químicos (como la lixiviación ácida), por calor o por otros procesos metalúrgicos como la electroobtención. Los desechos electrónicos de gran tamaño, como las máquinas de resonancia magnética, poseen más de 40 años de reciclaje formal en sitios especializados en países OCDE. El reciclaje de equipos pequeños, como los celulares o televisores, históricamente no han sido rentables en países con alto costo de mano de obra, por lo que han sido dispuestos finalmente, guardados o exportados a países de menor desarrollo donde los procesan de manera informal y manual, lo que involucra un peligro de salud y ambiental a las comunidades que viven de esta actividad. Actualmente, está aumentando la industria de reciclaje de electrónicos pero se concentra en ciertas ubicaciones del mundo, por lo que el reciclaje de estos muchas

veces involucra el transporte internacional para su procesamiento [35].

- Aceite vegetal usado: es un material que principalmente se recicla a biodiesel por medio de transesterificación (reacción con alcohol y catalizadores ácidos, básicos o enzimáticos) o pirólisis (transformación por calor y catalizadores). Adicionalmente, existen tratamientos que logran transformar el aceite usado a aceite pirolítico, PU biodegradable, biolubricantes, jabones y resinas alquídicas. En el caso de ser purificado y esterilizado también se puede transformar en biosurfactantes y PHB (poliéster biodegradable) [36].
- Neumáticos: los neumáticos tienen varias alternativas de reducción y reutilización, por lo que su gestión se concentra en estas etapas. El reciclado consiste en moler la goma desechada, desvulcanizarla y así obtener caucho a partir del cual se pueden hacer nuevos productos. Este caucho tiene baja reapplicabilidad como neumáticos, ya que el negro de humo contenido afecta las propiedades del caucho reciclado, siendo de menor calidad mecánica que el caucho virgen. Por esta razón, el material reciclado de neumáticos tiene otros usos como en la ingeniería civil y el paisajismo. [37].
- Pilas y baterías: el objetivo del reciclaje de estos residuos es obtener metales útiles y prevenir impactos ambientales por su incorrecta disposición. Según el tipo de batería, se aplican procesos físicos junto a piro y/o hidrometalurgia. De esta manera, se generan metales o concentrados de metal que pueden ser usados en la fabricación de otros productos [38].
- Madera: la madera desechada proviene principalmente de la construcción. Su reciclaje consiste en la transformación del desecho en pequeños trozos de madera con los que se pueden fabricar chips y paneles. Este proceso es principalmente mecánico, pero existe innovación como los procesos de aplicación de calor y presión, los que hacen explotar la madera por la generación de vapor en su interior [39].
- Textiles: son una de las corrientes con más rápido crecimiento en el mundo. Su reciclado varía según el material del que se componen: poliéster, Nylon, algodón o lana. Los textiles sintéticos pueden limpiarse, molerse y volver a formar textiles por medio de recuperación química o térmica. Por otra parte, los textiles naturales pueden tratarse mecánicamente para conformar parte del hilado junto con materia virgen. Su tratamiento químico está en etapas de desarrollo [40].

En tercer lugar, están las tecnologías de recuperación. Estas se basan principalmente en recuperar la energía o materia de los desechos que no pueden ser reducidos, reutilizados o reciclados. Se clasifican en [41]:

- Bioquímicas: son procesos que utilizan microorganismos para generar gases a partir de los residuos, los que pueden ser combustionados para la producción de energía. Dentro de esta categoría está la biodigestión en reactores anaeróbicos, usada típicamente con residuos orgánicos y líquidos; y la captura de gases de relleno, en la cual se atrapa el biogás generado por la descomposición de una pila de desechos en relleno sanitario.
- Termoquímicas: son procesos que utilizan el calor para transformar los residuos en nuevas materias o energía. La tecnologías comunes son la incineración, en la cual se combustiona el material para producir energía y eliminar contaminantes y volumen de residuos; la gasificación, o transformación a altas temperaturas (sin combustión) de residuos ricos en carbono en gas de síntesis; y la pirólisis, es decir, la degradación

térmica de la materia orgánica a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno, que produce líquidos, gases y sólidos de interés.

Por último, las tecnologías de disposición final comprenden el acopiamiento de los residuos en un sitio determinado. Este sitio puede ser regulado o no, y esto determina el nivel de tecnología que poseen. En los sitios regulados, existen tratamientos especiales de inertización y aislamiento de residuos peligrosos, y tratamientos de lixiviados de residuos no peligrosos. En los sitios no regulados, no suele haber precauciones del manejo de los impactos de los residuos acopiados y se puede recurrir a la incineración no energética para liberar espacio [3].

## 3.2. Infraestructura de tratamiento de residuos de la Región Metropolitana

La Región Metropolitana concentra el 41,8% de la generación de residuos del país y posee una infraestructura de tratamiento que se concentra en la disposición final. Al 2016, el 81,3% de los residuos sólidos fueron dispuestos; y el resto, valorizado. Del total de los residuos dispuestos, el 78% se trata en 3 rellenos sanitarios y 1 vertedero controlado [4].

Las instalaciones de tratamiento final se categorizan en tres tipos: rellenos sanitarios, que poseen la tecnología y las medidas de seguridad ambiental y sanitaria normadas; vertederos, que fueron planificados para disponer residuos pero sin normativa ambiental y sanitaria mínima; y basurales, que surgen de manera espontánea o preparada y no cumplen ninguna normativa. A cada uno de los tres rellenos y el vertedero le corresponde los residuos de un conjunto de comunas. Dos de los rellenos sanitarios instalados poseen tecnología de captura de biogás, cogeneración de energía y tratamiento de lixiviados [42].

Adicionalmente, existen empresas especializadas en el tratamiento de residuos sólidos peligrosos. Estas poseen tecnologías de inertización y confinamiento final bajo la norma chilena. La mayor empresa en este rubro es Hidronor S.A. que cuenta con un depósito de seguridad, una planta de inertización y una de tratamiento fisicoquímico [42].

El escenario de los tratamientos de reciclaje es limitado. Esto se debe a que las tecnologías instaladas permiten el procesamiento de diferentes materiales a niveles diferentes, lo que deja algunas corrientes sin reciclaje total a nivel local. En la Tabla 3.1 se resume la información de los principales materiales y la profundidad de su tratamiento de reciclaje en la región.

Finalmente, la región posee una estrategia jerarquizada en el manejo de residuos desde 2016. Esto significa un cambio en el paradigma tradicional del manejo de residuos a uno que prioriza la reducción y valorización. Para implementar este cambio, el GORE de Santiago aprobó el financiamiento de tres proyectos que permiten levantar información, aumentar la infraestructura de reciclaje y mejorar el trabajo en red de la gestión de residuos de la región. Por lo tanto, la infraestructura institucional y gubernamental está creciendo, lo que será un punto favorable para futuras industrias de valorización que planifiquen posicionarse en la región [44].

Tabla 3.1: Principales materiales reciclados en la Región Metropolitana y su nivel de reciclaje [42], [43].

Residuo	Tecnología	Reciclaje
Orgánicos	Compostaje en pila aireada con volteo	Total
Metales	Preparación de chatarra para reciclaje	Intermedio
	Refundición de chatarra	Total
Aceite vegetal usado	Tratamiento químico	Total
Plásticos	Preparación de plásticos para reciclaje	Intermedio
	Tratamiento térmico	Total
Papeles y cartones	Preparación para reciclaje	Intermedio
	Proceso de pulpeo	Total
Neumáticos	Granulado y producción de materiales	Total
Tetra Pak	Preparación de Tetra Pak para pulpeo	Intermedio
	Producción de muebles y planchas	Total
Desechos electrónicos	Desmantelamiento y preparación para reciclaje	Intermedio
Vidrio	Refabricación de vidrio	Total



# Capítulo 4

## Escenario actual de gestión de residuos

### 4.1. Gestión de residuos sólidos en la FCFM

El sistema de gestión de residuos sólidos de la FCFM se divide en dos administraciones. Por un lado, está la Unidad de Servicios Comunes que se preocupa, entre otras tareas, del aseo de las áreas comunes de la Facultad. Los residuos recolectados por este servicio se acopian en los puntos de disposición final respectivos de cada unidad geográfica del campus, es decir, Beauchef 850, Beauchef 851 y las dependencias del Departamento de Ingeniería Industrial en la calle Domeyko. Estos residuos no son clasificados en el origen y son recolectados a diario por la Municipalidad de Santiago, que luego los transporta a la Estación de Transferencia de KDM, junto con los residuos domiciliarios del barrio [42].

Cabe señalar que la empresa KDM posee uno de los sistemas de disposición final más avanzados del país. Los desechos son recopilados en el relleno sanitario Loma Los Colorados, donde son procesados mediante tecnología de recuperación de biogás, compuesto producido por los residuos en descomposición anaeróbica. Con este producto recuperado se obtiene energía térmica y eléctrica [45]. Es por este motivo que el sistema, además de ser de disposición final, se caracteriza como de recuperación energética de residuos y minimiza la liberación de gases de efecto invernadero inherentes a los rellenos sanitarios comunes.

Por otro lado, está el Plan de Gestión Integral de Residuos Rebeauchef (Rebeauchef). Este plan de manejo de residuos funciona desde el 2015 y tiene el objetivo de valorizar y gestionar los residuos de la Facultad en línea con sus políticas. Existen cinco familias de residuos gestionados por Rebeauchef: los sólidos no peligrosos, los compuestos orgánicos, los materiales peligrosos, los artículos electrónicos y otros residuos especiales. Estos residuos son clasificados en el origen y a la fecha se han valorizado cerca de 113,1 toneladas por medio de este plan [46].

Para lograr el manejo adecuado de los residuos, Rebeauchef posee infraestructura especializada. Esta se compone de puntos intermedios de recepción de desechos clasificables, distribuidos por el campus, y un centro principal de acopio y segregación de materiales ubicado por la salida a calle Tupper de las dependencias de Beauchef 850. La disposición de esta infraestructura se observa en el Anexo B.1, Figura B.1.

A continuación, se describe cada familia de residuos y su logística.

#### 4.1.1. Residuos no peligrosos

Estos residuos corresponden al material inorgánico, de naturaleza no peligrosa, que proviene de las diferentes actividades de la Facultad. Se compone principalmente de papeles blancos, cartones y cartulinas, diarios, revistas, botellas PET, bolsas PE, envases Tetra Pak, latas de bebida y tarros de conserva. Conforman el 35,6 % en masa de los residuos gestionados a la fecha (ver Figura 4.1).

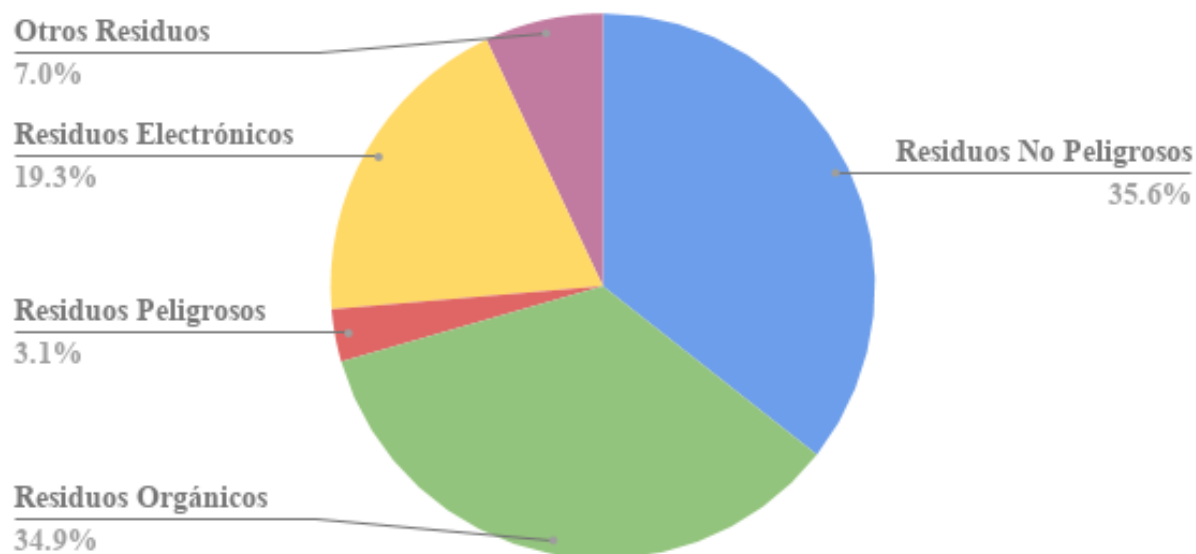


Figura 4.1: Distribución másica de los residuos gestionados por Rebeauchef a la fecha [46].

Dentro de la infraestructura de Rebeauchef, los residuos no peligrosos son los que usan el mayor volumen. Se recolectan de los puntos intermedios y en las sacas de cada boca designada en el centro de acopio. En este centro, los residuos se empaquetan y pesan para su posterior retiro. Por otra parte, los vidrios son entregados a Cristalerías Toro, mientras que el resto de los residuos se entregan a HOPE, empresa intermediaria que envía los residuos a otras que realizan reciclaje intermedio o final.

#### 4.1.2. Residuos orgánicos

En masa, es la segunda familia de residuos. Son materiales compuestos de carbono degradable por medio de compostaje. La materia orgánica se genera principalmente en la producción y disposición de alimentos y en las actividades de áreas comunes que involucran jardinería.

Estos desechos son recolectados en el casino y cafeterías del campus, con un sistema de contenedores transportables rotativos, y en los jardines del campus en acuerdo con el área de aseo. La tercera parte es traída por los integrantes de la comunidad que participan del

programa de recolección de orgánicos domiciliarios. Finalmente, todos estos residuos son contenidos en el centro de acopio hasta su retiro por el Centro de Educación Medioambiental de la Municipalidad de Santiago (en Parque O'Higgins), lugar donde se tratan por medio de un proceso de compostaje de cama aireada sin forzamiento.

### 4.1.3. Residuos peligrosos

Son residuos especiales porque son un grupo de materiales heterogéneo con diversas propiedades que les otorgan un riesgo importante para la salud o el ambiente si no se gestionan adecuadamente. Por este motivo, cada subtipo de residuo es tratado por una entidad competente en su debida disposición.

Los residuos peligrosos son categorizados según el D.S. N°148/2004 en tres listas: "(I) Categorías de residuos consistentes o resultantes de los siguientes procesos" de naturaleza peligrosa, "(II) Categorías de residuos que tengan como constituyentes" compuestos peligrosos específicos y "(III) Categorías de otros residuos" [47]. Bajo esta nomenclatura, los residuos electrónicos y de aceite vegetal también son de naturaleza peligrosa, pero en la clasificación de Rebeauchef se tipifican en sus propias categorías ya que se reciclan.

En Rebeauchef se gestionan las pilas y baterías con la Municipalidad de Santiago, que a su vez realiza la disposición mediante Hidronor, y los tubos fluorescentes y *toners* y *cartridges* de impresión con empresas especializadas. Para su recepción existe un punto intermedio especial de residuos peligrosos y además se coordina con las unidades administrativas la disposición de materiales de sus respectivas bodegas.

### 4.1.4. Residuos electrónicos

Se refieren a materiales de tipo electrónico, es decir equipos computacionales, aparatos asociados a estos y otros. Como ejemplos están los computadores portátiles, teléfonos celulares, *routers*, monitores, cables, teclados, memorias, procesadores, placas de circuito, discos duros, entre otros.

Estos residuos se reciben solo una vez al año en la campaña de tres días *Reciclación E-Waste FCFM*. Los materiales recibidos se clasifican y envían a Chilenter, fundación que se responsabiliza de su reparación y preparación para tratamiento especial.

### 4.1.5. Otros residuos

Es una categorización de residuos que no se clasifican en las categorías anteriores. Principalmente, se trata del aceite vegetal de cocina usado, que es depositado por la comunidad en un contenedor especial del centro de acopio. Su retiro es periódico y se tramita con la empresa Bioils, que transforma este material en aceite purificado para otros usos. Esta categoría también abarca otros tipos de materiales puntuales en el tiempo, pero el aceite usado corresponde al residuo no clasificado más importante, por su ingreso constante al sistema de gestión.

## 4.2. Caracterización de residuos

### 4.2.1. Consideraciones metodológicas

Se realizaron 17 procesos de tomas de muestra distribuidos en seis semanas de medición, compuestas por tres días de recolección (lunes, miércoles y viernes) y tres de cuantificación y caracterización (martes, jueves y sábado). En cada una de estas jornadas de recolección se tomaron muestras de los puntos de acopios principales de la Facultad: el de las dependencias de Beauchef 850, el de Beauchef 851 y el del Departamento de Ingeniería Industrial en calle Domeyko. Las muestras se recolectaban a partir de las 20:00 hrs, la última hora de las funciones del servicio de aseo, y se almacenaban en la bodega del acopio central de Rebeauchef. La medición se realizaba el día siguiente a primera hora para evitar alteraciones considerables de las características de los residuos, como el cambio de masa por pérdida de humedad.

Por otra parte, las mediciones de masa total de residuos generados y por corrientes (descritos en el Anexo B.2.1), que sostienen la estimación de flujo másico respectivo, fueron realizadas con una balanza electrónica de capacidad 300 kg, un contenedor móvil de 240 L y 12,48 kg, y un balde de 20 L y 0,94 kg. Los volúmenes de las corrientes fueron aproximados por medio de la altura de cilindro medida con una huincha retráctil metálica sobre el balde lleno o semi-lleno de residuos no compactados.

Para calcular los resultados generales se usó el programa Microsoft Excel y las siguientes aproximaciones y datos:

- i Se extrapoló la información de cada semana de medición al año, con lo que posteriormente se estimó el flujo másico diario de residuos considerando un periodo de 365 días.
- ii Se consideró una población flotante estimada de 9000 personas según los datos del Área de Infotecnologías, con lo que es posible inferir resultados de generación de residuos per cápita. Este número incluye a estudiantes, académica/os y funcionaria/os.
- iii Se utilizó la estimación de un área de 41640 m<sup>2</sup> para la Facultad, aproximada con Google Earth. Con este dato se infirió el resultado de generación por área.
- iv Con los datos de cantidades recicladas hasta la fecha<sup>1</sup> durante el año 2019, se estimó el flujo que sería reciclado en un año para aproximar las fracciones de recuperación y potencialidad.
- v El estallido social del 18 de octubre produjo una situación particular de generación de residuos, debido a que el funcionamiento de la FCFM se redujo al mínimo entre los días 18 de octubre y 3 de noviembre, que luego aumentó levemente desde la última fecha hasta el 30 de noviembre. Dados los alcances de la memoria, se hicieron todos los cálculos asumiendo un comportamiento normal de la Facultad y no uno especial como el que se tuvo entre el 18 de octubre y el 31 de diciembre de 2019.

La importancia de estos supuestos se revisa en el Anexo B.2.2.

---

<sup>1</sup>Cifras Rebeauchef 2 diciembre 2019 [46].

## 4.2.2. Resultados

La generación promedio de residuos de la FCFM es de  $424,7 \pm 31,8 \text{ kg d}^{-1}$ . De estos,  $311,2 \pm 31,8 \text{ kg}$  ( $4,6 \pm 0,6 \text{ m}^3$ ) se destinan a relleno sanitario y poseen una distribución según categorías observada en la Tabla 4.1. Con lo anterior, se obtiene el indicador de producción per cápita (PPC) de  $0,047 \text{ kg d}^{-1} \text{ persona}^{-1}$ , y una generación por área (PPA) de  $0,010 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . En la Tabla 4.2 se encuentran los valores de estos indicadores para diferentes instituciones de educación superior.

Tabla 4.1: Distribución de la composición del flujo diario de generación de residuos según categorías. Detalle en Anexo B.2.4, Tabla B.5.

Categoría	% masa	% volumen
Residuos domiciliarios	35,1	7,5
Papeles	30,6	30,2
Cartones	9,5	13,6
Plásticos	15,0	36,1
Envases	2,2	3,3
Celulosas sanitarias	0,4	0,7
Gomas y cueros	0,1	0,1
Vidrios	2,0	0,7
Metales	2,5	5,6
Residuos especiales	1,5	1,5
Otros	1,2	0,6

Tabla 4.2: Comparación de los indicadores de intensidad de generación, producción per cápita (PPC) y producción por área (PPA), de diferentes instituciones de educación superior. Detalle de los parámetros relacionados en Anexo B.2.3, Tabla B.3.

Institución (país)	PPC ( $\text{kg d}^{-1} \text{ persona}^{-1}$ )	PPA ( $\text{kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ )
-		
UPBB (Colombia) [48]	0,052	0,004
FCFM (Chile)	0,047	0,010
Harvard (EEUU) [49]	0,249	0,106
IBERO (México) [50]	0,330	0,017
UABC Mexicali (México) [9]	0,040	0,003
UNILAG (Nigeria) [51]	0,059	0,010
Promedio	0,130	0,025
Desviación	0,116	0,037

Por último, se tiene que la fracción de residuos no valorizada equivale a un 73 % en peso, de la cual un 34,5 % son materiales valorizables por Rebeauchef, un 4,5 % tiene potencial valorización en la región y el resto es material de disposición en rellenos sanitarios (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Fracciones másicas de diferentes tipos de residuos según potencial de tratamiento. Detalle en Anexo B.2.4, Tablas B.6 y B.7.

Destino	Posibilidad de valorización	Masa (%)	Total (%)
Relleno sanitario	Valorizable por Rebeauchef	25,8	73,3
	Potencial valorización	3,3	
	No hay valorización	44,2	
Rebeauchef	Valorizado en Rebeauchef	26,7	26,7
	Total	100,0	100,0

### 4.2.3. Discusiones

En primer lugar, se tiene que la metodología permite capturar información representativa de la composición másica y volumétrica y las cantidades totales estimadas en masa. Esto es por dos motivos: primero, al recolectar las muestras en la última hora de aseo se obtienen bolsas que contienen los residuos generados durante el día, situación que variaría si se recolectaran, por ejemplo, a mediodía, ya que no se tendrían muestras de los desechos de los baños (recolectados a última hora), por lo que las muestras representan todos los tipos de residuos generados en el día. Y segundo, la metodología consideró un cálculo de cuántas bolsas componen una muestra representativa, lo que minimiza la varianza en los días de muestreo, dando un error asociado cercano al 7,5 % en masa total. Sin embargo, para la estimación de volumen total el error incrementa (13,0 %) debido a que hubo menor cantidad de mediciones de densidad aparente, teniendo así menor representación. Lo anterior no afecta los resultados de composición volumétrica, ya que su cálculo no se basa en la densidad aparente como lo hace la estimación del volumen total.

En complemento a lo anterior, la metodología utiliza instrumentos y herramientas que suponen un bajo nivel de error experimental dado a que las variaciones de volumen y masa no son significativas con respecto a las muestras medidas. Por ejemplo, el error de la balanza digital es de 0,02 kg y la masa promedio de una muestra típica es de 3,04 kg. Es decir, el error experimental es menor al 1 % de una parte de la muestra. Además, todas las metodologías utilizan implementos similares, por lo que las diferencias de resultado entre instituciones no tienen una componente asociada al error de medición.

En segundo lugar, los indicadores de intensidad de producción se encuentran en el orden de magnitud de los de otras instituciones (ver Tabla 4.2). *A priori*, esto indicaría que las instituciones de educación superior poseen una intensidad de generación característica, pero la desviación estándar es mayor al promedio, lo que significa que hay datos extremos. Al revisar los distintos parámetros de las universidades cotejadas, se observa que no hay correlaciones definidas entre ellos (ver Anexo B.2.3). Es posible que aumentando la muestra de instituciones surja alguna relación, pero la información disponible sobre la generación de residuos de instituciones de educación superior es escasa. Por esta razón, no se puede deducir, con la información disponible, que hay un comportamiento típico de intensidad de generación para esta clase de instituciones.

Por otra parte, se tiene que el indicador de PPC refleja de mejor manera la generación de residuos que el de PPA, ya que la producción (acotada por el contexto infraestructural

y socioeconómico) es proporcional al número de personas [52]. En cambio, la superficie de una institución, generalmente, es constante, por lo que un alza o baja de generación no se vería reflejada por este parámetro. De esta manera, es el indicador per cápita el que permite comparar el tamaño del flujo generado entre las instituciones de educación superior.

En general, las PPC de las instituciones son bajas comparadas con la actividad del país (ver Tabla 4.4). Por ejemplo, en el caso de la FCFM, si se asume que una persona que utiliza la Facultad se comporta como el promedio de habitantes de Chile, el 4,1 % de sus residuos es generado cuando se encuentra en la Facultad y el resto en el exterior. Además, se identifica que la FCFM y UPBB se diferencian de UNILAG y Harvard en cuanto a qué porcentaje representan de la PPC del país respectivo. Estas diferencias probablemente tienen que ver con contextos de producción diferentes, como la ausencia o presencia de actividades generadoras claves (por ejemplo, los servicios de residencia, comida, bares, recreación, etc.).

Tabla 4.4: PPC por país [3]. No se considera IBERO o UABC por su desfase temporal a la cifra por país.

País (Institución)	PPC institución (kg d <sup>-1</sup> persona <sup>-1</sup> )	PPC país (kg d <sup>-1</sup> persona <sup>-1</sup> )	Porcentaje institución (%)
Chile (FCFM)	0,047	1,15	4,1
Colombia (UPBB)	0,052	0,76	6,8
Nigeria (UNILAG)	0,059	0,51	11,6
EEUU (Harvard)	0,249	2,24	11,1

En tercer lugar, la composición de los residuos de la facultad se diferencia de los valores típicos de otras instituciones, cuyas generaciones se componen aproximadamente de un 50 % en residuos orgánicos y 20 % en residuos celulósicos [50]. En el contexto local, hay una menor parte contribuyente de material orgánico y una mayor parte de papel y cartones. Esta diferencia recae en que las fuentes de generación de cada una de estas categorías dependen del contexto de cada universidad, por ejemplo, la presencia de fuentes generadoras como los bares y residencias universitarias que producen cantidades de desperdicios orgánicos y celulósicos importantes, o la extensión de las áreas verdes que aporta residuos de jardinería [53].

Además de lo anterior, la composición de los residuos que van a relleno sanitario es dominada por residuos domiciliarios, papeles, plásticos y cartones. De cada una de estas categorías, la componente mayoritaria es de naturaleza no reutilizable o no reciclable y, si se examina qué residuos corresponden a estas corrientes mayoritarias, la gran mayoría de estos son de un sólo uso (por ejemplo los servicios de plástico, las bolsas, los implementos de cafetería desechables, etc.). Esto se traduce en un gran potencial de reducción de residuos por medio de medidas como la implementación de compras y licitaciones de servicios verdes y campañas educativas de reducción y reutilización [54].

Finalmente, de las composiciones obtenidas se obtiene que alrededor del 39 % del total de residuos que van a relleno sanitario es valorizable. La mayoría está compuesta por materiales gestionables en la infraestructura actual (35 %), como los alimentos compostables, LDPE, papel blanco, poda y jardín, y PET. Otra parte de los materiales valorizables está conformada

por residuos para los cuales existen tratamientos en la región (4 %), como otros tipos de papel, plásticos como el HDPE y PP, y otros metales. Estas cantidades significan un gran potencial de reciclaje, recuperación y disposición responsable que podría ser alcanzado sin modificar la infraestructura actual, teniendo en cuenta que alrededor de un tercio del flujo que va a relleno sanitario subiría en la jerarquía de residuos, minimizando los impactos.

Se concluye que la Región Metropolitana no posee tecnologías variadas para la gestión de los residuos, pero su gestión está en proceso de robustecimiento debido al marco legal e institucional que se está impulsando. Dentro de este contexto la FCFM genera alrededor de 155 ton de residuos al año, lo que es gestionado por dos entidades, una de las cuales (Rebeauchef) se encarga de la gestión responsable del 27 % del total . Este sistema de manejo es completo, en cuanto a que tiene capacidad para la mayoría de las corrientes valorizables en la zona. Tras la caracterización de los residuos de la Facultad, se observan cifras de interés para plantear mejoras: la mayoría de lo no valorizable es de un sólo uso, hay un gran flujo de valorizables que termina en relleno sanitario y existe potencial de poder valorizar otros residuos en la región. Entonces, se detectan posibilidades de mejora en tres aspectos: reducción, aumento de la valorización en la infraestructura existente, y adición de residuos a la lista de materiales posibles de gestionar en Rebeauchef; las que serán utilizadas para generar escenarios de gestión alternativos a evaluar en el Capítulo 4.3.

### 4.3. Escenarios de gestión a evaluar

Una vez conocida la información sobre el funcionamiento del sistema de gestión actual y la caracterización de los residuos, se procedió a construir los escenarios de manejo a evaluar en los siguientes capítulos. En la Tabla 4.5 se resume la información del contexto de gestión de la Facultad, que fue descrito en el Capítulo 4.1.

Tabla 4.5: Resumen del sistema de gestión de residuos Rebeauchef. Final: gestor del residuo; Nivel: nivel de tratamiento, si es Total o Intermedio se refiere a reciclaje.

Residuo	Material	Intermediario	Final	Nivel
Botellas plásticas	PET	HOPE	ReciPET	Total
Bolsas plásticas	PE	HOPE	Donación	Total
Latas	Al y hojalata	HOPE	Comercial HUAL	Intermedio
Tetra Pak	Tetra Pak	HOPE	Recupac	Intermedio
Papeles	Papel	HOPE	SOREPA/Recupac	Intermedio
Cartones	Cartón	HOPE	SOREPA/Recupac	Intermedio
Vidrios	Vidrio	-	Cristalerías Toro	Total
Orgánicos	Orgánico	Muni. Stgo.	CEA	Total
Pilas y baterías	Peligroso	Muni. Stgo.	Hidronor	Disposición final
Tubos fluorescentes	Peligroso	Especialista	Hidronor	Disposición final
Impresión	Peligroso	NGS	Hidronor	Disposición final
Electrónicos	Electrónico	-	Chilenter	Intermedio
Aceite	Otro	-	Bioils	Intermedio



Primero, se separan los casos por nivel de reducción y aumento de tasa de reciclaje y disposición de especiales. Se fijan escenarios con un 90 % del primero y un 80 % del segundo, basándose en las metas de objetivo cero residuos de la Universidad de Harvard [49]. Como situación intermedia se fijan escenarios con 50 % de reducción de residuos y 50 % de aumento de tasa de reciclaje y disposición de especiales. De esta forma, existen dos tipos de casos, los de alta reducción y reciclaje, y los de media reducción y reciclaje. Para ambos grupos, el porcentaje de cambio se aplica sólo a las corrientes que pueden ser reducidas, recicladas o dispuestas especialmente, por lo que los porcentajes totales finales no son exactamente iguales a estas cifras.

Segundo, se varía el ente intermediario de los materiales inorgánicos reciclables. Las instituciones elegidas son HOPE, la Municipalidad de Santiago y la propia Facultad, es decir, que haya trato directo con las empresas gestoras. Por lo tanto, los dos tipos de casos del párrafo anterior se subdividen en tres, lo que genera seis casos a evaluar en total.

Finalmente, hay algunas diferencias de tratamientos. Para los casos de Intermediario HOPE y Sin Intermediario se adicionó el reciclaje de HDPE y PP rígido. Además, el tratamiento de LDPE es artesanal para los casos Intermediario HOPE e industrial para los casos Muni. Stgo. y Sin Intermediario. Con estas decisiones, se construye la Tabla 4.6 que resume las descripciones de los escenarios construidos.

Tabla 4.6: Resumen de la descripción de los escenarios de gestión a evaluar. A: Artesanal, I: Industrial.

Características del escenario	1	2	3	4	5	6
Reducción de desechos al 50 %	✓	✓	✓	-	-	-
Reducción de desechos al 90 %	-	-	-	✓	✓	✓
Aumento del reciclaje al 50 %	✓	✓	✓	-	-	-
Aumento del reciclaje al 80 %	-	-	-	✓	✓	✓
Intermediario HOPE	✓	-	-	✓	-	-
Intermediario Muni. Stgo.	-	✓	-	-	✓	-
Sin Intermediario	-	-	✓	-	-	✓
Tratamiento HDPE y PP rígido	✓	-	✓	✓	-	✓
Tratamiento LDPE	A	I	I	A	I	I

# Capítulo 5

## Análisis de Ciclo de Vida

### 5.1. Objetivo y alcance

Se aplicó la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de los diferentes escenarios del Capítulo 4.3. Para lograrlo, se utilizó el programa *openLCA 1.7.0* y se definió como alcance global un sistema que incluye desde las actividades de desecho caracterizadas hasta la aplicación de sus diferentes tratamientos. Este alcance se define dentro de un límite de sistema: una delimitación de las actividades que se consideran en el análisis. Este límite permite evaluar los impactos relacionados a sus actividades considerando los materiales, energía y servicios que interactúan tanto con la ecósfera (recursos naturales) como la tecnósfera (productos, recursos y actividades humanas). En la Figura 5.1 se observa el sistema global definido por el alcance, y en el Anexo C.1 se detallan los sistemas específicos referidos a cada caso de evaluación.

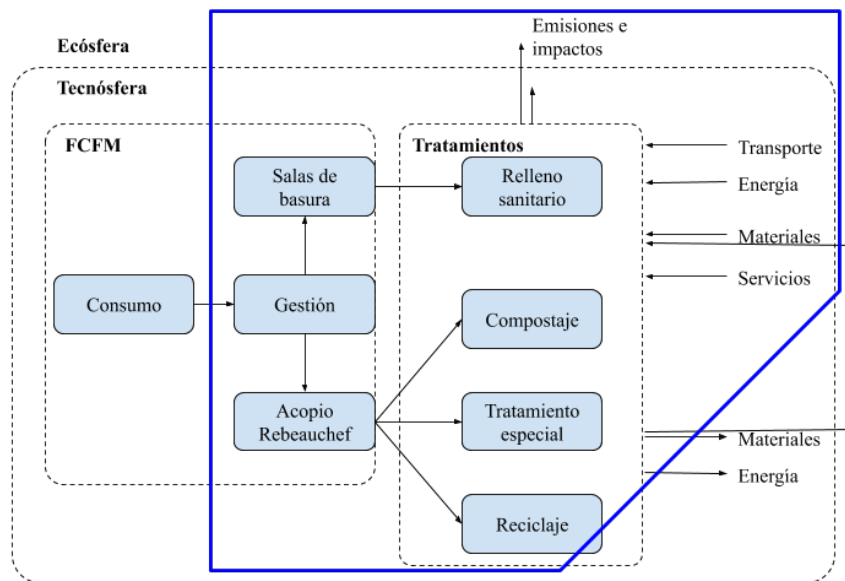


Figura 5.1: Límites del sistema global, representado por el borde azul continuo.

Dada la naturaleza del sistema analizado, el enfoque se define como “de la puerta a la (semi)cuna”, es decir, considera los impactos desde que los residuos son acopiados en la Facultad para su retiro (la “puerta”) hasta las etapas de:

- disposición final para residuos en relleno sanitario y especiales,
- compostaje para los residuos orgánicos, y
- pre-reciclaje o reciclaje total para los residuos reciclables.

El último punto es lo que le confiere la característica de “(semi)cuna” al enfoque, ya que si se considerara el reciclaje total para cada residuo reciclable el enfoque sería hasta la “cuna”: los residuos vuelven a transformarse a materias primas listas para su uso. La razón por la cual los procesos de los materiales reciclables se consideran hasta el pre-reciclaje en general es que se define que el límite llega hasta las empresas que se relacionan con los intermediarios de reciclaje, que en su mayoría solo ejecutan procesos de pre-tratamiento. En la Figura 5.1 esto es representado por un corte del bloque “Reciclaje” por el límite.

La unidad funcional es la cantidad que permite dar referencia a los impactos de cada sistema. Se definió como 1 kg de residuos tratados. Esta cantidad permite comparar los impactos de los escenarios evaluados. También se estableció que la metodología de evaluación de impactos sea *CML (baseline) (v4.4, enero 2015)*. Esta metodología fue creada por la Universidad de Leiden en 2001. Contiene diversos factores de caracterización que permiten realizar el Análisis de Impacto del Ciclo de Vida, es decir, la transformación de la información de las emisiones a impactos de diferentes categorías [55].

Para este trabajo se escogieron las siguientes categorías de impacto:

- Cambio climático (GWP): alteración de la temperatura global por acción antropogénica que causa alteraciones al clima, lo que daña los ecosistemas y la biodiversidad y aumenta las amenazas climáticas a la sociedad. Se expresa en potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) sobre un horizonte de 100 años, lo que se mide en equivalentes de dióxido de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq.).
- Eutrofización (EUT): se refiere a la acumulación de nutrientes en los medios acuáticos que se evidencia por la formación de algas y la acumulación de fósforo, lo que daña la calidad de los ecosistemas. Se mide en equivalentes de fosfato (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.).
- Agotamiento de la capa de ozono (ODP): a nivel estratosférico, por causa de emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono, lo que afecta la salud humana y de los ecosistemas por mayor exposición a rayos UV. Se expresa en potencial de agotamiento de ozono de diferentes gases (ODP por sus siglas en inglés), lo que se mide en equivalentes de gas clorofluorocarbono-11 (kg CFC-11 eq.).
- Toxicidad humana (HTP): refleja los efectos tóxicos de una unidad de material químico liberado al medio ambiente, que causa problemas potenciales de salud en humanos como cáncer o las enfermedades respiratorias. Se expresa en potencial de toxicidad para los humanos (HTP por sus siglas en inglés), lo que se mide en equivalentes de 1,4-diclorobenceno (kg p-DCB eq.).

Con respecto a la información del sistema, se utilizó la base de datos *ecoinvent 3.4 Cut-Off LCI 2018/03/04*. Esta base de datos contiene información de varios procesos de producción

y manufactura, reciclaje y tratamiento y disposición final de residuos. El enfoque *Cut-Off* define que los impactos de la producción de materiales a partir de una materia prima es responsabilidad del productor primario, lo que permite analizar los materiales reciclados sin los impactos de su fabricación inicial, es decir, sólo bajo los impactos de los procesos de reciclaje.

Adicionalmente, se investigó sobre las cadenas de transporte y los procesos que maneja cada empresa dentro del límite de batería. Con esto se obtuvo información específica del funcionamiento de cada sistema. Así, combinando la información de cada escenario con la de la base de datos de procesos utilizada, se pudo evaluar cada caso.

Finalmente, se especifica cumplir un nivel máximo de tres del índice de calidad de información (DQI por sus siglas en inglés) para que el análisis cumpla con el objetivo y alcance establecido. Esta cota propuesta significa que, como mínimo, la información: se basará en datos calculados o medidos, no tendrá una diferencia mayor a diez años de la elaboración del análisis, estará relacionada al área geográfica y no se alejará del alcance tecnológico del estudio en más de dos categorías de representatividad tecnológica (detalle en Anexo C.2).

## 5.2. Análisis de inventario

El inventario de cada escenario se basa en la información de la base de datos utilizada y la recopilada. Dado el número de corrientes que se tratan en el sistema, se resumen los flujos principales de cada escenario en la Tabla 5.1 y se especifican en el Anexo C.3. Con estas cantidades, se construyeron los modelos del Anexo C.4, que permitieron aplicar la metodología CML para tener los resultados por categoría de impacto.

Tabla 5.1: Flujos generales de tratamiento de residuos de los diferentes escenarios en ton año<sup>-1</sup>.

Flujo	Base	1	2	3	4	5	6
Compostaje	9,4	13,2	13,2	13,2	10,6	10,6	10,6
Reciclaje	21,5	27,9	27,6	27,9	23,5	23,4	23,5
Especial	10,5	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5
Relleno	113,6	46,4	46,8	46,4	8,0	8,2	8,0
Total	155,0	98,2	98,2	98,2	52,7	52,7	52,7

## 5.3. Análisis de impacto

En la Tabla 5.2 se representan los resultados según categoría de impacto obtenidos aplicando la metodología. Esta información se reporta en base a la unidad funcional. Por ejemplo, para el Escenario 1 el impacto de Cambio Climático es de 0,565 kg CO<sub>2</sub> eq. por kg de residuo tratado.

Como se observa en la Tabla 5.2, las dos categorías de impacto que poseen una proporción cercana al kg de impacto por kg de residuos tratados son el Cambio climático y la Toxicidad humana. Las otras categorías se diferencian por más de dos órdenes de magnitud. Esto indica

Tabla 5.2: Resultados del análisis de impacto de cada escenario por unidad funcional (kg de residuo tratado).

Escenario	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	EUT (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.)	HTP (kg p-DCB eq.)	ODP (kg CFC-11 eq.)
-				
Base	0,623	$2,18 \cdot 10^{-3}$	0,151	$7,29 \cdot 10^{-9}$
1	0,565	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,137	$8,68 \cdot 10^{-9}$
2	0,541	$1,48 \cdot 10^{-3}$	0,131	$6,41 \cdot 10^{-9}$
3	0,575	$1,54 \cdot 10^{-3}$	0,142	$9,15 \cdot 10^{-9}$
4	0,493	$7,35 \cdot 10^{-4}$	0,117	$9,31 \cdot 10^{-9}$
5	0,458	$6,76 \cdot 10^{-4}$	0,107	$6,05 \cdot 10^{-9}$
6	0,500	$7,53 \cdot 10^{-4}$	0,121	$9,39 \cdot 10^{-9}$

que en relación a la unidad funcional los contribuyentes de impacto mayores son el GWP y HTP. Lo anterior no es equivalente a decir que EUT y HTP no poseen significancia en los impactos, ya que cada categoría posee referencias distintas, lo que se discute más adelante.

Por otra parte, al comparar cada tipo de impacto por escenario, se tiene que la variación se mantiene dentro del orden de magnitud. Esto indica que los escenarios son relativamente similares en daños por unidad funcional. A pesar de esto, se observa que el impacto, bajo estas categorías, de la gestión de residuos de la Facultad disminuye en proporción a los residuos a tratar (ver diferencias entre el escenario base, el grupo de escenarios 1-2-3 y el grupo de escenarios 4-5-6 en la Tabla 5.2), pero varía en menor medida ante cambios de tratamiento (observado en las diferencias dentro de cada uno de los grupos anteriores). Esto se traduce en que, para mejorar el sistema de gestión, las medidas de reducción generan mayores cambios que variar los tratamientos de reciclaje. Cabe mencionar que el conjunto de escenarios considerados afecta fuertemente este resultado, ya que si se incluyeran más opciones de tratamiento, que no existen en la Región (ver Capítulo 3.2), como la incineración, biodigestión industrial, recuperación de combustible inorgánico, entre otras, los resultados tendrían otro tipo de diferencias que sólo variando tecnologías de reciclaje en corrientes menores.

Al comparar los resultados con valores de referencia globales (ver Tabla 5.3), se observa que los indicadores de la Facultad por persona son menores a los del promedio mundial. Esto quiere decir que el proceso de gestión de residuos significa una fracción de los impactos de una persona promedio, independientemente del escenario de gestión. Este resultado coincide con la relación entre la referencia de generación de residuos nacional versus Facultad, y sumado a la dependencia entre la magnitud del impacto y la masa de residuos tratados, se infiere que los daños netos por categoría son proporcionales a esta última cantidad.

Con los datos de la Tabla 5.2, se realizó una normalización calculando el cambio porcentual de cada escenario de gestión de residuos respecto al caso base [57]. Esto se representa en la Figura 5.2.

Tabla 5.3: Comparación de los resultados absolutos per cápita con referencias globales per cápita. Se excluye HTP por falta de información, se asume que debería comportarse como los otros indicadores, siendo de menor orden de magnitud que el promedio global.

Escenario	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	EUT (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.)	ODP (kg CFC-11 eq.)
-			
Base	10,7	0,0375	1,25·10 <sup>-7</sup>
1	6,2	0,0166	0,95·10 <sup>-7</sup>
2	5,9	0,0162	0,70·10 <sup>-7</sup>
3	6,3	0,0168	1,00·10 <sup>-7</sup>
4	2,9	0,0043	0,55·10 <sup>-7</sup>
5	2,7	0,0040	0,35·10 <sup>-7</sup>
6	2,9	0,0044	0,55·10 <sup>-7</sup>
Mundo [56]	8700,0	0,7340	0,0234

De la Figura 5.2 se observa que, en general, los escenarios significan una reducción de impactos. El GWP, la EUT y la HTP disminuyen a medida que los escenarios representan un menor flujo de material tratado y aumento de la tasa de valorización. Los escenarios 2 y 5 muestran una leve diferencia con los otros casos en estas categorías, y poseen un comportamiento de aumento de impactos de ODP para los casos 1, 3, 4 y 6. Al analizar los contribuyentes principales de cada categoría para cada escenario (ver Anexo C.5), se desprende que la diferencia en todas las categorías radica en el nivel de tratamiento de PET de cada escenario: reciclaje total para los escenarios 1, 3, 4 y 6, y preparación para reciclaje en los casos 2 y 5; a pesar de ser una corriente minoritaria.

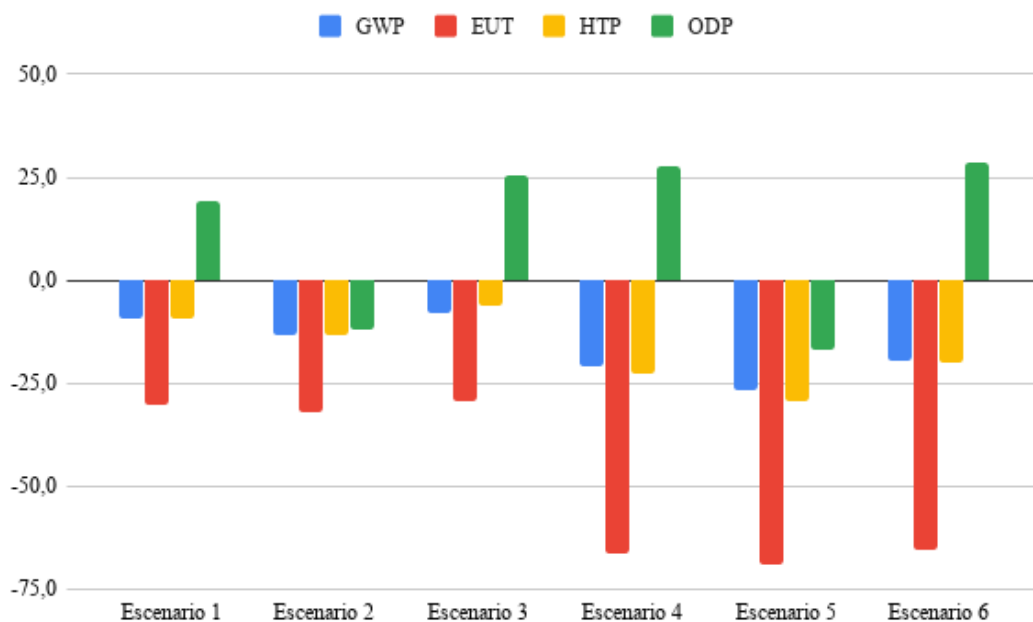


Figura 5.2: Cambio porcentual de las categorías de impacto, relativo al escenario base.

## 5.4. Interpretación

Respecto a la calidad de la información del análisis conducido, se utilizó el DQI para determinar su nivel (detalle en Anexo C.2, Tabla C.6; resumen en Tabla 5.4), donde 1 es el máximo puntaje y 5 es el mínimo. De la Tabla 5.4 se tiene que:

- Existe alta fiabilidad porque los datos fueron en su mayoría basados en cálculos, a excepción de la estimación de flujos realizada para la etapa de cogeneración por biogás.
- Dado que los flujos fueron calculados basados en la caracterización de residuos y la composición de escenarios, se tiene que la completitud es alta. Es decir, los flujos del sistema de interés son representativos.
- La correlación temporal entre el modelo y el sistema fue, en general, alta debido a que la base de datos utilizada posee información en un rango de validez con cota superior en el año 2017. El proceso que dista de mayor manera, temporalmente, es el tratamiento de los residuos en relleno sanitario, debido a que se utilizó información del 2011 para realizar ciertas estimaciones. Esto le confiere menor representatividad a este proceso.
- La mayoría de los procesos tienen representación geográfica de nivel regional *Rest of the World* (resto del mundo), por lo que la correlación entre modelo y sistema es media en este aspecto. Esto se debe a que se utilizan procesos de la base de datos *ecoinvent 3.4* para aproximar los sistemas, que es limitada en información específica para Chile. El único proceso regionalizado al país es la cogeneración de energía por biogás, lo que aumenta la representatividad de esta etapa.
- En cuanto a las diferencias tecnológicas, se tiene que es alta para todas las etapas excepto: ciertos tipos de transporte, los tratamientos de relleno sanitario, compostaje y residuos especiales que se aproximan a las condiciones de operación de los procesos de la base de datos; los residuos de papeles, cartones y Tetra Pak, que se aproximan al proceso de preparado de cartón para reciclaje debido a que las etapas son similares; y ciertos pre-reciclajes o reciclajes de plásticos PET, HDPE, LDPE y PP, los cuales se aproximan a procesos de la base que se diferencian por una etapa o materia prima.

Tabla 5.4: Resumen del análisis de calidad.

Característica	DQI
Fiabilidad	2,14
Completitud	1,00
Correlación temporal	1,19
Correlación geográfica	2,90
Correlación tecnológica	1,67
Total	1,69

Por lo tanto, la calidad de la información es adecuada ( $DQI = 1,7$ ) dentro de lo establecido en el alcance y se tiene que el análisis es representativo ya que las correlaciones temporales, geográficas y tecnológicas son menores a 3. Además, dado que los escenarios fueron construidos bajo la misma metodología y aplicando los mismos supuestos para las etapas homólogas o análogas, el análisis es consistente. Finalmente, se tiene que los resultados son reproducibles porque se aplicó la metodología de ACV según la norma ISO14044 junto con *software* y bases de datos que se ajustan a esta y son ampliamente usados en el área.

Para finalizar, se logra evaluar los escenarios por medio de ACV de manera representativa bajo las categorías de impacto escogidas. Del análisis se desprende que la generación de residuos y su tratamiento en cada caso son proporcionales a los impactos. También se tiene que los escenarios más favorables se dividen en dos grupos de acuerdo a la tasa de reducción y valorización y que, dentro de estos grupos, las diferencias se dan principalmente por el nivel de reciclaje del material PET. De esta manera, según el Análisis de Ciclo de Vida, los casos se ordenan de manera descendiente: 5, 4, 6, 2, 1 y 3. De este orden se desprende que ambientalmente conviene reducir, ya que disminuyen en mayor cantidad los impactos, seguido de cambios en los sistemas de tratamiento.



# Capítulo 6

## Proceso de Análisis Jerárquico

### 6.1. Objetivo y estructura

El objetivo del Proceso de Análisis Jerárquico es comparar los escenarios de gestión bajo los aspectos económicos y de juicio de expertos. Esto define que el problema o decisión del análisis sea cuál es el mejor escenario bajo estas condiciones. En esta evaluación se miden los criterios ambientales<sup>1</sup> y los económicos:

- Criterio ambiental (AMB): se refiere a lo relacionado con impactos de naturaleza ecológica. Se subdivide en:
  - Emisiones con Efecto Invernadero (EEI): impactos por emisión de gases de efecto invernadero que resultan en el acrecentamiento de este efecto.
  - Emisiones y contaminación con Otros Efectos (EOE): impactos por emisiones de gases sin efecto invernadero y contaminación al suelo, aire o agua que resultan en daño a la salud humana, la calidad de los ecosistemas y los recursos naturales.
- Criterio económico (ECN): se refiere a impactos de carácter económico-administrativo. Se subdivide en:
  - Costo operacional (COP): costo de mantener la operación del escenario.
  - Dificultades logísticas (LOG): dificultades logísticas asociadas al escenario como la gestión de los retiros, el control de inventario, la cadena de transporte, la trazabilidad, etc.
  - Costo de inversión (INV): costo de inversión asociado al escenario.

Las alternativas del problema son los seis escenarios de gestión construidos, lo que junto a la decisión y los criterios, generan la jerarquía de análisis o estructura de decisión representada en la Figura 6.1.

La comparación de alternativas bajo cada subcriterio se establece de manera cuantitativa para el COP e INV por medio de una evaluación económica de cada uno, y de manera semi-

---

<sup>1</sup>En esta evaluación, el análisis de criterios ambientales es recogido desde la opinión de los expertos y no desde el ACV, realizado en el capítulo anterior, porque de esta manera se obtiene información cualitativa sobre el juicio ambiental de estos agentes.

cuantitativa para las EEI, EOE y LOG por medio de indicadores construidos según la opinión de expertos (cualitativa). En este trabajo, son el jefe de la OIS y el ingeniero de proyectos de la misma quienes representan la toma de decisiones en gestión de residuos responsable en la Facultad.

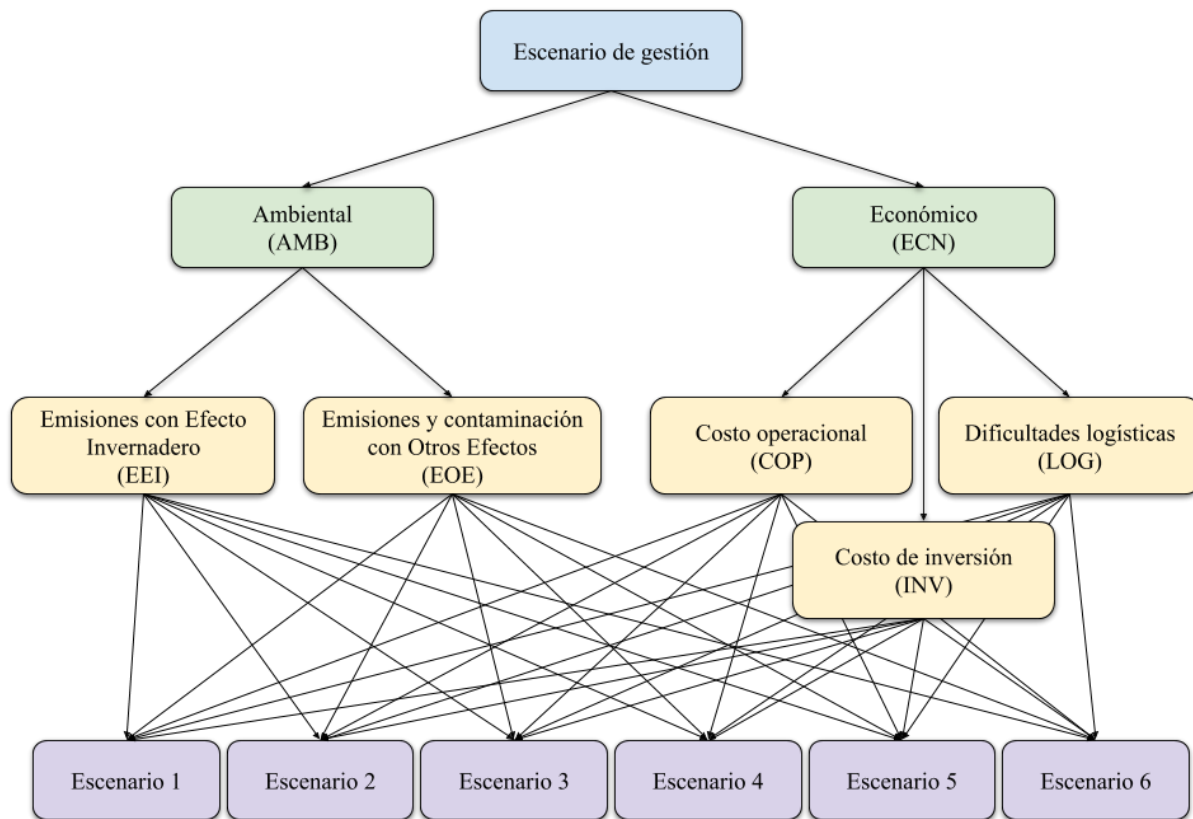


Figura 6.1: Estructura de decisión.

## 6.2. Evaluación económica

La evaluación económica se realiza desde el punto de vista de la OIS. Se consideran costos de operación e inversión según se describe a continuación.

Los costos operacionales son conformados por costos pre-recolección (sueldos de los trabajadores y materiales), costos de retiros según las entidades que lo efectúan y por utilidades generadas por la venta de los residuos que posean valor económico (lo que disminuye el costo total). El desglose por escenario se observa en las Tablas 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1: Costos operacionales de los escenarios (primera parte).

Desglose	Unidad	Base	1	2	3
<i>Sueldos</i>	(CLP año <sup>-1</sup> )	2410000	3020000	3020000	3020000
<i>Materiales</i>	(CLP año <sup>-1</sup> )	360000	360000	360000	360000
<b>Costos pre-colección</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	2770000	3380000	3380000	3380000
<b>Costo retiro</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	3351657	3420195	1869075	2009075
<b>Ingresos</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	-1276618	-1571163	0	-1785965
<b>Total</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	4845039	5229032	5249075	3603110
<b>Total por kg</b>	(CLP año <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	117	101	102	70

Tabla 6.2: Costos operacionales de los escenarios (segunda parte).

Desglose	Unidad	4	5	6
<i>Sueldos</i>	(CLP año <sup>-1</sup> )	3020000	3020000	3020000
<i>Materiales</i>	(CLP año <sup>-1</sup> )	360000	360000	360000
<b>Costos pre-colección</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	3380000	3380000	3380000
<b>Costo retiro</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	3373589	1822836	1962469
<b>Ingresos</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	-1370872	0	-1554891
<b>Total</b>	(CLP año <sup>-1</sup> )	5382717	5202836	3787578
<b>Total por kg</b>	(CLP kg <sup>-1</sup> )	120	117	85

Las diferencias principales entre los sueldos se deben a que en el caso base se considera una trabajadora en el centro de acopio y el contrato de seis alumnos, y para el resto se tienen dos trabajadores en el centro de acopio y dos alumnos contratados. La cantidad de personas contratadas no varía entre el grupo de escenarios 1-2-3 y 4-5-6 porque los flujos a tratar por Rebeauchef son similares en ambos casos (son diferentes en el flujo que se trata por relleno sanitario que no se considera en el alcance de la evaluación económica debido a que esta parte no es administrada por Rebeauchef). Por la misma razón, los costos materiales se consideran iguales para todos los escenarios.

El costo de retiro depende de la institución intermediaria: con la Municipalidad la mayoría de estos costos son 0, por lo que los casos 2 y 5 son menores. Para los casos 1-4 y 3-6 la mayoría de los costos dependen de HOPE y las diferentes empresas directas respectivamente. De la misma manera dependen los ingresos, teniéndose 0 por parte de la Municipalidad y diferentes valores según los otros intermediarios.

Por otro lado, el costo de inversión se estima en base a lo que cuestan las campañas educativas efectivas y la implementación de infraestructura como contenedores de segregación, siendo un total de 18750000 CLP año<sup>-1</sup> para los casos 1, 2 y 3, y el doble para los casos 4, 5 y 6 asumiendo que el costo de inversión es proporcional a los esfuerzos de reducción y aumento de valorización [58], [59].

### 6.3. Generación de indicadores.

Para los subcriterios EEI, EOE y LOG, se realizó una encuesta a cada experto que posee tres preguntas principales: qué variables cree que afectan al subcriterio, cómo afectan a este subcriterio y cómo pondera cada una en el subcriterio. Con las respuestas obtenidas, se procedió a cuantificar las dependencias de cada variable, las cuales se normalizaron por el promedio y se ponderaron, conformando un indicador semi-cuantitativo que mide cada alternativa para cada subcriterio. Estas respuestas y cálculos se encuentran en el Anexo D.1.

Para el subcriterio COP se realizó una normalización por la cantidad de residuos tratados y para el INV se utilizó el dato directo de costo. Los resultados de todos los indicadores para las alternativas se presentan en las Tablas 6.3 y 6.4. Cada experto genera una tabla debido a la diferencia de variables y ponderaciones seleccionadas por ellos.

Tabla 6.3: Indicadores para el experto 1.

Escenario	EEI	EOE	LOG	INV	COP
1	-0,29	-0,27	0,28	-18,75·10 <sup>6</sup>	-101,10
2	-0,20	-0,19	0,28	-18,75·10 <sup>6</sup>	-102,17
3	-0,29	-0,29	0,23	-18,75·10 <sup>6</sup>	-69,66
4	0,43	0,43	0,16	-37,50·10 <sup>6</sup>	-120,46
5	0,52	0,51	0,16	-37,50·10 <sup>6</sup>	-116,71
6	0,43	0,41	0,10	-37,50·10 <sup>6</sup>	-84,76

Tabla 6.4: Indicadores para el experto 2.

Escenario	EEI	EOE	LOG	INV	COP
1	-0,24	0,12	0,63	-18,75·10 <sup>6</sup>	-101,10
2	-0,07	0,28	0,63	-18,75·10 <sup>6</sup>	-102,17
3	-0,28	0,06	0,55	-18,75·10 <sup>6</sup>	-69,66
4	0,36	0,62	0,63	-37,50·10 <sup>6</sup>	-120,46
5	0,52	0,77	0,63	-37,50·10 <sup>6</sup>	-116,71
6	0,31	0,55	0,55	-37,50·10 <sup>6</sup>	-84,76

## 6.4. Preferencias

Las preferencias de cada nodo de la jerarquía de decisión se calculan comparando de manera binaria cada término en un nivel. A continuación, se presentan las comparaciones a nivel de criterios y subcriterios para cada experto (numerados 1 y 2 en las Tablas 6.5, 6.6 y 6.7), las que fueron recolectadas por medio de encuesta utilizando la Escala de Saaty [24].

Tabla 6.5: Comparaciones binarias según expertos, nivel: criterios.

1	ECN	AMB	2	ECN	AMB
ECN	1	1/3	ECN	1	1/3
AMB	3	1	AMB	3	1

Tabla 6.6: Comparaciones binarias según expertos, nivel: subcriterios económicos.

1	COP	LOG	INV	2	COP	LOG	INV
COP	1	3	2	COP	1	1	5
LOG	1/3	1	1/3	LOG	1	1	5
INV	1/2	3	1	INV	1/5	1/5	1

Tabla 6.7: Comparaciones binarias según expertos, nivel: subcriterios ambientales.

1	EEI	EOE	2	EEI	EOE
EEI	1	1	EEI	1	1
EOE	1	1	EOE	1	1

Luego, se generaron las matrices de comparación binaria de las alternativas transformando los resultados para cada indicador de subcriterio a una escala del 1 al 9 (equiparable a la Escala de Saaty), y se compararon mediante la división de los valores de cada par binario (resultando las Tablas 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12). Toda las matrices de comparación se almacenaron en un archivo YAML que puede ser ejecutado por código en R para calcular las preferencias de decisión finales (ver Figura 6.2) según la metodología de cálculo del PAJ (Capítulo 2.2.3). Los archivos utilizados se presentan en el Anexo D.2.

Tabla 6.8: Comparación binaria de las alternativas según EEI y vector de pesos.

EEI	1	2	3	4	5	6	Peso
1	1,0	0,5	1,2	0,2	0,1	0,2	0,043
2	2,0	1,0	2,5	0,3	0,3	0,3	0,086
3	0,8	0,4	1,0	0,1	0,1	0,1	0,035
4	6,6	3,3	7,7	1,0	0,9	1,0	0,268
5	7,6	3,8	8,9	1,2	1,0	1,2	0,311
6	6,4	3,2	7,4	1,0	0,8	1,0	0,258

Tabla 6.9: Comparación binaria de las alternativas según EOE y vector de pesos.

EOE	1	2	3	4	5	6	Peso
1	1,0	0,6	1,5	0,2	0,2	0,2	0,051
2	1,8	1,0	2,7	0,4	0,3	0,4	0,094
3	0,7	0,4	1,0	0,1	0,1	0,1	0,034
4	5,4	3,1	7,7	1,0	0,9	1,1	0,265
5	6,2	3,5	9,0	1,2	1,0	1,3	0,308
6	5,1	2,9	7,2	0,9	0,8	1,0	0,248

Tabla 6.10: Comparación binaria de las alternativas según COP y vector de pesos.

COP	1	2	3	4	5	6	Peso
1	1,0	1,0	0,4	4,0	2,5	0,6	0,155
2	1,0	1,0	0,4	3,9	2,4	0,6	0,148
3	2,2	2,3	1,0	9,0	5,7	1,4	0,344
4	0,2	0,3	0,1	1,0	0,6	0,2	0,038
5	0,4	0,4	0,2	1,6	1,0	0,2	0,061
6	1,6	1,7	0,7	6,6	4,2	1,0	0,253

Tabla 6.11: Comparación binaria de las alternativas según LOG y vector de pesos.

LOG	1	2	3	4	5	6	Peso
1	1,0	1,0	5,2	1,8	1,8	9,0	0,257
2	1,0	1,0	5,2	1,8	1,8	9,0	0,257
3	0,4	0,4	1,0	1,0	1,0	3,7	0,113
4	0,7	0,7	4,8	1,0	1,0	6,2	0,172
5	0,7	0,7	4,8	1,0	1,0	6,3	0,172
6	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	1,0	0,029

Tabla 6.12: Comparación binaria de las alternativas según INV y vector de pesos.

INV	1	2	3	4	5	6	Peso
1	1,0	1,0	1,0	9,0	9,0	9,0	0,300
2	1,0	1,0	1,0	9,0	9,0	9,0	0,300
3	1,0	1,0	1,0	9,0	9,0	9,0	0,300
4	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,033
5	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,033
6	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,033

Sobre la metodología usada, se tiene que utilizar indicadores para traducir las preferencias de los expertos al comparar alternativas bajo los subcriterios posee ventajas y desventajas. La ventaja principal es que logra capturar de manera simple y sistemática las preferencias al no tener que aplicar la Escala de Saaty cada vez que se realiza un comparación, lo que además necesitaría un conocimiento detallado de cada escenario por parte de cada experto

	Peso	ESC1	ESC2	ESC3	ESC4	ESC5	ESC6	Inconsistencia
<b>Decisión</b>	100.0%	8.9%	12.0%	9.3%	21.8%	25.5%	22.4%	0.0%
<b>ECN</b>	25.0%	5.4%	5.3%	6.7%	1.9%	2.2%	3.5%	5.1%
<b>COP</b>	12.3%	1.9%	1.8%	4.2%	0.5%	0.7%	3.1%	0.0%
<b>LOG</b>	7.4%	1.9%	1.9%	0.8%	1.3%	1.3%	0.2%	0.0%
<b>INV</b>	5.3%	1.6%	1.6%	1.6%	0.2%	0.2%	0.2%	0.0%
<b>AMB</b>	75.0%	3.5%	6.7%	2.6%	19.9%	23.3%	18.9%	0.0%
<b>EEI</b>	37.5%	1.6%	3.2%	1.3%	10.0%	11.7%	9.6%	0.0%
<b>EOE</b>	37.5%	1.9%	3.5%	1.3%	9.9%	11.6%	9.3%	0.0%

Figura 6.2: Resultados finales según el PAJ.

y un mayor tiempo de encuesta. Por otro lado, la desventaja principal es que se asumen dependencias directas entre las variables y las características de los sistemas que influyen en los indicadores por subcriterios, lo que representa de manera simplificada el juicio del experto. Por ejemplo, se tiene que el transporte (variable) afecta las EEI (según los expertos) y se asume relación directa a la carga transportada en ruta (característica del sistema), pero esta relación es decidida por el evaluador y no por los expertos. Por lo tanto, el uso de indicadores facilita la comparación binaria cuando hay seis escenarios a comparar (12 comparaciones por subcriterio), pero pierde parte de la información sobre el juicio de los expertos al relacionar características de los sistemas a las variables recolectadas en las encuestas.

De las Tablas 6.5, 6.6 y 6.7 se observa que tanto para la comparación de criterios generales como la de subcriterios ambientales ambos expertos tienen opiniones iguales en cuanto a cuál es la importancia de cada elemento en la decisión, donde el criterio ambiental es levemente más importante que el económico y, dentro del criterio ambiental, ambos subcriterios son de igual importancia. Las diferencias de opinión se dan en los subcriterios económicos en los cuales uno de los expertos prefiere los costos operacionales y dificultades logísticas por sobre la inversión, y el otro prefiere el costo operacional sobre las dificultades logísticas y luego la inversión, pero también considera la inversión levemente superior a lo logístico (lo que genera un nivel de inconsistencia). En general, no hay preferencias de marcada intensidad en la Escala de Saaty, lo que indica que la asignación de importancia es equilibrada, en el sentido de que no habrá dominancia extrema de un elemento por sobre los demás [24].

Sobre los resultados de la Figura 6.2, se desprende que el peso de la decisión se concentra mayoritariamente en el aspecto ambiental (75 %) dentro del cual ambos subcriterios ponderan de igual manera. De los subcriterios económicos el que más pesa es el costo operacional, seguido de las dificultades logísticas y el costo de inversión. Con estas preferencias, los escenarios más favorecidos según el PAJ son el 5, 6 y 4, seguido de el 2, 3 y 1. Esta subdivisión en grupos se debe a que los indicadores derivan de las características de los escenarios, las cuales tienen un comportamiento similar de agrupación (por ejemplo, como se evidencia en el análisis económico).

Adicionalmente, la metodología usada también produjo que la inconsistencia de las matrices de comparación binaria de las alternativas bajo cada subcriterio fuera cercana a cero. Esto se debe a que los indicadores construidos guardan consistencia al no generar situaciones en las que, en una primera comparación, uno sea mayor que el otro y que luego esta relación cambie, lo que si se puede dar en encuestas. Por otra parte, la inconsistencia de las matrices de subcriterios ambientales es nula debido a que ambos expertos sopesaron los subcriterios en igualdad, lo que no produce inconsistencias. Finalmente, en la encuesta, uno de los expertos realizó comparaciones inconsistentes entre sí (Matriz 1 de la Tabla 6.6) lo que produce que la matriz de comparación de subcriterios económicos presente un nivel de inconsistencia por arrastre de la inconsistencia de este experto. A pesar de esto, el nivel de inconsistencia es de 5 %, lo que está por debajo del umbral de rechazo de comparaciones (10 %).

En síntesis, se realizó un Proceso de Análisis Jerárquico que permitió definir que el Escenario 5 es comparativamente preferible bajo aspectos ambientales y económicos desde el punto de vista de los tomadores de decisión, quienes otorgan mayor importancia a las consecuencias ecológicas de los escenarios. La metodología aplicada permitió el cálculo simple y sistemático de las comparaciones de las alternativas, lo que conllevó a bajas inconsistencias de los resultados, pero a cambio de una menor representabilidad de las opiniones expertas a que si se realizara usando la Escala de Saaty, que a su vez significa otros inconvenientes por la complejidad de las comparaciones. En futuras instancias podría mejorarse la representabilidad agregando preguntas en la encuesta que apunten a detectar el comportamiento específico de las variables, no sólo el general.



# Capítulo 7

## Combinación de los resultados

### 7.1. Estandarización de puntajes

Los resultados de los Capítulos 5 y 6 se combinan para poder discernir cual es el escenario que optimiza ambos análisis. El primer paso es la estandarización de resultados a puntajes comparables, ya que los análisis son grupos de datos diferentes. Las Tablas 7.1 y 7.2 muestran el resumen de los resultados de cada análisis y su transformación a puntajes comparables según la metodología del Capítulo 2.2.4.

Tabla 7.1: Estandarización de los resultados del ACV.

Escenario	Puntos ACV	Estandarización
1	-29,8	-0,570
2	-70,64	0,013
3	-17,8	-0,745
4	-81,96	0,175
5	-141,93	1,035
6	-76,25	0,093

Tabla 7.2: Estandarización de los resultados extraídos de la parte económica del PAJ. Pesos de los subcriterios entre paréntesis.

Escenario	Resultados extraídos			Transformación			Puntaje	Estandarización
	COP (0,491)	LOG (0,297)	INV (0,212)	COP	LOG	INV		
-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	15,5	25,7	30,0	2	3	4	2,72	0,22
2	14,9	25,7	30,0	2	3	4	2,72	0,22
3	34,4	11,3	30,0	4	2	4	3,41	0,52
4	3,8	17,2	3,3	1	2	1	1,30	-0,42
5	6,1	17,2	3,3	1	2	1	1,30	-0,42
6	25,3	2,9	3,3	3	1	1	1,98	-0,11

## 7.2. Comparación multivariable

Con los resultados anteriores se genera el gráfico de la Figura 7.1.

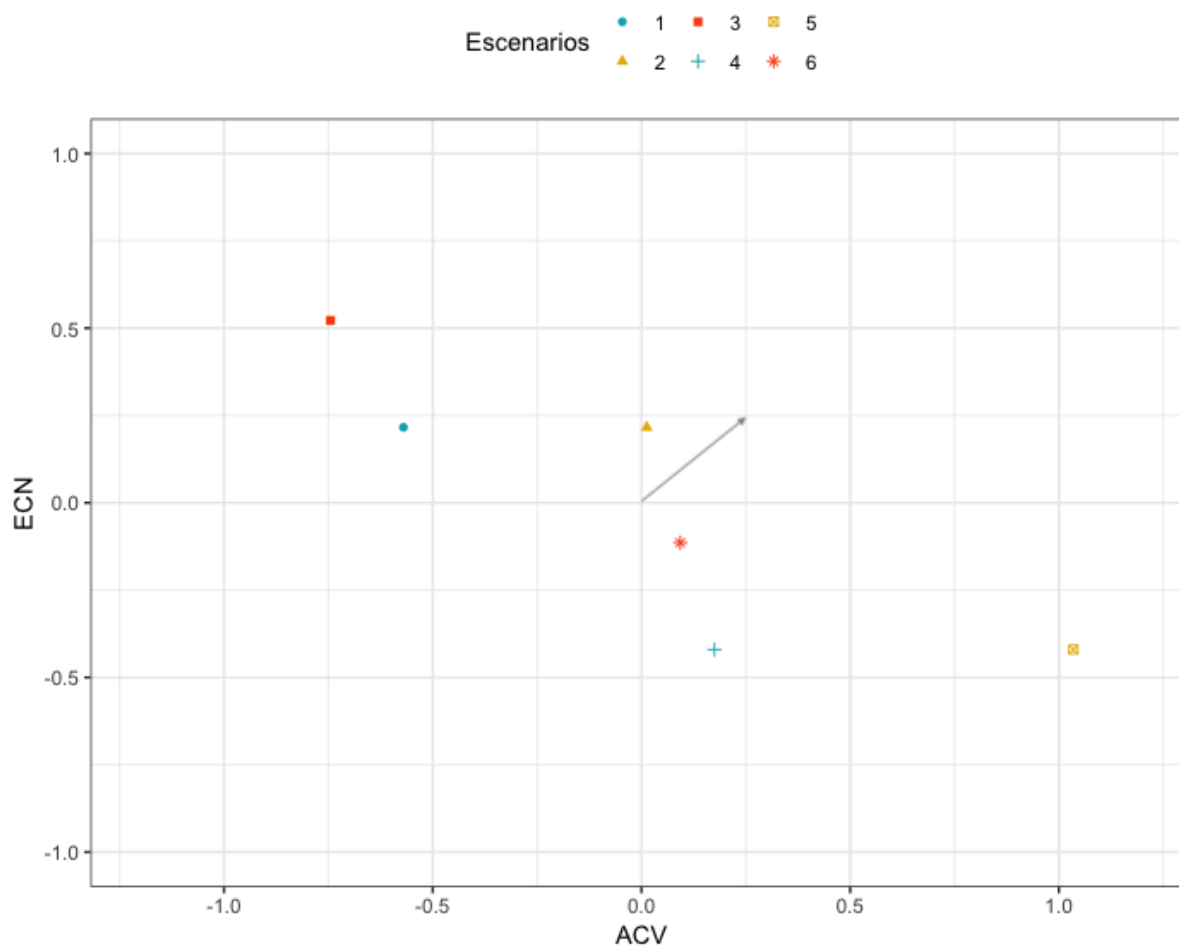


Figura 7.1: Comparación de los datos estandarizados del ACV y la parte económica del PAJ. Con una flecha gris se simboliza la dirección “ideal”.

De la Figura 7.1, se infiere que al combinar los resultados del ACV con la parte económica del PAJ, mientras más económico sea el escenario menos beneficios ambientales posee. Además, se observan dos tipos de tendencia: primero, se produce un comportamiento escalonado, ya que la metodología de transformación de puntajes del PAJ es discretizante (ver Tabla 7.2); y segundo, nuevamente se tienen dos grupos de escenarios: el 1-2-3 y el 4-5-6. Este último comportamiento es una herencia de lo identificado anteriormente en el ACV y PAJ, donde los porcentajes de reducción y valorización dividen el conjunto en subgrupos, y las diferencias de intermediario y procesos correlacionan el orden dentro de cada grupo.

Si se realiza el mismo ejercicio para la parte ambiental del PAJ, surgen los resultados del Anexo E.1. De la Figura E.1 se observa que hay una proporcionalidad directa entre el PAJ ambiental y el ACV, lo que indica que las preferencias de los tomadores de decisiones (aspecto cualitativo) se condicen con la evaluación de impactos ambientales (ACV cuantitativo). También se observan los mismos comportamientos de escalonamiento y agrupación.

Por último, se tiene que el escenario más favorable es el Número 2. Si se comparan los resultados de todos los análisis hechos en este trabajo (ver Tabla 7.3), se tiene que en el PAJ y ACV el mejor escenario es el 5 y no el 2. Esto se debe a que la metodología del trabajo combina los resultados extraídos del criterio económico del PAJ con el ACV, lo que produce un comportamiento similar a las curvas de indiferencia de bienes, en las que cada escenario se encuentra sobre un curva óptima, pero cada curva genera diferente utilidad, siendo la mejor la que se aleja del origen en ambos sentidos positivos. Cabe notar que ambos escenarios, 5 y 2, son los que optimizan bajo ACV y PAJ, por separado, cada grupo de escenarios asociado por nivel de reducción y aumento de valorización, en los cuales el grupo de 5 tiene asociado mayores porcentajes que el grupo de 2 (recordar Tabla 4.6). Es importante mencionar que la metodología elegida es una de las que se pudo haber escogido para realizar una evaluación de un conjunto de escenarios alternativos complejos. Es por esta razón que no ofrece una solución absoluta sobre el problema, sino que sirve para conducir la toma de decisiones teniéndose en cuenta las consideraciones metodológicas específicas que procuran abarcar las diferentes aristas de esta.

Tabla 7.3: Comparación de los resultados de los análisis de los escenarios. En las columnas se ordenan los escenarios según el análisis de la primera fila.

Preferencia	ACV	PAJ	ACV+ECN	ACV+AMB
1°	5	5	2	5
2°	4	6	-	4
3°	6	4	-	6
4°	2	2	-	2
5°	1	3	-	1
6°	3	1	-	3

Para finalizar, se consiguió discernir que, bajo la metodología utilizada, el mejor escenario en términos combinados de ACV y el aspecto económico del PAJ es el Número 2, que coincide con ser el mejor escenario en los análisis ACV y PAJ (por separado) dentro del primer nivel de reducción y aumento de valorización. También se observó que hay una tendencia inversa entre ambos aspectos y una congruencia entre el impacto ambiental cuantitativo y el cualitativo. Se considera que el método general del trabajo abarca las aristas del problema equilibrando los aspectos económicos y ambientales cuantitativos, y con estos resultados se describe la propuesta de gestión de residuos de la FCFM en el siguiente capítulo.

# Capítulo 8

## Propuesta

Se propone que el mejor caso de gestión de residuos sólidos para la Facultad es el Escenario 2. En este régimen de funcionamiento, se reducen en 37 % aproximadamente los residuos generados y se aumenta en 25 % todas las corrientes que pueden ser valorizadas, de las cuales las reciclables (menos el vidrio) se gestionan por medio de la Municipalidad de Santiago. Al tenerse este intermediario, no se tratan los residuos de HDPE y PP, por lo que es de menor nivel de jerarquía. En la Tabla 8.1 se comparan las principales características de este sistema versus el caso base.

Tabla 8.1: Características principales de la propuesta.

Característica	Unidad	Base	Propuesta	Cambio (%)
Flujo compostado	(ton año <sup>-1</sup> )	9,4	13,2	40,4
Flujo reciclado	(ton año <sup>-1</sup> )	21,5	27,9	29,8
Flujo tratado especial	(ton año <sup>-1</sup> )	10,5	10,6	1,0
Flujo a relleno sanitario	(ton año <sup>-1</sup> )	113,6	46,4	-59,2
Flujo total	(ton año <sup>-1</sup> )	155,0	98,1	-36,7
GWP	(kg CO <sub>2</sub> eq.)	9,66·10 <sup>4</sup>	5,31·10 <sup>4</sup>	-45,0
EUT	(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.)	3,38·10 <sup>2</sup>	1,46·10 <sup>2</sup>	-56,9
HTP	(kg CFC-11 eq.)	2,35·10 <sup>4</sup>	1,29·10 <sup>4</sup>	-45,1
ODP	(kg p-DCB eq.)	1,13·10 <sup>-3</sup>	6,29·10 <sup>-4</sup>	-44,3
Costo operacional	(CLP kg <sub>tratado</sub> <sup>-1</sup> )	117	102	-12,8
Costo de inversión	(CLP)	0	18,75·10 <sup>6</sup>	-

La propuesta considera aumentos de flujos tratados por procesos superiores en la jerarquía de residuos y la disminución de la disposición final, lo que produce que sus impactos ambientales sean menores. Esta disminución de impactos muestra una mejora en cuanto a las responsabilidades de las consecuencias del sistema de gestión. En términos económicos, el escenario es más barato de mantener en operación (por kg tratado) en comparación al caso base, pero es necesaria la inversión para poder alcanzarlo.

Si se quiere definir como meta esta propuesta, se establece que la medida de cambio sea la diferencia porcentual per cápita de los flujos reportados, ya que en la generación de

los casos no se consideró el aumento de población de la Facultad en el tiempo. Considerar la normalización por persona permite comparar de manera representativa el cambio entre el estado actual y la meta, ya que la generación depende de la población. Los indicadores de meta fueron transformados usando el tamaño de la comunidad considerado en la caracterización (9000) y se resumen en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Diferencia porcentual entre el escenario propuesto y el actual.

Flujo tratado	Base	Meta	Diferencia
-	(kg año <sup>-1</sup> persona <sup>-1</sup> )	(kg año <sup>-1</sup> persona <sup>-1</sup> )	(%)
Compostaje	1,04	1,47	140
Reciclaje	2,39	3,10	129
Tratamiento especial	1,17	1,18	100
Relleno sanitario	12,62	5,16	41
Total	17,22	10,90	63

Según la información de la Tabla 8.2, la brecha más importante es la de reducción de residuos que terminan en relleno sanitario. Se deben realizar esfuerzos para que la Facultad minimice los residuos en la generación, es decir, evitar que los objetos consumidos o utilizados los produzcan, ya que no hay alguna forma de tratamiento excepto la disposición final, que se encuentra al final de la jerarquía de los residuos. La dificultad principal en este aspecto es que se tienen que tomar medidas de restricción que, para ser efectivas, deben ser a nivel de Facultad, y la OIS no posee esta injerencia. Lo anterior puede ser logrado por medio de conversaciones con las unidades que no se vean bajo la influencia de la OIS o por medio de políticas que puedan ser aplicadas a través de Decanato.

Las siguientes brechas son las de reciclaje y compostaje. Para estos residuos existe infraestructura general de segregación en la Facultad para lograr las metas propuestas, si la población se mantiene en niveles similares (la tendencia muestra que, por lo pronto, se mantendrá (ver Anexo B.2.2, Tabla B.2)). Las cifras de residuos valorizables (27% del total, ver Figura 8.1) indican que en lo que va a relleno sanitario hay una fracción que podría ser segregada como compostado (9,7%) o reciclado (15,8%) en la infraestructura actual. Si la población de la Facultad aumenta el nivel de segregación se aprovecha este parte de este potencial, pero este factor es la principal dificultad de estas categorías, ya que requiere cambios de comportamiento.

Por último, la menor brecha es la de tratamiento especial. Para lograrla, se debe aumentar ligeramente la segregación de residuos de tratamiento especial en la infraestructura adecuada y no en los basureros comunes. Como las brechas anteriores, requiere principalmente de un cambio de comportamiento que de infraestructura, pero por la magnitud del cambio se infiere que los esfuerzos serían menores para lograrla.

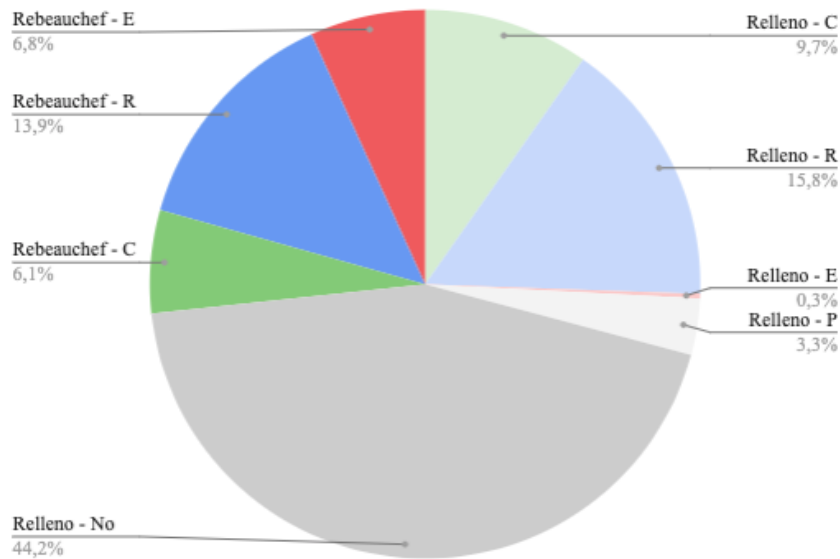


Figura 8.1: Resumen de la situación de gestión de residuos actual y potenciales. Elaborado con los datos de la Tabla 4.3. Rebeauchef: segregado en Rebeauchef; Relleno: destinado a relleno sanitario; C: compostado o compostable; E: tratamiento especial; P: existe valorización en la región pero, no se segrega en Rebeauchef; R: reciclado o reciclable; No: no hay tratamiento, excepto disposición final.

Entonces, para alcanzar las metas de la propuesta, se tendrán que aplicar medidas que se basen en la jerarquía de los residuos, como lo ratifican los resultados de impacto ambiental por ACV y dados los potenciales de reducción y valorización encontrados en la caracterización de la situación actual. Esto se debe concretar mediante una Política de Gestión de Insumos y Residuos que afecte a las unidades de la Facultad desde el nivel de Decanato. Dada la jerarquía, los ejes de acción se pueden definir como:

1. Reducción y reutilización: se aconseja invertir en campañas de educación sobre reducción y reutilización para mejorar estos aspectos desde el lado de la población de la Facultad, y poner en práctica una política de compras verdes o sustentables que permita a la FCFM establecer niveles mínimos que tienen que cumplir los proveedores y licitaciones en cuanto a la gestión de residuos para disminuir las opciones que generan problemas. Por ejemplo, estas políticas pueden ayudar a mejorar los indicadores de reducción al licitar servicios de comida que reduzcan el desperdicio alimenticio y de artículos de un sólo uso, y que promuevan utilización de implementos reutilizables o comida con mínimo empaquetado [54].
2. Reciclaje: se deben realizar campañas de educación sobre el uso y funcionamiento del sistema de reciclaje para fortalecer su utilización por parte de la comunidad. Además, se puede invertir en más infraestructura o planes que faciliten la segregación, ya que como se trata de una conducta habitual, el cambio debe ser facilitado en la mayor medida posible para garantizar que los usuarios incluyan el reciclaje en su vida cotidiana en la Facultad [60], [61], [62], [63]. Ejemplos de medidas que facilitan el reciclaje son la inclusión de mayores puntos intermedios o el uso de contenedores de segregación en

oficinas y salas [64], lo que se ve potenciado con programas de oficinas y departamentos sustentables o verdes que generan participación de las unidades de una institución de educación superior, y no sólo en residuos, si no que en otros temas como la gestión energética [65].

3. Recuperación y disposición final: estas etapas de la jerarquía deben minimizarse fomentando las anteriores, considerando que hay residuos que no desaparecerán, y de utilizarse debe ser con empresas responsables como se ha gestionado en la actualidad.

# Conclusión

La FCFM tiene un sistema de gestión responsable de residuos sólidos desde el 2015. Con una investigación del contexto local de tratamiento de residuos en la Región Metropolitana, el funcionamiento del sistema de gestión y una caracterización de los residuos generados se obtuvo que la Facultad posee un sistema planificado de gestión de residuos que procesa  $155 \text{ ton año}^{-1}$ , de los cuales 27 % se valorizan y, de lo que se va a relleno, el 34 % podría valorizarse. Dado este caso base, se generaron seis escenarios de manejo de residuos que involucran mejoras en cuanto a porcentajes de reducción y valorización, y variaciones de la institución que actúa como intermediario de reciclaje. Los casos fueron evaluados, en primer lugar, por medio de ACV, y en segundo lugar, a través del PAJ. De estas evaluaciones se encontró que los casos más favorecidos cuantitativa y cualitativamente fueron los de mayor reducción y tasa de valorización. Sin embargo, al seguir la metodología de este trabajo, se combinaron ambas evaluaciones, lo que favoreció al Escenario 2, un caso en el cual existen esfuerzos de reducción y valorización cercanos al 50 % (en las corrientes reducibles y valorizables) y se tiene como intermediario a la Municipalidad. Esta elección significa un compromiso entre lo ambiental y lo económico en la que se tienen menores costos y se mejora la situación ambiental dentro del primer grupo de reducción y valorización.

Entonces, la propuesta basada en el Escenario 2 presenta mejoras tanto en aspectos de impacto ambiental como costo de operación, sin embargo involucra inversión. En base a sus características principales se crearon metas normalizadas a la población de la Facultad, para las cuales se propone seguir una estrategia de medidas declaradas en una Política de Gestión de Insumos y Residuos que potencien la reducción, reutilización y reciclaje, y que se alinean con las dificultades asociadas a cada meta.

Se concluye que se logró el objetivo del trabajo de título porque se pudo analizar y diagnosticar el contexto de la gestión de residuos de la Facultad, lo que dio base al análisis y a la estructuración de mejoras en la materia. Esto es fundamental, ya que existe una necesidad de reducir los impactos de las actividades de producción y gestión de residuos en un mundo en el cual la situación apunta a peores escenarios, sobretodo por parte de instituciones que tienen el rol de ser ejemplo de modelo de políticas y poseen el valor de la sustentabilidad en su misión. Además, la herramienta permitió llegar a una solución, que no se previó intuitivamente, gracias a una metodología estructurada que facilita la toma de decisiones para escoger cuál es la alternativa que es atingente a las preferencias de la Facultad. Finalmente, la metodología es replicable y mejorable, principalmente a nivel de los alcances de cada método específico, y puede ser utilizada en futuras instancias para volver a diagnosticar y proponer metas según como cambie el contexto de la Facultad, u otras instituciones que deseen realizar este proceso.





# Bibliografía

- [1] DESMARCHELIER, B., DJELLAL, F. y GALLOUJ, F. 2011. Economic Growth by Waste Generation: the Dynamics of a Vicious Circle [en línea] Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Vol. 652. <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-21108-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21108-9_11)> [consulta: 7 octubre 2019].
- [2] SMITH, V. 2012. Los números que sostienen al Costanera Center [en línea] <<https://cutt.ly/medNtx8>> [consulta: 17 octubre 2019].
- [3] KAZA, S., YAO, L., BHADA-TATA, P. y VAN WOERDEN, F. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, D.C., World Bank Group. 295 p.
- [4] SINIA. 2018. Cuarto Reporte del estado del Medio Ambiente [en línea] <<https://cutt.ly/JeitYGR>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [5] CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Ley 20920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, 1 junio 2016.
- [6] TRIASSI, M., ALFANO, R., ILLARIO, M., NARDONE, A., CARPORALE, O. y MONTUORI, P. 2015. Environmental Pollution from Illegal Waste Disposal and Health Effects: A Review on the “Triangle of Death” [en línea] International Journal of Environmental Research and Public Health Vol. 12, enero <<https://doi.org/10.3390/ijerph120201216>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [7] BANDARA, N. y HETTIARACHCHI, P. 2010. Environmental impacts with waste disposal practices in a suburban municipality in Sri Lanka [en línea] International Journal of Environment and Waste Management Vol. 6, enero <<https://doi.org/10.1504/IJEW.2010.033987>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [8] WINANS, K., KENDALL, A. y DENG, H. 2017. The history and current applications of the circular economy concept [en línea] Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 68, febrero <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [9] ARMIJO DE VEGA, C., OJEDA, S. y RAMÍREZ, M. 2008. Solid waste characterization and recycling potential for a university campus [en línea] Waste Management Vol

- 28, enero <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.022>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [10] GHAZVINEI, P., MIR, M., DARVISHI, H., y ARIFFIN, J. 2017. University campus solid waste management: combining life cycle assessment and analytical hierarchy process. Berlin/Heidelberg, Springer. 114 p.
- [11] LABRAÑA, J. y RODRÍGUEZ, J. 2017. Estado y universidad en Chile: problemas de distinción en torno a su función pública. Pensamiento Educativo, Revista de Investigación Educativa Latinoamericana 54(1): 1-19.
- [12] CHILE. Ministerio de Educación. 2007. Fija texto refundido, coordinado y sistematizado del Decreto con Fuerza de Ley N°153, de 1981, que establece los estatutos de la Universidad de Chile, 2 octubre 2007. 20 p.
- [13] STEPHENS, J., HERNANDEZ, E., ROMÁN, M., GRAHAM, A. y SCHOLZ, R. 2008. Higher education as a change agent for sustainability in different cultures and contexts [en línea] International Journal of Sustainability in Higher Education Vol. 9, julio <<https://doi.org/10.1108/14676370810885916>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [14] HARVARD UNIVERSITY. 2016. What does Zero Waste mean? [en línea] <<https://cutt.ly/teitSJc>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [15] ARANGO, J. 2018. Plan de manejo de residuos solidos PUCP 2016-2020 [en línea] <<https://cutt.ly/Deit0Kk>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [16] OIS. 2018. Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad [en línea] <<https://cutt.ly/7eitFcY>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [17] FCFM. 2017. FCFM cumplió al 100% “Acuerdo de Producción Limpia Campus Sustentable” [en línea] <<https://cutt.ly/KeitJTG>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [18] YU, H., SOLVANG, W. y LI, S. 2015. Optimization of long-term performance of municipal solid waste management system: A bi-objective mathematical model. International Journal of Energy and Environment (IJEE) 6: 153-164.
- [19] CONTRERAS, F., HANAKI, K., ARAMAKI, T. y CONNORS, S. 2008. Application of analytical hierarchy process to analyze stakeholder preferences for municipal solid waste management plans, Boston, USA. Resources, Conservation and Recycling 52: 979-991.
- [20] SAKURAI, K. 2000. CEPIS/OPS-HDT 17: Método sencillo del análisis de residuos sólidos [en línea] <<https://cutt.ly/0eitK3U>> [consulta: 23 enero 2019].
- [21] TURNER, D., WILLIAMS, I. y KEMP, S. 2016. Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making [en línea] Journal of Cleaner Production Vol. 129, agosto <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.077>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [22] ISO. 2006. ISO14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment -

Requirements and guidelines [en línea] <<https://cutt.ly/keitLUe>>[consulta: 7 octubre 2019].

- [23] SOLTANI, A., HEWAGE, K., REZA, B. y SADIG, R. 2015. Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review [en línea] Waste Management Vol. 35, enero <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.010>>[consulta: 7 octubre 2019].
- [24] SAATY, T. 1990. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research 48: 9-26.
- [25] HUANG, C. y MA, H. 2004. A multidimensional environmental evaluation of packaging materials. Science of the Total Environment 324(1): 161-172.
- [26] MUSTAFA, M. y KU AZIR, K. 2017. Smart Bin: Internet-of-Things Garbage Monitoring System. MATEC Web of Conferences 140(4): 01030.
- [27] THE UNIVERSITY OF MANCHESTER. s.f. Furniture disposal and re-use/recycling [en línea] <<https://cutt.ly/Ve5mNGv>>[consulta: 23 octubre 2019].
- [28] GOODSHIP, V. 2007. Plastic recycling. Science Progress 90(4): 245–268.
- [29] DOMINIK, D., CHOW, J. y STREIT, W. 2019. Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. Applied and Environmental Technology Vol. 85, septiembre <<https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>>[consulta: 23 octubre 2019].
- [30] WRIGHT, S., JAHANSHAH, S., JORGENSEN, F. y BRENNAN, D. 2002. Is Metal Recycling Sustainable?. En: GREEN PROCESSING 2002 - Proceedings: International Conference on the Sustainable Processing of Minerals.
- [31] BHATTACHARJEE, D. y DIKABAR, I. 2014. Development of a paper recycling process. En: PROCEEDINGS OF the 15th Annual Paper Meet. Dhaka, Bangladesh, The Institution of Engineers.
- [32] CENTRAL PULP & RESEARCH INSTITUTE. [2015] Repulpability and Paper Making Potential of Used Tetra Pak Carton (UTPC) in Comparison to Indian & American OCC. [reporte]. 1 documento formato pdf; texto en inglés. 17 p.
- [33] CTCN. (s.f). Glass recycling [en línea] <<https://cutt.ly/Qe5RBCJ>>[consulta: 23 octubre 2019].
- [34] POLPRASERT, C. y KOOTTAPET, T. 2017. Organic Waste Recycling: Technology, Management and Sustainability. 4ªEd. London, IWA Publishing. 576 p.
- [35] LUCIER, C. y GAREAU, B. 2019. Electronic Waste Recycling and Disposal: An Overview. En: Assessment and management of radioactive and electronic wastes. London, IntechOpen.

- [36] PANADARE, D. y RATHOD, V. 2015. Applications of Waste Cooking Oil Other Than Biodiesel: A Review. Iranian Journal of Chemical Engineering 12(3): 55-76.
- [37] MYHREL, M., SAIWARI,S., DIERKES, W. y NOORDERMEER, J. 2012. Rubber Recycling: Chemistry, Processing, and Applications. Rubber Chemistry and Technology 85(3): 408-449.
- [38] TANONG, K., BLAIS, J. y MERCIER, G. 2014. Metal Recycling Technologies for Battery Waste. Recent Patents on Engineering 8: 13-23.
- [39] HIRAMATSU, Y., TSUNETSUGU, Y., KARUBE, M., TONOSAKI, M. y FUJII, T. 2002. Present State of Wood Waste Recycling and a New Process for Converting Wood Waste into Reusable Wood Materials. Materials Transactions 43(3): 332-339.
- [40] LE, K. y STORRY, K. [2018] Textile Recycling Technologies, Colouring and Finishing Methods. [reporte de investigación] 1 reporte; texto en inglés. 50 p.
- [41] ESCOBAR, J., CONCEICAO, J., GRILLO, M., CORREA, J., CARVALHO, M., MARTÍNEZ, A. Y RÚA, D. 2018. Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery En: Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends. London, IntechOpen.
- [42] MMA SEREMI RM [2012] Guía y Valorización de Residuos Sólidos en la Región Metropolitana. [informe] Santiago. 1 informe; texto en español. 40 p.
- [43] SUBDERE RM [2018] Diagnóstico de la Situación por Comuna y por Región en Materia de RSD y Asimilables. [informe] 1 informe; texto en español. 56 p.
- [44] MMA SEREMI RM [2017] Estrategia Regional de Residuos Sólidos Región Metropolitana 2017 - 2021. [documento] 1 documento; texto en español. 112 p.
- [45] KDM. 2012. Proyectos [en línea] <<https://cutt.ly/ceMPmjv>> [consulta: 17 octubre 2019].
- [46] GARRIDO, P. 2019. Cifras Rebeauchef [en línea] <<https://cutt.ly/iedMATm>> [consulta: 17 octubre 2019].
- [47] CHILE. Ministerio de Salud. 2004. Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, 16 junio 2004. 50 p.
- [48] CASTILLO, L. y LUZARDO, M. 2013. Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC 22(34): 77-84.
- [49] HARVARD UNIVERSITY. [2016] Recycling and Waste Generation Metrics and Milestones. [tabla]. 1 documento formato pdf; texto en inglés. 1 p.
- [50] RUIZ, M. 2012. Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México. Revista internacional de contaminación ambiental. 28(1): 93-97.

- [51] ADENIRAN, A., NUBI, A. y ADELOPO, A. 2017. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for sustainable waste management. *Waste Management* 67: 3-10.
- [52] BANDARA, N., HETTIARATCHI, J., WIRASINGHE, S. y PILAPIIYA, S. 2007. Relation of waste generation and composition to socio-economic factors: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 135(1-3): 31-39.
- [53] CONAMA. [2010] Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile. [reporte] 1 documento formato pdf; texto en español. 64 p.
- [54] EUROPEAN COMMISSION. 2016. *Buying Green: A handbook on green public procurement*. 3ª Ed. Lëtzebuerg, Publications Office of the European Union. 80 p.
- [55] ACERO, A., RODRÍGUEZ, C. y CIROTH, A. [2016] LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. [documento] 1 documento; texto en inglés. 23 p.
- [56] SALA, S., CRENNNA, E., SECCHI, M. y PANT, R. [2017] Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment. [reporte técnico] 1 reporte técnico; texto en inglés. 18 p.
- [57] PIZZOL, M., LAURENT, A., SALA, S., WEIDMA, B., VERONES, F., y KOFFLER, C. 2016. Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22(6): 853–866.
- [58] WILLIS, K., MAUREAUD, C., WILCOX, C., y HARDESTY, B. 2017. How successful are waste abatement campaigns and government policies at reducing plastic waste into the marine environment? *Marine Policy* 96: 243-249.
- [59] AGUILAR, S., ELMENHORST, A. y GÓMEZ, D. [2012] Manual de estimación de costos para la gestión municipal de residuos sólidos. [manual] 1 manual; texto en español. 37 p.
- [60] WOOD, W., QUINN, J. y KASHY, D. 2002. Habits in everyday life: Thought, emotion, and action. *Journal of Personality and Social Psychology* 83(6): 1281–1297.
- [61] NEAL, D., WOOD, W., WU, M. y KURLANDER, D. 2011. The pull of the past: When do habits persist despite conflict with motives? *Personality and Social Psychology Bulletin* 37(11): 1428-1437.
- [62] PRIVITERA, G. y ZURAIKAT, F. 2014. Proximity of foods in a competitive food environment influences consumption of a low calorie and a high calorie food. *Appetite* 76: 175–9.
- [63] JUDAH, G., GARDNER, B. y AUGER, R. 2012. Forming a flossing habit: An exploratory study of the psychological determinants of habit formation. *British journal of health psychology* 18(2): 338-353.
- [64] THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND. 2019. Office recycling program [en línea]

- <<https://cutt.ly/Prybdbh>> [consulta: 1 octubre 2020].
- [65] BOSTON UNIVERSITY SUSTAINABILITY. 2019. Green Office Certification [en línea] <<https://cutt.ly/mrybhxo>> [consulta: 1 octubre 2020].
- [66] EDELEN, A. y INGWERSEN, W. [2016] Guidance on data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data. [guía] 1 guía; texto en inglés. 37 p.
- [67] ROJAS, C. Euro 5: la norma de emisiones para vehículos que empieza este año y que posiciona a Chile como líder en Latinoamérica. 2013. [en línea] <<https://cutt.ly/BrqGnLB>> [consulta: 7 octubre 2019].
- [68] KDM ENERGÍA S.A. [2011] Biogás: un combustible sustentable. [presentación] 1 presentación; texto en español. 29 p.

# Apéndice A

## Nomenclatura

### A.1. Unidades

d	Día.
kg	Kilogramo.
km	Kilometro.
kW·h	Kilovatio hora.
L	Litro.
m	Metro.
ton	Tonelada.

### A.2. Nombres químicos

CFC-11	Triclorofluorometano.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono.
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> ; polietileno de alta densidad.
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i> ; polietileno de baja densidad.
p-DCB	Para-diclorobenceno.
PE	Polietileno.
PET	Polietilentereftalato.
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ión fosfato.
PP	Polipropileno.
PS	Poliestireno.
PU	Poliuretano.
PVC	Policloruro de vinilo.



### A.3. Siglas

ACV	Análisis de Ciclo de Vida.
AAD	Análisis de Agrupamiento de Datos.
AMB	Criterio Ambiental del PAJ.
CLP	Código ISO 4217 para el peso chileno.
COP	Subcriterio de Costo operacional del PAJ.
DQI	<i>Data Quality Index</i> ; índice de calidad de datos del ACV.
ECN	Criterio Económico del PAJ.
EEI	Subcriterio de Emisiones de efecto invernadero del PAJ.
EOE	Subcriterio de Emisiones sin efecto invernadero y contaminantes con otros efectos del PAJ.
EUT	Eutrofización.
GWP	<i>Global Warming Power</i> ; potencial de calentamiento global.
HTP	<i>Human Toxicity Potential</i> ; potencial de toxicidad humana.
INV	Subcriterio de Costo de inversión del PAJ.
LOG	Subcriterio de Dificultades logísticas del PAJ.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i> ; potencial de agotamiento de la capa de ozono.
PAJ	Proceso de Análisis Jerárquico.

# Apéndice B

## Escenario actual de gestión de residuos

### B.1. Gestión de residuos sólidos en la FCFM



Figura B.1: Mapa de la infraestructura de Beauchef (elaborado por la OIS).

## B.2. Caracterización de residuos

### B.2.1. Categorización de residuos utilizada

A continuación, se describen las categorías y corrientes específicas de residuos. Las primeras se presentan como puntos principales de la lista, y las segundas como guiones subordinados.

- Residuos domiciliarios
  - Alimentos: residuos alimentarios no compostables como los de origen animal o los alimentos procesados.
  - Compostables: residuos alimentarios compostables como cuecos, cáscaras, frutas o verduras podridas, etc.
  - Poda y jardín: residuos provenientes de las actividades de poda y jardín como ramas, hojas, flores, etc.
  - Madera: residuos de madera como utilería para comer, revolvedores de bebidas, etc.
  - Textiles: residuos de material textil como piezas de ropa, traperos, etc.
  - Suciedad y ceniza: todo residuo fino como el polvo, tierra, etc.
- Papeles
  - Rechazo: papeles sucios y de tipo *tissue*, limpios y sucios.
  - Diarios: papeles de diario.
  - Revistas: papeles tipo revista.
  - Blanco: papeles blancos.
  - Kraft: papeles de tipo kraft.
  - Otros: otros tipos de papeles como las boletas y recibos, papel de color, etc.
- Cartones
  - Sucio: cartones sucios con residuos orgánicos.
  - Corrugado: cartón de tipo corrugado.
  - Pulpa moldeada: cartón moldeado como el de los embalajes o cajas de huevo.
  - Liso y cartulina: cartón de tipo liso y cartulinas.
  - Dúplex: cartón de tipo dúplex como el de las cajas de cereales y remedios.
- Plásticos
  - 1/PET botella: botellas de polietilenotereftálato.
  - 1/PET envase: envases tipo *clamshell*, algunos vasos plásticos, algunas tapas de envases, etc.
  - 2/HDPE: residuos de polietileno de alta densidad como envases de leche y jugo, *packaging*, botellas de champú, baldes, etc.
  - 3/PVC: residuos de policloruro de vinilo como tuberías, algunas mangueras, etc.
  - 4/LDPE: residuos de polietileno de baja densidad como bolsas.
  - 5/PP rígido: residuos de polipropileno rígido como bombillas, tapas de bebida, algunos vasos plásticos y contenedores, algunos envases de cosméticos, etc.

- 5/PP blando: residuos de polipropileno como envases de alimentos, snacks, bolsas de cereales, etc.
- 6/PS: residuos de poliestireno como envases de yogur, cubiertos de plástico, bandejas de comida, envases de alimentos congelados, tapas de café, plumavit, etc.
- 7/Otros: otros plásticos como adhesivos, elementos moldeados, espumas, rellenos, etc.
- Envases
  - Tetra Pak: envases de Tetra Pak.
- Celulosas sanitarias
  - Pañales: pañales de protección para todas las edades.
  - Higiene menstrual: residuos compuestos con celulosa que se utilizan en higiene menstrual como tampones, toallas higiénicas, etc.
- Gomas y cueros
  - Gomas: residuos de tipo goma como elásticos, gomas, caucho, etc.
  - Cueros: residuos de cuero como guantes, retazos, etc.
- Vidrios
  - Transparente o blanco: residuos de vidrio como botellas y frascos transparentes o blancos.
  - Café: residuos de vidrio como botellas y frascos café.
  - Verde: residuos de vidrio como botellas y frascos verde.
  - Otros: residuos de vidrio que no sean botellas ni frascos como vidrio roto, elementos de laboratorio no peligrosos, etc.
- Metales
  - Hojalata: residuos de hojalata como tarros de conserva.
  - Aluminio: residuos de aluminio que no son latas de bebida como bandejas de almuerzo, *foil*, etc.
  - Latas: latas de bebida, jugos, etc.
  - Otros: residuos metálicos como chatarra, tapas, clips, etc.
- Residuos especiales
  - Aerosoles y químicos: residuos de aerosol y químicos como latas de aerosol, insecticidas, pesticidas, pintura, solventes, barniz, aceites de motor, limpieza, etc.
  - Baterías y pilas: de autos, celulares, computadores, pilas, etc.
  - Eléctricos y electrónicos: residuos como tubos fluorescentes, electrodomésticos, placas de circuito, etc.
  - Laboratorio y biológicos: residuos de laboratorio y peligro biológico como guantes, mascarillas, jeringas, tubos de ensayo, placas, tejidos, equipo de laboratorio en general, etc.
  - Personales: residuos de origen personal como tinturas de pelo, cosméticos, tiras de remedios, tiras reactivas, etc.
  - Impresión y tinta: residuos como *toners* y *cartridges*, plumones, lápices pasta, etc.

- Aceite: aceite vegetal usado.
- Otros
  - Huesos.
  - Cuescos.
  - Cerámicas: como platos, loza, baldosas, etc.
  - Escombros: residuos de escombros de cualquier tipo.
  - Otros: cualquier objeto que no corresponda a ninguna de las categorías y corrientes anteriores.

## B.2.2. Discusiones sobre las consideraciones metodológicas

### Metodología de extrapolación de datos

Con los datos obtenidos de cada muestreo se obtuvo el comportamiento de las semanas académicas 10, 15 y 17 del primer semestre y las semanas 1, 5 y 10 del segundo semestre. Con esta información, se generaron dos regímenes de producción, uno alto (promedio de todas las semanas menos la 17) llamado Promedio Normal y uno bajo (representada por la semana 17, periodo de exámenes) llamado Semana 17. Luego, se determinó el comportamiento de cada semana del año en base a ponderaciones de estos dos regímenes de producción, por ejemplo una semana de febrero equivale a 0,1 Semana 17 debido a que casi no hay personas en la Facultad, pero por otra parte las semanas académicas de la 1 a la 15 equivalen a un Promedio Normal por ser semanas de clases normales. Estas ponderaciones se tomaron bajo juicio subjetivo del autor, quien ha observado el flujo de gente durante el año y supone que la producción de residuos es proporcional a las personas presentes [52]. Las decisiones tomadas resultan en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Resumen del comportamiento del año según contexto, en equivalentes de Semana 17 y Promedio Normal.

Año	Normal	Con contingencia
Suma Semana 17	15,5	17,2
Suma Promedio Normal	31,5	26,5
Total	47,0	43,7

Como se puede observar en la Tabla B.1, el año normal se compone de 15,5 Semanas 17 y 31,5 Promedios Normales, dando en total 47 semanas equivalentes de producción de residuos anuales. Estas cantidades cambiarían si en vez de, por ejemplo, haber considerado 0,1 Semanas 17 para una semana de febrero, se hubieran considerado 0,2. Por lo tanto, la asignación de los comportamientos de las semanas hacen que el resultado de producción total se vuelva sensible.

Lo anterior es un problema si se determina que el juicio de quien decide estas ponderaciones no se acerca a la realidad. Como el autor ha estado presente en la Facultad durante todo el año y ha observado el flujo de gente, se determina que su criterio es razonable, y dada la información disponible, la aproximación de los datos extrapolados por este método se estima

cercana a la realidad. En futuras instancias, dada una mayor disponibilidad de información, se podrá afinar mejor este cálculo.

Por último, se tiene que si se aplica la metodología más común (un día o semana de muestra), los resultados cambian, ya que se tomaría la producción en régimen alto y se extrapolaría directamente al año (si se tienen datos de una semana, se multiplican por 52 para obtener el año). Realizando esto, la diferencia es de 23,6 ton año<sup>-1</sup> (aproximación hecha: 113,6 ton año<sup>-1</sup>, aproximación en régimen alto: 137,2 ton año<sup>-1</sup>). Por lo que la metodología que se usa en este trabajo da cifras inferiores pero en el orden de magnitud de las otras, sin embargo, se tiene que el especificar los comportamientos de cada semana permite detallar de mejor manera la producción, lo que no sobrestima el resultado como lo hace el asumir que todo el año genera a máxima capacidad.

### **Población flotante**

La población flotante es un parámetro que se toma en base a la cantidad de miembros de la institución, en vez de considerar el número de personas que usan las instalaciones durante un día. Esto se debe a que no hay condiciones tecnológicas que permitan registrar el número de personas que ingresan a diario. Por este motivo, el indicador PPC presenta sensibilidad dado a que se tiene que decidir la cantidad de personas de manera arbitraria.

En este trabajo se escogió la cifra de 9000 integrantes por ser el promedio (cerrado a la unidad de mil) de los integrantes contratados a honorarios y el resto de la comunidad (ver Tabla B.2), ya que los contratos a honorarios no poseen horario fijo de asistencia a la Facultad. En la realidad, es probable que el número de personas que utiliza la Facultad y genera residuos no sea igual a la capacidad completa de sus integrantes, y sea menor. Esto produce que si la población flotante real fuera la mitad, el indicador PPC aumentaría al doble debido a la proporcionalidad inversa entre ambos.

Tabla B.2: Integrantes de la Facultad según tipo.

Año	2019	2018	2017	2016
Contrata	1023	1258	1167	1047
Honorarios	2413	4754	4901	4665
Académicos	459	464	469	466
Postgrado	1165	1289	1459	1339
Pregrado	5463	5715	5483	5148
Total	10523	13480	13479	12665
Total sin honorarios	8110	8726	8578	8000
Promedio	9317	11103	11029	10333

Por lo anterior, el indicador calculado será un mínimo de intensidad de generación y se determina que la decisión de fijar la población flotante en 9000 se justifica dado que se realiza en otras instancias un procedimiento similar [50].

### **Superficie considerada**

El área utilizada es un dato medible con una precisión razonable por medio de Google

Earth. Esto le confiere estabilidad a la cifra y permite realizar una estimación de PPA.

### Cantidades de residuos valorizados en el año

La estimación de los materiales reciclados se hace en base a una predicción de datos con 335 días de información de Rebeauchef de un total de 365. Esto permite una aproximación cercana a la realidad de la de la Facultad.

### Supuesto de normalidad en el comportamiento del año

Se trabajaron los datos dado el supuesto de que el año tuvo un régimen normal y no uno en el que hubo estallido social el 18 de octubre. El periodo consecuente al estallido comprende varias semanas con menor asistencia y producción de residuos (reflejado en la Tabla B.1), por lo que decidir no incluir este fenómeno implica una sobrestimación de las cifras del 2019. Dado el alcance del trabajo de poder servir como insumo para fijar metas de gestión, esta consideración es legítima ya que la contingencia fue un comportamiento puntual del régimen normal, la cual podría sesgar la línea base resultante sobre la cual se podrían plantear metas.

### B.2.3. Comparación entre parámetros característicos de diferentes instituciones

Tabla B.3: Comparación entre los parámetros característicos de diferentes instituciones de educación superior.

Institución	Año	País	Producción (ton año <sup>-1</sup> )	Población (10 <sup>3</sup> persona)	Superficie (ha)
-	-	-			
IBERO [50]	2009	México	1205	10,0	19,4
UPBB [48]	2013	Colombia	149	6,3	9,8
UABC Mexicali [9]	2008	México	365	25,0	35,0
UNILAG [51]	2016	Nigeria	11753	550,0	324,6
FCFM	2019	Chile	148	9,0	4,2
Harvard [49]	2016	EEUU	3300	36,3	8,5

Tabla B.4: Comparación entre los parámetros característicos de diferentes instituciones de educación superior (continuación).

Institución	Densidad población (10 <sup>3</sup> persona ha <sup>-1</sup> )	PPC (kg d <sup>-1</sup> persona <sup>-1</sup> )	PPA (kg d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
IBERO [50]	0,51	0,330	0,017
UPBB [48]	0,65	0,052	0,004
UABC Mexicali [9]	0,71	0,040	0,003
UNILAG [51]	1,69	0,059	0,010
FCFM	2,16	0,047	0,010
Harvard [49]	4,26	0,249	0,106

Con los datos de las Tablas B.3 y B.4 se construye un *scatterplot* (ver Figura B.2). De la figura no se observan correlaciones obvias entre las variables. Por este motivo, se determina

que de estos aspectos cuantitativos no se puede extraer información de relación entre las instituciones.

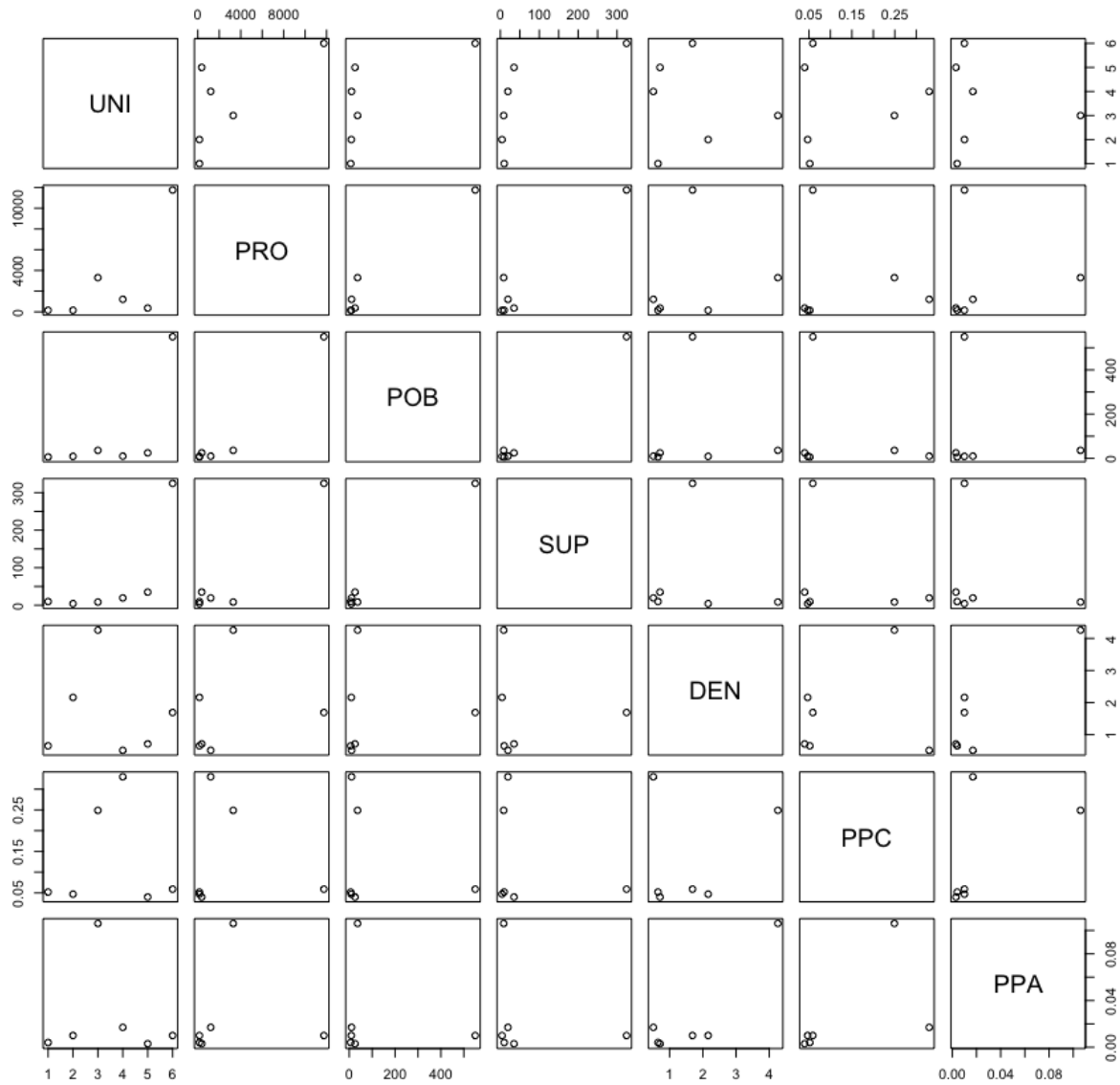


Figura B.2: *Scatterplot* de los parámetros de las Tablas B.3 y B.4. Variables en las unidades de medida de las tablas originales. UNI: Universidad; PRO: Producción; POB: Población; SUP: Superficie; DEN: Densidad de población.



## B.2.4. Tablas complementarias de los resultados obtenidos

Tabla B.5: Distribución de la composición del flujo diario de generación de residuos según categorías y corrientes específicas.

Categoría	Componente	% masa		% volumen	
Residuos domiciliarios	Alimentos	17,2		2,8	
	Compostables	12,3		1,8	
	Poda y jardín	1,0	35,1	0,7	7,5
	Madera	0,6		0,8	
	Textiles	1,3		0,6	
	Suciedad y cenizas	2,6		0,7	
Papel	Rechazo	25,2		22,8	
	Diario	0,3		0,3	
	Revista	0,4	30,6	0,2	30,2
	Blanco	3,5		5,1	
	Kraft	0,3		0,9	
	Otros	0,9		1,0	
Cartón	Sucio	5,6		8,3	
	Corrugado	1,9		2,5	
	Pulpa moldeada	0,0	9,5	0,1	13,6
	Liso y cartulina	1,2		1,4	
	Dúplex	0,8		1,3	
Plástico	1/PET botella	3,3		5,5	
	1/PET envase	2,1		4,4	
	2/HDPE	0,4		1,0	
	3/PVC	0,2		0,1	
	4/LDPE	4,0	15,0	13,7	36,1
	5/PP rígido	0,8		1,6	
	5/PP blando	1,2		3,5	
	6/PS	2,1		4,4	
	7/Otros	0,9		1,8	
Envases	Tetra Pak	2,2	2,2	3,3	3,3
Celulosas sanitarias	Pañales	0,0	0,4	0,0	0,7
	Higiene menstrual	0,4		0,7	
Gomas y cueros	Gomas	0,1	0,1	0,1	0,1
	Cueros	0,0		0,0	
Vidrios	Transparente o blanco	1,3		0,4	
	Café	0,0	2,0	0,0	0,7
	Verde	0,5		0,2	
	Otros	0,1		0,0	
Metales	Hojalata	0,2		0,3	
	Aluminio	1,2	2,5	2,5	5,6
	Latas	0,9		2,6	
	Otros	0,3		0,2	

Residuos especiales	Aerosoles y químicos	0,1		0,1	
	Baterías y pilas	0,0		0,0	
	Eléctricos y electrodomésticos	0,1		0,1	
	Laboratorio y biológicos	0,7	1,5	0,8	1,5
	Personales	0,4		0,4	
	Impresión y tinta	0,3		0,2	
	Aceite	0,0		0,0	
Otros	Huesos	0,4		0,2	
	Cuescos	0,1		0,1	
	Cerámicas	0,2	1,2	0,0	0,6
	Escombros	0,2		0,1	
	Otros	0,3		0,3	

Tabla B.6: Detalle, por categoría, de las fracciones másicas de residuos valorizados.

Categoría	A Relleno	A Rebeauchef	Valorizado
Unidad	(ton año <sup>-1</sup> )	(ton año <sup>-1</sup> )	(%)
Residuos domiciliarios	39,9	9,4	19,1
Papel	34,7	8,8	20,2
Cartón	10,8	6,0	35,8
Plástico	17,0	1,8	9,5
Envases	2,5	0,6	20,5
Celulosas sanitarias	0,5	0,0	0,0
Gomas y cueros	0,1	0,0	0,0
Vidrios	2,2	3,1	58,3
Metales	2,9	1,1	28,3
Residuos especiales	1,7	10,5	86,1
Otros	1,4	0,0	0,0

Tabla B.7: Detalle, por corrientes, de las fracciones másicas de residuos valorizados y su potencial de valorización. Leyenda de la columna Potencial: No: no hay valorización para el residuo; Potencial: la gestión del residuo no se lleva a cabo en Rebeauchef pero existe contexto local para agregarla; Rebeauchef: se puede valorizar el residuo en Rebeauchef.

Componente Unidad	Potencial -	A Relleno (ton año <sup>-1</sup> )	A Rebeauchef (ton año <sup>-1</sup> )	Valorizado (%)
Alimentos	No	19,6	0,0	0,0
Compostables	ReBeauchef	14,0	7,3	34,5
Poda y jardín	ReBeauchef	1,1	2,1	65,1
Madera	No	0,7	0,0	0,0
Textiles	No	1,5	0,0	0,0
Suciedad y cenizas	No	3,0	0,0	0,0
Rechazo	No	28,7	0,0	0,0
Diario	ReBeauchef	0,3	0,0	0,0
Revista	ReBeauchef	0,4	1,7	79,9
Blanco	ReBeauchef	3,9	7,1	64,2
Kraft	ReBeauchef	0,3	0,0	0,0
Otros	Potencial	1,1	0,0	0,0
Sucio	No	6,3	0,0	0,0
Corrugado	ReBeauchef	2,1	4,1	65,6
Pulpa moldeada	ReBeauchef	0,0	0,0	0,0
Liso y cartulina	ReBeauchef	1,4	0,0	0,0
Dúplex	ReBeauchef	0,9	1,9	68,1
1/PET botella	ReBeauchef	3,7	1,3	26,0
1/PET envase	Potencial	2,4	0,0	0,0
2/HDPE	Potencial	0,5	0,0	0,0
3/PVC	No	0,2	0,0	0,0
4/LDPE	ReBeauchef	4,6	0,5	9,8
5/PP rígido	Potencial	0,9	0,0	0,0
5/PP blando	No	1,3	0,0	0,0
6/PS	No	2,4	0,0	0,0
7/Otros	No	1,1	0,0	0,0
Tetra Pak	ReBeauchef	2,5	0,6	20,5
Pañales	No	0,0	0,0	-
Higiene menstrual	No	0,5	0,0	0,0
Gomas	No	0,1	0,0	0,0
Cueros	No	0,0	0,0	-
Transparente o blanco	ReBeauchef	1,5	1,0	41,0
Café	ReBeauchef	0,0	1,0	100,0
Verde	ReBeauchef	0,6	1,0	64,2
Otros	ReBeauchef	0,2	0,0	0,0
Hojalata	ReBeauchef	0,2	0,2	53,5
Aluminio	No	1,4	0,0	0,0
Latas	ReBeauchef	1,0	0,9	47,4
Otros	Potencial	0,3	0,0	0,0

Aerosoles y químicos	No	0,1	0,0	0,0
Baterías y pilas	ReBeauchef	0,0	1,2	99,0
Eléctricos y electrodomésticos	ReBeauchef	0,1	8,7	98,7
Laboratorio y biológicos	No	0,8	0,0	0,0
Personales	No	0,5	0,0	0,0
Impresión y tinta	ReBeauchef	0,3	0,3	53,6
Aceite	ReBeauchef	0,0	0,3	100,0
Huesos	No	0,5	0,0	0,0
Cuescos	ReBeauchef	0,1	0,0	0,0
Cerámicas	No	0,2	0,0	0,0
Escombros	No	0,2	0,0	0,0
Otros	No	0,4	0,0	0,0

# Apéndice C

## Análisis de Ciclo de Vida

### C.1. Alcance específico de los escenarios

En las Tablas C.1, C.2, C.3 y C.4 se detalla el alcance de cada escenario. En ellas se describe el inicio y el fin considerado para cada corriente tratada.

Tabla C.1: Alcance específico del caso base. Cadena 1 y 2 se refieren a etapas en la cadena de tratamiento. S: Sala de basura; R: Acopio Rebeauchef. DF: Disposición Final; Recup: Recuperación; Reut: Reutilización; Rec: Reciclaje total; Pre-rec: Pre-reciclaje; Comp: Compostaje.

Corriente	Material	Acopio	Cadena 1	Cadena 2	Tratamiento
Desechos	Residuos	S	Muni. Stgo.	KDM	DF y Recup.
Botellas	PET	R	HOPE	ReciPET	Rec.
Bolsas	LDPE	R	HOPE	Donación	-
Latas	Aluminio	R	HOPE	Comercial HUAL	Pre-rec.
Latas	Hojalata	R	HOPE	RECICLAMETAL	Pre-rec.
Tetra Pak	Tetra Pak	R	HOPE	Recupac	Pre-rec.
Cartones	Cartón	R	HOPE	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Papeles	Papel	R	HOPE	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Vidrios	Vidrio	R	Crist. Toro	-	Pre-rec.
Orgánicos	Orgánico	R	Muni. Stgo.	CEA	Comp.
Pilas y baterías	Peligroso	R	Muni. Stgo.	Hidronor	DF
Tubos luminiscentes	Peligroso	R	Especialista	Hidronor	DF
Impresión	Peligroso	R	NGS	Hidronor	DF y Reut.
Electrónicos	Electrónico	R	Chilenter	-	Pre-rec.
Aceite	Otro	R	Bioils	-	Pre-rec.

Tabla C.2: Alcance específico de los casos 1 y 4. Cadena 1 y 2 se refieren a etapas en la cadena de tratamiento. S: Sala de basura; R: Acopio Rebeauchef. DF: Disposición Final; Recup: Recuperación; Reut: Reutilización; Rec: Reciclaje total; Pre-rec: Pre-reciclaje; Comp: Compostaje.

Corriente	Material	Acopio	Cadena 1	Cadena 2	Tratamiento
Desechos	Residuos	S	Muni. Stgo.	KDM	DF y Recup.
Botellas	PET	R	HOPE	ReciPET	Rec.
Bolsas	LDPE	R	HOPE	Donación	-
Plásticos	HDPE	R	HOPE	Timberecco	Rec.
Plásticos	PP rígido	R	HOPE	Timberecco	Rec.
Latas	Aluminio	R	HOPE	Comercial HUAL	Pre-rec.
Latas	Hojalata	R	HOPE	RECICLAMETAL	Pre-rec.
Tetra Pak	Tetra Pak	R	HOPE	Recupac	Pre-rec.
Cartones	Cartón	R	HOPE	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Papeles	Papel	R	HOPE	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Vidrios	Vidrio	R	Crist. Toro	-	Pre-rec.
Orgánicos	Orgánico	R	Muni. Stgo.	CEA	Comp.
Pilas y baterías	Peligroso	R	Muni. Stgo.	Hidronor	DF
Tubos luminiscentes	Peligroso	R	Especialista	Hidronor	DF
Impresión	Peligroso	R	NGS	Hidronor	DF y Reut.
Electrónicos	Electrónico	R	Chilenter	-	Pre-rec.
Aceite	Otro	R	Bioils	-	Pre-rec.

Tabla C.3: Alcance específico de los casos 2 y 5. Cadena 1 y 2 se refieren a etapas en la cadena de tratamiento. S: Sala de basura; R: Acopio Rebeauchef. DF: Disposición Final; Recup: Recuperación; Reut: Reutilización; Pre-rec: Pre-reciclaje; Comp: Compostaje.

Corriente	Material	Acopio	Cadena 1	Cadena 2	Tratamiento
Desechos	Residuos	S	Muni. Stgo.	KDM	DF y Recup.
Botellas	PET	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Plásticos	PP rígido	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Latas	Aluminio	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Latas	Hojalata	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Tetra Pak	Tetra Pak	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Cartones	Cartón	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Papeles	Papel	R	Muni. Stgo	Rec. Industriales	Pre-rec.
Vidrios	Vidrio	R	Crist. Toro	-	Pre-rec.
Orgánicos	Orgánico	R	Muni. Stgo.	CEA	Comp.
Pilas y baterías	Peligroso	R	Muni. Stgo.	Hidronor	DF
Tubos luminiscentes	Peligroso	R	Especialista	Hidronor	DF
Impresión	Peligroso	R	NGS	Hidronor	DF y Reut.
Electrónicos	Electrónico	R	Chilenter	-	Pre-rec.
Aceite	Otro	R	Bioils	-	Pre-rec.

Tabla C.4: Alcance específico de los casos 3 y 6. Cadena 1 y 2 se refieren a etapas en la cadena de tratamiento. S: Sala de basura; R: Acopio Rebeauchef. DF: Disposición Final; Recup: Recuperación; Reut: Reutilización; Rec: Reciclaje total; Pre-rec: Pre-reciclaje; Comp: Compostaje.

Corriente	Material	Acopio	Cadena 1	Cadena 2	Tratamiento
Desechos	Residuos	S	Muni. Stgo.	KDM	DF y Recup.
Botellas	PET	R	-	ReciPET	Rec.
Bolsas	LDPE	R	-	ReciPET	Rec.
Plásticos	HDPE	R	-	GreenPlast	Rec.
Plásticos	PP rígido	R	-	GreenPlast	Rec.
Latas	Aluminio	R	-	Comercial HUAL	Pre-rec.
Latas	Hojalata	R	-	RECICLAMETAL	Pre-rec.
Tetra Pak	Tetra Pak	R	-	Recupac	Pre-rec.
Cartones	Cartón	R	-	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Papeles	Papel	R	-	SOREPA/Recupac	Pre-rec.
Vidrios	Vidrio	R	Crist. Toro	-	Pre-rec.
Orgánicos	Orgánico	R	Muni. Stgo.	CEA	Comp.
Pilas y baterías	Peligroso	R	Muni. Stgo.	Hidronor	DF
Tubos luminiscentes	Peligroso	R	Especialista	Hidronor	DF
Impresión	Peligroso	R	NGS	Hidronor	DF y Reut.
Electrónicos	Electrónico	R	Chilenter	-	Pre-rec.
Aceite	Otro	R	Bioils	-	Pre-rec.

## C.2. Índice de Calidad de Información (DQI)

La metodología para calcular el DQI se extrae de la guía generada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos que sigue los estándares de la norma ISO 14044 [66]. Este índice se aplica utilizando la rúbrica de calidad de datos (ver Tabla C.5) donde el mejor puntaje es 1 y el peor 5.

Tabla C.5: Rúbrica de DQI.

Indicador	1	2	3	4	5
Fiabilidad	Datos verificados basados en mediciones	Datos verificados basados en cálculos o datos no verificados basados en mediciones	Datos no verificados basados en cálculos	Estimado basado en documentación	Estimado sin basarse en documentación
Correlación temporal	Menos de 3 años de diferencia	Menos de 6 años de diferencia	Menos de 10 años de diferencia	Menos de 15 años de diferencia	Edad de los datos desconocida o mayor a 15 años
Correlación geográfica	Datos de la misma resolución y misma zona del estudio	Dentro de un nivel de resolución y relacionado a la zona del estudio	Dentro de dos niveles de resolución y relacionado a la zona del estudio	Fuera de dos niveles de resolución pero relacionado a la zona del estudio	De una zona diferente o desconocida
Correlación tecnológica	Todas las categorías tecnológicas son equivalentes	Tres de las categorías tecnológicas son equivalentes	Dos de las categorías tecnológicas son equivalentes	Una de las categorías tecnológicas es equivalente	Ninguna de las categorías tecnológicas es equivalente
Complejidad	>80 % de los flujos determinados han sido evaluados	60-79 % de los flujos determinados han sido evaluados	40-59 % de los flujos determinados han sido evaluados	40 % de los flujos determinados han sido evaluados	No se ha asignado la completitud del proceso



Las componentes de esta rúbrica son:

- **Fiabilidad:** indica la calidad de los datos y su verificación/validación basado en el método utilizado para su obtención: medición, estimación, cálculo, etc.
- **Representatividad:** se divide en tres indicadores:
  - **Correlación temporal:** indica la correlación entre el periodo de tiempo en que los datos fueron recolectados y el año que el modelo representa.
  - **Correlación geográfica:** señala que tan apropiada es la región de los datos para representar la región del modelo. Se utiliza el nivel de resolución (país, zona, mundo) y la relación al área del estudio. Por ejemplo, si el estudio es en África del Sur, un conjunto de datos de Alemania tiene el mismo nivel de resolución pero no está relacionado a la zona de estudio.
  - **Correlación tecnológica:** cuantifica las diferencias que pueden haber entre los datos y el alcance tecnológico. Este indicador se puede medir con cuatro categorías:
    - \* **Diseño de proceso:** se refiere a que los diagramas de flujo material y energético representen lo estudiado. Pueden ser específicos o generales según el nivel de representatividad.
    - \* **Condiciones de operación:** se refiere a que la información de la operación, como los parámetros de operación, representan los analizado.
    - \* **Calidad material:** indica que el material de entrada es del mismo tipo que el material del proceso. Los materiales no pueden ser diferentes, y si son del mismo tipo deben tener calidad similar.
    - \* **Escala:** se refiere a que la escala del proceso coincida con la del sistema estudiado. Los procesos pueden tener diferentes escalas: laboratorio, piloto, experimento, planta, etc.
- **Completitud:** indica el nivel al cual los flujos representan el sistema de interés y permiten una caracterización de los impactos.

Los resultados de la aplicación del DQI se reportan en la Tabla C.6.

Tabla C.6: DQI de los procesos del modelo. F: Fiabilidad; C: Completitud; T: Correlación temporal; G: Correlación geográfica; CT: Correlación tecnológica.

Proceso representativo	F	C	T	G	CT	DQI
extrusion, co-extrusion of plastic sheets, Cutoff, S, RoW	2	1	1	3	3	2.00
heat and power co-generation, biogas, gas engine, Cutoff, S, CL, 2017	4	1	3	1	2	1.75
municipal waste collection service by 21 metric ton lorry, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
sorting and pressing of iron scrap, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
transport, freight train, electricity, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.50
transport, freight, light commercial vehicle, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
treatment of biowaste, industrial composting, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of hazardous waste, underground deposit, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill, Cutoff, S, RoW, 2017	3	1	3	3	2	2.25
treatment of used fluorescent lamp, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of used vegetable cooking oil, purification, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
treatment of waste electric and electronic equipment, shredding, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	1	1.50
treatment of waste paperboard, sorting plant, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted, sorting, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting, Cutoff, S, RoW, 2017	2	1	1	3	2	1.75
injection moulding, Cutoff, S, 2017	2	1	1	3	3	2.00
Total	2.14	1.00	1.19	2.9	1.67	1.69

### C.3. Inventario específico de los escenarios

Cada escenario posee entradas y salidas. La entrada principal es el flujo de materiales desechados, que se divide en dos: los que van a los acopios de basura (Relleno en la Tabla C.7) y los que van a ReBeauchef (suma de Compostaje, Especial y Reciclaje de la Tabla C.7). Luego, vienen las etapas de transporte y transformación de cada flujo hasta su límite en el sistema, donde se convierten en las salidas principales. Las entradas y salidas secundarias corresponden a los flujos elementales que la base de datos asigna a cada proceso usado.

Tabla C.7: Flujos específicos para cada tratamiento, según caso, en ton año<sup>-1</sup>.

Flujos		Escenario				
General	Específico	0	1 y 3	2	4 y 6	5
Relleno	Relleno	113,59	46,45	46,79	8,05	8,16
Compostaje	Compostaje	9,40	13,17	13,17	10,60	10,60
Especial	Pilas y baterías	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
	Tubos luminiscentes	1,71	1,72	1,72	1,17	1,17
	Impresión	0,33	0,41	0,41	0,36	0,36
	Eléctricos	7,00	7,01	7,01	7,00	7,00
	Aceite	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Reciclaje	Vidrios	3,09	3,61	3,61	3,36	3,26
	PET	1,30	2,23	2,23	1,6	1,6
	LDPE	0,50	1,64	1,64	0,86	0,86
	Aluminio	0,92	1,18	1,18	1,00	1,00
	Chatarra	0,21	0,25	0,25	0,22	0,22
	Tetra Pak	0,63	1,25	1,25	0,83	0,83
	Papel blanco	7,10	8,08	8,08	7,41	7,41
	Diario	0,00	0,09	0,09	0,03	0,03
	Otros papeles y cartones	0,00	0,69	0,69	0,22	0,22
	Revista	1,72	1,83	1,83	1,76	1,76
	Corrugado	4,06	4,59	4,59	4,23	4,23
	Cartón Dúplex	1,94	2,17	2,17	2,02	2,02
	PP rígido	0,00	0,22	0,00	0,07	0,00
	HDPE	0,00	0,12	0,00	0,04	0,00

La información de las distancias de recorrido de transporte se calcula con Google Maps. En la Tabla C.8 se resumen los recorridos utilizados.

Tabla C.8: Distancias de recorrido entre instituciones de la red de tratamiento, en km.

Inicio	Destino	Distancia
FCFM	Estación de transferencia KDM	16
Estación de transferencia KDM	Relleno Loma Los Colorados KDM	106
FCFM	Hidronor	23
FCFM	NGS	20
FCFM	Chilenter	6
FCFM	Bioils	30
FCFM	Cristalerías Toro	6
FCFM	HOPE (Acopio La Reina)	13
FCFM	CEA	1
CEA	Hidronor	24
NGS	Hidronor	15
HOPE (Acopio La Reina)	ReciPET	26
HOPE (Acopio La Reina)	Comercial HUAL	27
HOPE (Acopio La Reina)	RECICLAMETAL	7
HOPE (Acopio La Reina)	Recupac	22,7
HOPE (Acopio La Reina)	SOREPA	22,8
HOPE (Acopio La Reina)	Timberecco	9
FCFM	Hidronor	22
FCFM	ReciPET	14
FCFM	Comercial HUAL	17
FCFM	RECICLAMETAL	9,4
FCFM	Recupac	9
FCFM	SOREPA	20
FCFM	GreenPlast	26
CEA	Reciclados Industriales	24

Para las actividades de transporte se consideraron diferentes procesos de transporte terrestre de la base de datos. Estos principalmente en transporte por camión municipal, transporte por tren eléctrico, transporte por camiones de diferentes tonelajes según el caso y transporte por vehículo liviano. En todos los casos motorizados se usaron los procesos regidos bajo norma Euro 5, ya que en Chile está vigente esta regulación [67].

A continuación, se describe el inventario de los procesos específicos:

- Relleno: para la operación de relleno sanitario se utilizó la información recopilada sobre la gestión de residuos en Loma Los Colorados KDM. Los residuos se retiran en la FCFM y se transportan a la estación de transferencia en Quilicura por medio de camión municipal. Luego, son cargados a trenes que los transportan al relleno sanitario. Aquí, los residuos se acopian y se realiza captura de biogás y cogeneración de energía. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Residuos: flujo másico de residuos a ser dispuestos.
    - \* Transporte municipal y por tren: modelados con *municipal waste collection service by 21 metric ton lorry, Cutoff, S, RoW* y *transport, freight train, electricity, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Electricidad: estimada por medio de un factor de producción de kW·h por ton tratada, calculado con datos de KDM [68] y modelado con *heat and power co-generation, biogas, gas engine, Cutoff, S, CL*.
    - \* Residuos tratados: modelados en parte con *treatment of municipal solid waste, sanitary landfill, Cutoff, S, RoW* ya que *heat and power co-generation, biogas, gas engine, Cutoff, S, CL* no considera el tratamiento de los sólidos que no generan biogás.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Compostaje: se tratan los residuos compostables en el CEA, por medio de pilas volteadas con ventilación natural. Los desechos llegan por medio de transporte municipal. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Compostaje: flujo másico de residuos para compostaje.
    - \* Transporte municipal: modelado por *municipal waste collection service by 21 metric ton lorry, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of biowaste, industrial composting, Cutoff, S, RoW*. Se aproxima este proceso con uno industrial por falta de información.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Pilas y baterías: son transportadas al CEA por la Municipalidad de Stgo. desde donde se llevan a Hidronor para su depósito seguro. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Pilas y baterías: flujo másico de pilas y baterías a tratar.
    - \* Transporte: modelados con *municipal waste collection service by 21 metric ton lorry, Cutoff, S, RoW* y *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW*.

- Salidas:
  - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of hazardous waste, underground deposit, Cutoff, S, RoW*.
  - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Tubos luminiscentes: son tratadas por empresas especialistas. Como varían en el tiempo, se asume que finalmente se transportan los residuos a Hidronor para depósito seguro. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Tubos luminiscentes: flujo másico de tubos y luminaria a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of used fluorescent lamp, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Impresión: son tratados por NGS, empresa que recupera y reutiliza algunos contenedores de tinta y dispone seguramente los que no se pueden reutilizar con Hidronor. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Impresión: flujo másico de *toners y cartridges* a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of hazardous waste, underground deposit, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Electrónicos: son tratados por Chilenter, que los desmantela y preprocesa para su reciclaje en el extranjero. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Electrónicos: flujo másico de residuos electrónicos a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of waste electric and electronic equipment, shredding, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Aceite: es tratado por Bioils en la planta de Maipú, donde se purifica el material para su uso en otras aplicaciones. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:

- \* Aceite: flujo másico de residuos de aceite vegetal usado a tratar.
- \* Transporte: modelado con *transport, freight, light commercial vehicle, Cutoff, S, RoW*.
- Salidas:
  - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of used vegetable cooking oil, purification, Cutoff, S, RoW*.
  - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Vidrios: son retirados por Cristalerías Toro, donde se reciclan para la producción de vidrio. Se modela hasta el preprocesamiento, ya que las huellas asociadas a su refundición son consideradas parte de la producción de nuevo vidrio pero con sustrato reciclado. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Vidrio: flujo másico de vidrio a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW*.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Aluminio: es procesado por Comercial HUAL hasta su enfardado para posterior reciclaje final. Dependiendo del intermediario, el transporte varía. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Aluminio: flujo másico de aluminio a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, 1, 3, 4 y 6; *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Chatarra: son residuos procesados por RECICLAMETAL hasta su enfardado para posterior reciclaje. Dependiendo del intermediario, el transporte varía. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Chatarra: flujo másico de chatarra a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, 1, 3, 4 y 6; *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *sorting and pressing of iron scrap, Cutoff, S, RoW*.

- \* Emisiones: calculadas por el programa.
- Tetra Pak, Papel blanco, Diario, Otros papeles y cartones, Revista, Corrugado, Cartón Dúplex: preprocesados por Recupac o SOREPA para su posterior reciclaje. Dependiendo del intermediario, el transporte varía. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* Corriente de material celulósico: cada uno de los flujos másicos de material a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, 1, 3, 4 y 6; *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *treatment of waste paperboard, sorting plant, Cutoff, S, RoW*.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- PET: según el escenario, las empresas tratantes cambian, por lo que varían los procesos. También varía el transporte según el caso. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* PET: flujo másico de residuos de PET a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, el 1, 3, 4 y 6; *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, el 1, 3, 4 y 6; *treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted, sorting, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- LDPE: según el escenario, las empresas tratantes cambian, por lo que varían los procesos. También varía el transporte según el caso. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* LDPE: flujo másico de residuos de LDPE a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios base, 1, 3, 4 y 6; *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *extrusion, co-extrusion of plastic sheets, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 3 y 6; *treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 2 y 5. El caso base y los casos 1 y 4 no poseen tratamiento ya que se donan a una empresa que los transforma artesanalmente.



- \* Emisiones: calculadas por el programa.
- HDPE: según el escenario, las empresas tratantes cambian, por lo que varían los procesos. También varía el transporte según el caso. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* HDPE: flujo másico de HDPE a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 1, 3, 4 y 6. El caso base y los casos 2 y 5 no poseen tratamiento para este residuo, por lo que no se transporta.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *extrusion, co-extrusion of plastic sheets, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 1, 3, 4 y 6. El caso base y los casos 2 y 5 no poseen tratamiento para este residuo.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.
- PP rígido: según el escenario, las empresas tratantes cambian, por lo que varían los procesos. También varía el transporte según el caso. Para modelar este funcionamiento se utilizaron las siguientes entradas y salidas:
  - Entradas:
    - \* PP rígido: flujo de PP rígido a tratar.
    - \* Transporte: modelado con *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 1, 3, 4 y 6. El caso base y los casos 2 y 5 no poseen tratamiento para este residuo, por lo que no se transporta.
  - Salidas:
    - \* Residuos tratados: modelados con *extrusion, co-extrusion of plastic sheets, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 1 y 4; *injection moulding, Cutoff, S, RoW* para los escenarios 3 y 6. El caso base y los casos 2 y 5 no poseen tratamiento para este residuo.
    - \* Emisiones: calculadas por el programa.

## C.4. Modelos de los escenarios

Con el uso del programa openLCA y los inventarios descritos, se obtuvieron los modelos para cada escenario, representados en las Figuras C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6 y C.7.

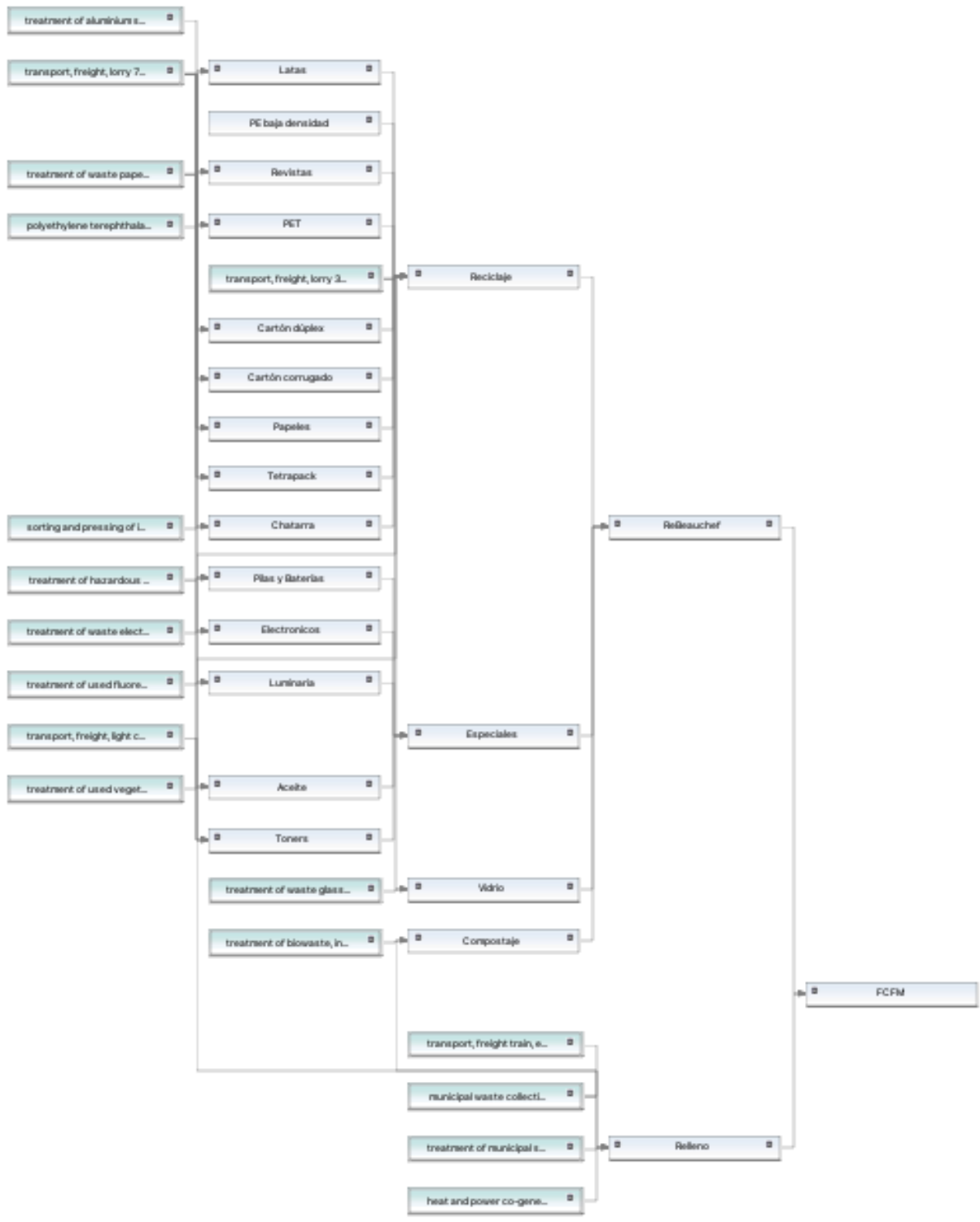


Figura C.1: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario base.

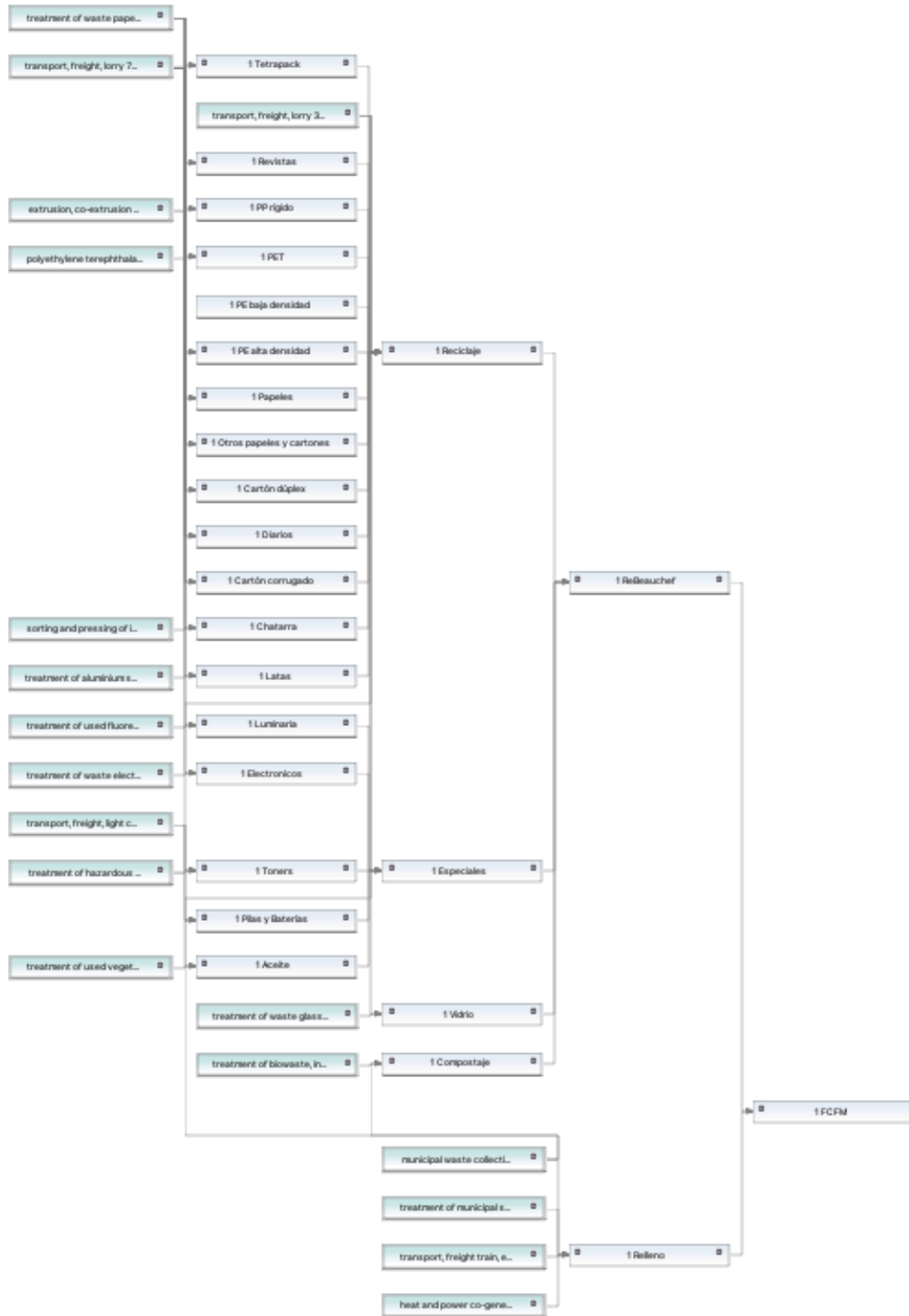


Figura C.2: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 1.

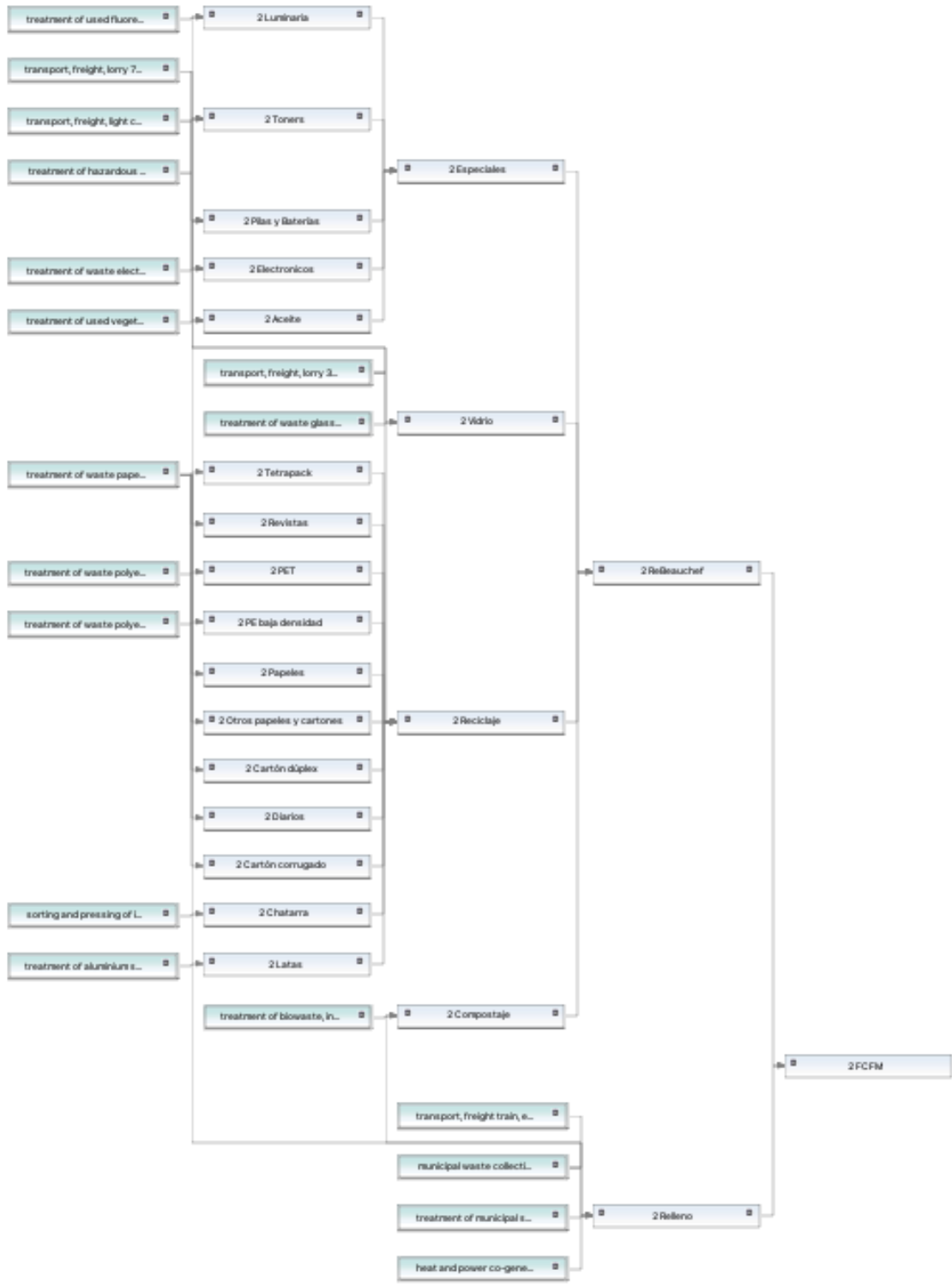


Figura C.3: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 2.

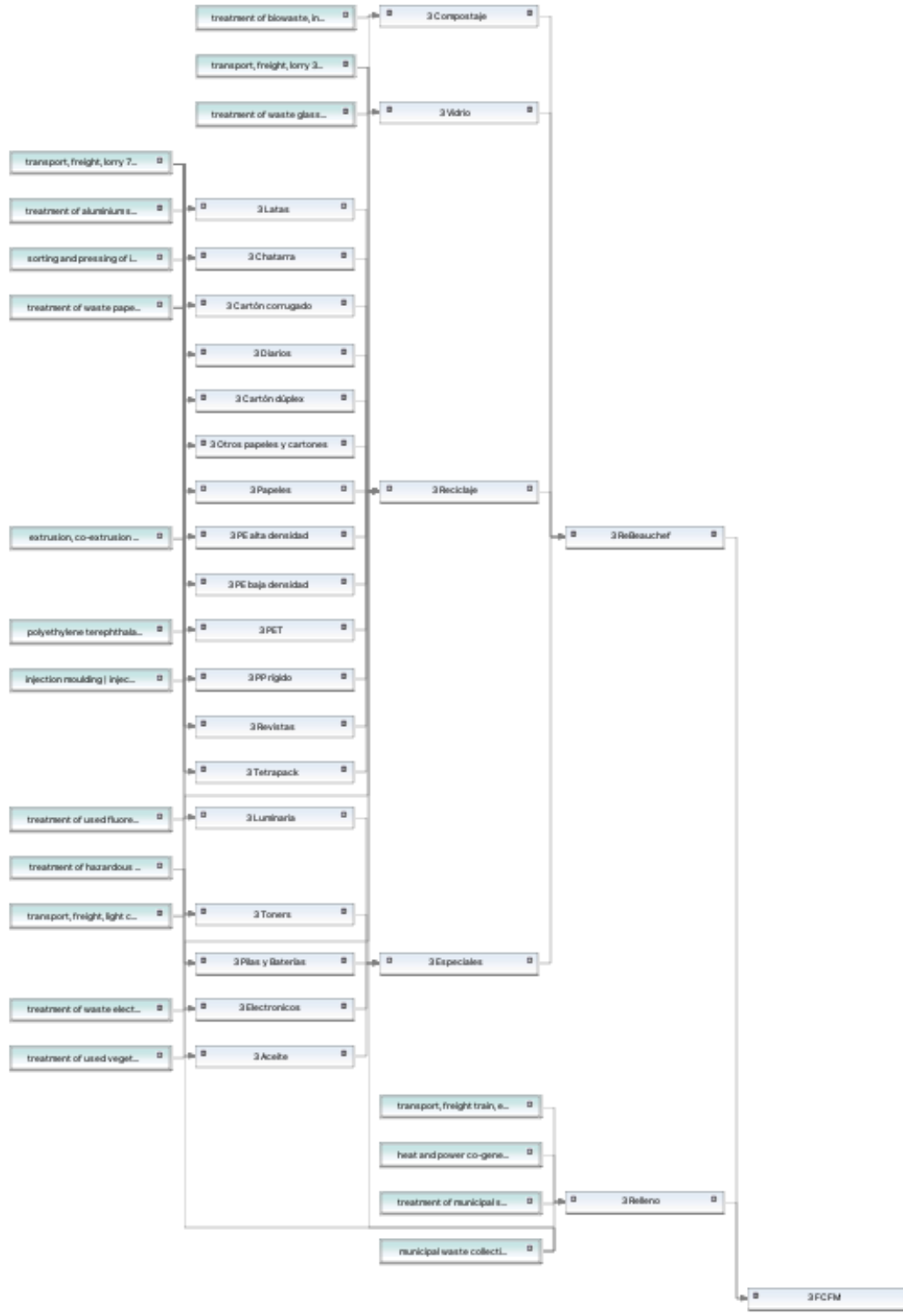


Figura C.4: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 3.

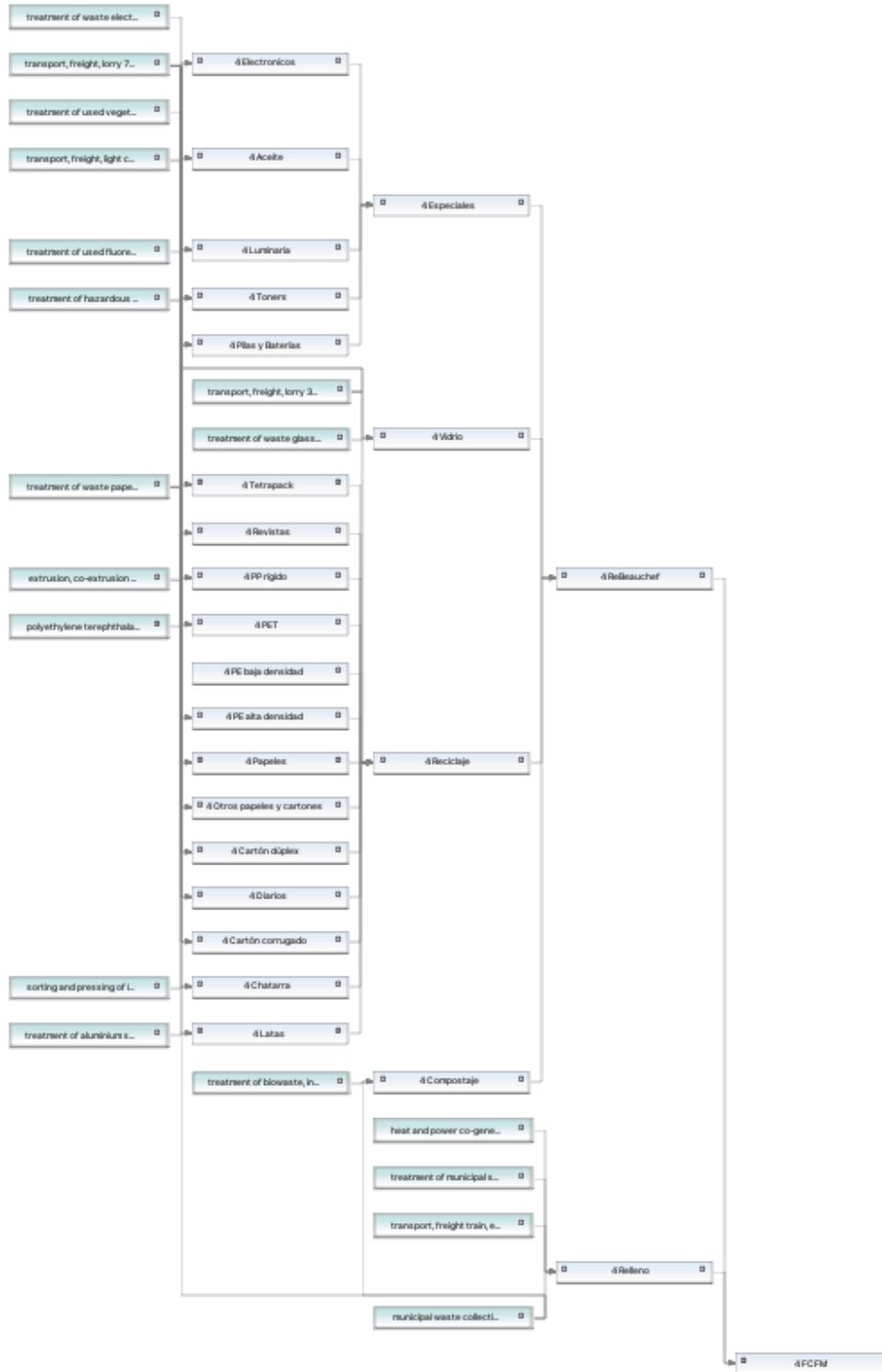


Figura C.5: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 4.

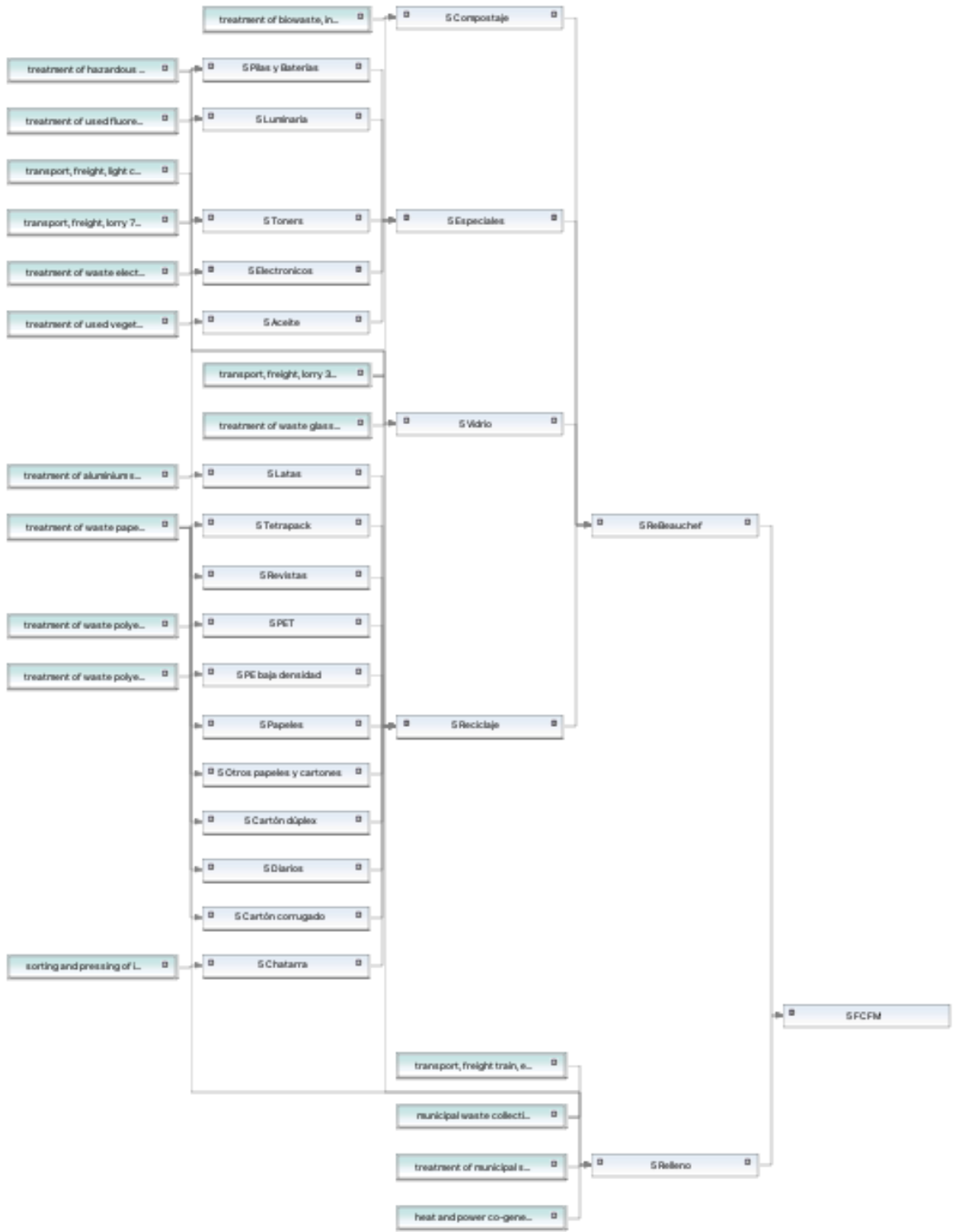


Figura C.6: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 5.

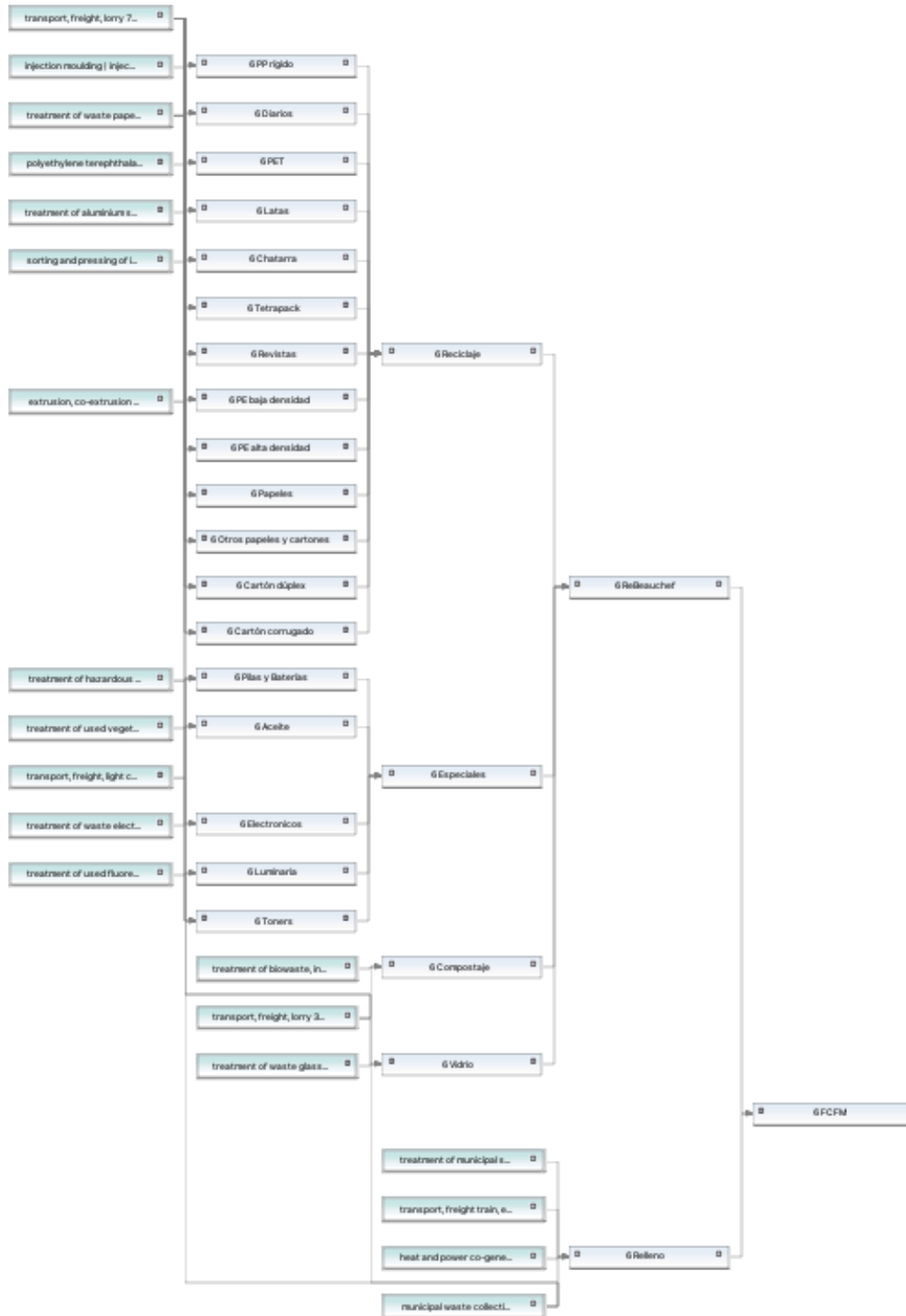


Figura C.7: Diagrama de flujo del modelo de openLCA del escenario 6.



## C.5. Contribuciones mayoritarias a las categorías de impacto

Tabla C.9: Contribuciones mayoritarias del escenario base.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	65030
treatment of waste paperboard	12560
heat and power co-generation, biogas	10780
treatment of biowaste, industrial composting	2602
municipal waste collection	2368
other	3250
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	276,7
heat and power co-generation, biogas	47,1
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	4,1
treatment of biowaste, industrial composting	2,8
municipal waste collection	2,4
other	4,9
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	18080,0
treatment of waste paperboard	18040,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	1124,0
municipal waste collection	448,2
treatment of aluminium scrap	385,9
other	1621,0
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
municipal waste collection	0,000428
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	0,000282
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	0,000185
transport, freight train, electricity	0,000034
treatment of waste paperboard	0,000033
other	0,000170

Tabla C.10: Contribuciones mayoritarias del escenario 1.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	26950
treatment of waste paperboard	15200
heat and power co-generation, biogas	4409
treatment of biowaste, industrial composting	3646
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	3622
other	2010
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	113,1
heat and power co-generation, biogas	19,3
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	7,0
treatment of biowaste, industrial composting	3,9
treatment of waste paperboard	1,7
other	4,2
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	7393,0
treatment of waste paperboard	2183,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	1926,0
treatment of aluminium scrap	492,9
treatment of waste electric and electronic equipment	338,4
other	1141,0
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	0,000317
municipal waste collection	0,000177
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	0,000115
treatment of biowaste, industrial composting	0,000044
treatment of waste paperboard	0,000040
other	0,000159

Tabla C.11: Contribuciones mayoritarias del escenario 2.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	26790
treatment of waste paperboard	15200
heat and power co-generation, biogas	4442
treatment of biowaste, industrial composting	3646
municipal waste collection	988
other	2060
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	114,0
heat and power co-generation, biogas	19,4
treatment of biowaste, industrial composting	3,9
treatment of waste paperboard	1,7
treatment of polyethylene terephthalate, for recycling	1,5
other	5,2
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	7440,0
treatment of waste paperboard	2183,0
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling	665,9
treatment of waste polyethylene, for recycling	625,1
treatment of aluminium scrap	492,9
other	1467,0
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
municipal waste collection	0,000179
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	0,000116
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton	0,000061
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling	0,000054
treatment of biowaste, industrial composting	0,000044
other	0,000175

Tabla C.12: Contribuciones mayoritarias del escenario 3.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	26590
treatment of waste paperboard	15200
heat and power co-generation, biogas	4409
treatment of biowaste, industrial composting	3646
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	3622
other	2981
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	113,1
heat and power co-generation, biogas	19,3
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	7,0
treatment of biowaste, industrial composting	3,9
extrusion, co-extrusion	1,8
other	6,2
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	7393,0
treatment of waste paperboard	2183,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	1926,0
treatment of aluminium scrap	492,9
extrusion, co-extrusion	432,5
other	1522,0
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	0,000317
municipal waste collection	0,000177
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	0,000115
extrusion, co-extrusion	0,000059
treatment of biowaste, industrial composting	0,000044
other	0,000186

Tabla C.13: Contribuciones mayoritarias del escenario 4.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of waste paperboard	13410,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	5272,0
treatment of biowaste, industrial composting	2936,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	2597,0
heat and power co-generation, biogas	874,1
other	912,8
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	22,4
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	5,0
heat and power co-generation, biogas	3,8
treatment of biowaste, industrial composting	3,1
treatment of waste paperboard	1,5
other	2,9
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of waste paperboard	1925,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	1466,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	1381,0
treatment of aluminium scrap	420,1
treatment of electric and electronic scrap	336,1
other	664,3
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	0,000227
municipal waste collection	0,000037
treatment of biowaste, industrial composting	0,000036
treatment of waste paperboard	0,000035
transport, freight, 3.5-7.5 metric ton	0,000031
other	0,000125

Tabla C.14: Contribuciones mayoritarias del escenario 5.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of waste paperboard	13410,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	5341,0
treatment of biowaste, industrial composting	2936,0
heat and power co-generation, biogas	885,6
treatment of used vegetable cooking oil, purification	-801,2
other	2381,0
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	22,7
heat and power co-generation, biogas	3,9
treatment of biowaste, industrial composting	3,1
treatment of waste paperboard	1,5
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling	1,1
other	3,4
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of waste paperboard	1925,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	1485,0
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling	477,5
treatment of aluminium scrap	420,1
treatment of waste electric and electronic equipment	337,9
other	995,2
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
transport, freight, lorry 3.5-7,5 metric ton	0,000052
treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling	0,000039
municipal waste collection	0,000038
treatment of biowaste, industrial composting	0,000036
treatment of waste paperboard	0,000035
other	0,000120

Tabla C.15: Contribuciones mayoritarias del escenario 6.

<b>GWP</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>
treatment of waste paperboard	13410,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	5272,0
treatment of biowaste, industrial composting	2936,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	2597,0
heat and power co-generation, biogas	874,1
other	1298,0
<b>EUT</b>	<b>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	22,4
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	5,0
heat and power co-generation, biogas	3,8
treatment of biowaste, industrial composting	3,1
treatment of waste paperboard	1,5
other	3,8
<b>HTP</b>	<b>kg p-DCB eq.</b>
treatment of waste paperboard	1925,0
treatment of municipal solid waste, sanitary landfill	1466,0
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	1381,0
treatment of aluminium scrap	420,1
treatment of waste electric and electronic equipment	337,9
other	875,9
<b>ODP</b>	<b>kg CFC-11 eq.</b>
polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous, recycled	0,000227
municipal waste collection	0,000037
treatment of biowaste, industrial composting	0,000036
treatment of waste paperboard	0,000035
extrusion, co-extrusion	0,000032
other	0,000128

# Apéndice D

## Proceso Analítico Jerárquico

### D.1. Respuestas de preguntas sobre indicadores y cálculo

Las respuestas de los expertos se resumen en las Tablas D.1 y D.2, que representan las variables que consideran relevantes para evaluar el subcriterio, cómo afectan el subcriterio y cuánto ponderan.

Tabla D.1: Respuestas experto 1.

¿Variable?	¿Cómo?	LOG	EEI	EOE
Cantidad transportada en la cadena	Mayor	-	35 %	10 %
Diferencia de procesos de tratamiento	Mayor	-	10 %	10 %
%Valorización de residuos	Menor	-	10 %	10 %
%Reducción de residuos	Menor	-	45 %	45 %
Minimización de potencial de gestión responsable	Menor	-	-	25 %
Nº empresas relacionadas a Rebeauchef	Mayor	15 %	-	-
Cantidad de personas trabajando en Rebeauchef	Menor	60 %	-	-
Nº grupos intrafacultad con los que hay que colaborar	Mayor	25 %	-	-

Tabla D.2: Respuestas experto 2.

¿Variable?	¿Cómo?	LOG	EEI	EOE
Cantidad transportada en la cadena	Mayor	-	25 %	10 %
Diferencia de procesos de tratamiento	Mayor	-	20 %	20 %
%Valorización de residuos	Menor	-	15 %	25 %
%Reducción de residuos	Menor	-	40 %	45 %
Nº empresas relacionadas a Rebeauchef	Mayor	20 %	-	-
Capacidad de acopiamiento	Menor	30 %	-	-
Aumento frecuencia de retiros en puntos intermedios	Menor	15 %	-	-
Probabilidad de licencias de personal	Mayor	25 %	-	-
Cantidad de personas trabajando en Rebeauchef	Menor	10 %	-	-



Para cada una de estas variables se encontró una dependencia en una característica de los escenarios y se obtuvo el siguiente resumen de valores (ver Tablas D.3 y D.4).

Tabla D.3: Dependencia de las variables a características de los escenarios.

Variable	Abreviación	Dependencia
Cantidad transportada	A	km ton
Diferencia de procesos	B	Nº procesos diferenciales
% Valorización de residuos	C	% Valorización
% Reducción de residuos	D	% Reducción
Minimización de potencial	E	% Potencial valorización
Nº empresas relacionadas	F	Nº Empresas
Cantidad de personas	G	Nº contratos
Nº grupos intrafacultad	H	% Valorización + % Reducción
Capacidad de acopiamiento	I	Capacidad comparada
Aumento de la frecuencia	J	Nº contratos
Probabilidad de licencias	K	Nº contratos

Tabla D.4: Valores de cada característica asociada a las variables.

Variable	1	2	3	4	5	6
A	6666	6472	6213	1848	1657	1451
B	3	1	4	3	1	4
C	52,7	52,3	52,7	84,7	84,5	84,7
D	36,6	36,6	36,6	66,0	66,0	66,0
E	13,7	13,8	13,7	3,9	3,9	3,9
F	9	9	13	9	9	13
G	2	2	2	2	2	2
H	89,3	89,0	89,3	150,7	150,5	150,7
I	1	1	1	1	1	1
J	2	2	2	2	2	2
K	2	2	2	2	2	2

Luego se normalizaron los valores dividiendo por el promedio. En la Tabla D.5 se visualiza el promedio de cada variable (junto al signo que simboliza su efecto) y los valores normalizados.

Cada uno de estos valores se multiplicó por su ponderador, y la sumatoria de estos productos para cada subcriterio generaron los indicadores de cada escenario (representados en las Tablas 6.3 y 6.4).

Tabla D.5: Normalización de las variables.

Variable	Promedio	1	2	3	4	5	6
A	-4051,2	-1,65	-1,60	-1,53	-0,46	-0,41	-0,36
B	-2,7	-1,13	-0,38	-1,50	-1,13	-0,38	-1,50
C	68,6	0,77	0,76	0,77	1,23	1,23	1,23
D	51,3	0,71	0,71	0,71	1,29	1,29	1,29
E	-8,8	-1,55	-1,57	-1,55	-0,44	-0,45	-0,44
F	-10,3	-0,87	-0,87	-1,26	-0,87	-0,87	-1,26
G	2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
H	-119,9	-0,74	-0,74	-0,74	-1,26	-1,25	-1,26
I	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
J	2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
K	2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

## D.2. Archivos utilizados en el cálculo del PAJ

### Estructura del PAJ y matrices de comparación

Archivo *AHP.ahp*:

Version: 2.0

#####

# Alternatives Section

#

Alternativas: &alternativas

ESC1:

ESC2:

ESC3:

ESC4:

ESC5:

ESC6:

#

# End of Alternatives Section

#####

#####

# Goal Section

#

Goal:

name: Decision

description: >

Elección de escenario de gestión de residuos FCFM.

author: Vicente MA

decision-makers:

- Pablo: 0.5
- Reynaldo: 0.5

preferences:

Pablo:

pairwise:

- [ECN, AMB, 1/3]

Reynaldo:

pairwise:

- [ECN, AMB, 1/3]

children:

ECN:

preferences:

Pablo:

pairwise:

- [COP, LOG, 3]
- [COP, INV, 2]
- [LOG, INV, 1/3]

Reynaldo:

pairwise:

- [COP, LOG, 1]
- [COP, INV, 5]
- [LOG, INV, 5]

children:

COP:

preferences:

Pablo:

pairwise:

- [ESC1, ESC2, 1.04]
- [ESC1, ESC3, 0.45]
- [ESC1, ESC4, 4.05]
- [ESC1, ESC5, 2.55]
- [ESC1, ESC6, 0.61]
- [ESC2, ESC3, 0.43]
- [ESC2, ESC4, 3.88]
- [ESC2, ESC5, 2.44]
- [ESC2, ESC6, 0.59]
- [ESC3, ESC4, 9]
- [ESC3, ESC5, 5.66]
- [ESC3, ESC6, 1.36]
- [ESC4, ESC5, 0.63]
- [ESC4, ESC6, 0.15]
- [ESC5, ESC6, 0.24]

Reynaldo:

pairwise:

- [ESC1, ESC2, 1.04]
- [ESC1, ESC3, 0.45]
- [ESC1, ESC4, 4.05]
- [ESC1, ESC5, 2.55]
- [ESC1, ESC6, 0.61]
- [ESC2, ESC3, 0.43]
- [ESC2, ESC4, 3.88]
- [ESC2, ESC5, 2.44]
- [ESC2, ESC6, 0.59]
- [ESC3, ESC4, 9]
- [ESC3, ESC5, 5.66]
- [ESC3, ESC6, 1.36]
- [ESC4, ESC5, 0.63]
- [ESC4, ESC6, 0.15]
- [ESC5, ESC6, 0.24]

children: \*alternativas

LOG:

preferences:

Pablo:

pairwise:

- [ESC1, ESC2, 1]
- [ESC1, ESC3, 1.38]
- [ESC1, ESC4, 2.57]
- [ESC1, ESC5, 2.56]
- [ESC1, ESC6, 8.97]
- [ESC2, ESC3, 1.39]
- [ESC2, ESC4, 2.58]
- [ESC2, ESC5, 2.57]
- [ESC2, ESC6, 9]
- [ESC3, ESC4, 1.86]
- [ESC3, ESC5, 1.85]
- [ESC3, ESC6, 6.48]
- [ESC4, ESC5, 0.99]
- [ESC4, ESC6, 3.49]
- [ESC5, ESC6, 3.51]

Reynaldo:

pairwise:

- [ESC1, ESC2, 1]
- [ESC1, ESC3, 9]
- [ESC1, ESC4, 1]
- [ESC1, ESC5, 1]
- [ESC1, ESC6, 9]
- [ESC2, ESC3, 9]
- [ESC2, ESC4, 1]
- [ESC2, ESC5, 1]
- [ESC2, ESC6, 9]
- [ESC3, ESC4, 0.11]

```

        - [ESC3, ESC5, 0.11]
        - [ESC3, ESC6, 1]
        - [ESC4, ESC5, 1]
        - [ESC4, ESC6, 9]
        - [ESC5, ESC6, 9]
children: *alternativas
INV:
preferences:
  Pablo:
    pairwise:
      - [ESC1, ESC2, 1]
      - [ESC1, ESC3, 1]
      - [ESC1, ESC4, 9]
      - [ESC1, ESC5, 9]
      - [ESC1, ESC6, 9]
      - [ESC2, ESC3, 1]
      - [ESC2, ESC4, 9]
      - [ESC2, ESC5, 9]
      - [ESC2, ESC6, 9]
      - [ESC3, ESC4, 9]
      - [ESC3, ESC5, 9]
      - [ESC3, ESC6, 9]
      - [ESC4, ESC5, 1]
      - [ESC4, ESC6, 1]
      - [ESC5, ESC6, 1]
  Reynaldo:
    pairwise:
      - [ESC1, ESC2, 1]
      - [ESC1, ESC3, 1]
      - [ESC1, ESC4, 9]
      - [ESC1, ESC5, 9]
      - [ESC1, ESC6, 9]
      - [ESC2, ESC3, 1]
      - [ESC2, ESC4, 9]
      - [ESC2, ESC5, 9]
      - [ESC2, ESC6, 9]
      - [ESC3, ESC4, 9]
      - [ESC3, ESC5, 9]
      - [ESC3, ESC6, 9]
      - [ESC4, ESC5, 1]
      - [ESC4, ESC6, 1]
      - [ESC5, ESC6, 1]
children: *alternativas
AMB:
preferences:
  Pablo:
    pairwise:

```

```

    - [EEI, EOE, 1]
Reynaldo:
  pairwise:
    - [EEI, EOE, 1]
children:
  EEI:
    preferences:
      Pablo:
        pairwise:
          - [ESC1, ESC2, 0.53]
          - [ESC1, ESC3, 0.98]
          - [ESC1, ESC4, 0.12]
          - [ESC1, ESC5, 0.11]
          - [ESC1, ESC6, 0.12]
          - [ESC2, ESC3, 1.87]
          - [ESC2, ESC4, 0.23]
          - [ESC2, ESC5, 0.21]
          - [ESC2, ESC6, 0.24]
          - [ESC3, ESC4, 0.13]
          - [ESC3, ESC5, 0.11]
          - [ESC3, ESC6, 0.13]
          - [ESC4, ESC5, 0.9]
          - [ESC4, ESC6, 1]
          - [ESC5, ESC6, 1.12]
      Reynaldo:
        pairwise:
          - [ESC1, ESC2, 0.48]
          - [ESC1, ESC3, 1.47]
          - [ESC1, ESC4, 0.2]
          - [ESC1, ESC5, 0.16]
          - [ESC1, ESC6, 0.21]
          - [ESC2, ESC3, 3.07]
          - [ESC2, ESC4, 0.42]
          - [ESC2, ESC5, 0.34]
          - [ESC2, ESC6, 0.45]
          - [ESC3, ESC4, 0.14]
          - [ESC3, ESC5, 0.11]
          - [ESC3, ESC6, 0.15]
          - [ESC4, ESC5, 0.82]
          - [ESC4, ESC6, 1.07]
          - [ESC5, ESC6, 1.31]
      children: *alternativas
  EOE:
    preferences:
      Pablo:
        pairwise:
          - [ESC1, ESC2, 0.63]

```

- [ESC1, ESC3, 1.26]
- [ESC1, ESC4, 0.15]
- [ESC1, ESC5, 0.14]
- [ESC1, ESC6, 0.16]
- [ESC2, ESC3, 2.02]
- [ESC2, ESC4, 0.25]
- [ESC2, ESC5, 0.22]
- [ESC2, ESC6, 0.25]
- [ESC3, ESC4, 0.12]
- [ESC3, ESC5, 0.11]
- [ESC3, ESC6, 0.13]
- [ESC4, ESC5, 0.91]
- [ESC4, ESC6, 1.03]
- [ESC5, ESC6, 1.13]

Reynaldo:

pairwise:

- [ESC1, ESC2, 0.5]
- [ESC1, ESC3, 1.72]
- [ESC1, ESC4, 0.24]
- [ESC1, ESC5, 0.19]
- [ESC1, ESC6, 0.26]
- [ESC2, ESC3, 3.45]
- [ESC2, ESC4, 0.47]
- [ESC2, ESC5, 0.38]
- [ESC2, ESC6, 0.53]
- [ESC3, ESC4, 0.14]
- [ESC3, ESC5, 0.11]
- [ESC3, ESC6, 0.15]
- [ESC4, ESC5, 0.81]
- [ESC4, ESC6, 1.11]
- [ESC5, ESC6, 1.38]

children: \*alternativas

#

# End of Goal Section

## Ejecución del PAJ

Archivo *AHP.R*:

```
# Configuraciones
setwd("~/Dropbox/Universidad/Tesis/AHP")

# Bibliotecas
library(data.tree)
library(ahp)

# Cargar datos y calcular AHP
escenarios <- Load("AHP.ahp")
Calculate(escenarios)

# Visualizar estructura de decisiones
Visualize(escenarios)

# Variables de configuracion de tablas
vari <- "weightContribution" # variable a mostrar
sor <- "orig" # orden de las alternativas
wcol <- "skyblue" # color del peso
ccol <- "yellow" # color de la consistencia
acol <- "green" # color de la alternativa
deci <- "Total" # tomador/a de decision

# Tabla de resultados
AnalyzeTable(escenarios ,
              decisionMaker = deci ,
              variable = vari ,
              sort = sor ,
              weightColor = wcol ,
              consistencyColor = ccol ,
              alternativeColor = acol)
```



# Apéndice E

## Combinación de los resultados

### E.1. Comparación de los resultados del ACV con el aspecto ambiental del PAJ

Aplicando la misma metodología que se utilizó para extraer y estandarizar los resultados del aspecto económico del PAJ, se obtienen los siguientes resultados para la parte ambiental (ver Tabla E.1).

Tabla E.1: Estandarización de los resultados extraídos de la parte ambiental del PAJ. Pesos de los subcriterios entre paréntesis.

Escenario	Resultados extraídos		Transformación		Puntaje	Estandarización
	EEI (0,5)	EOE (0,5)	EEI -	EOE -		
-	(0,5)	(0,5)	-	-	-	-
1	4,2	5,1	1	1	1	-0,54
2	8,6	9,3	1	1	1	-0,54
3	3,5	3,4	1	1	1	-0,54
4	26,6	26,5	3	3	3	0,38
5	31,3	30,9	4	4	4	0,85
6	25,7	24,8	3	3	3	0,38

Al comparar estos datos con los del ACV, se obtiene el gráfico de la Figura E.1.

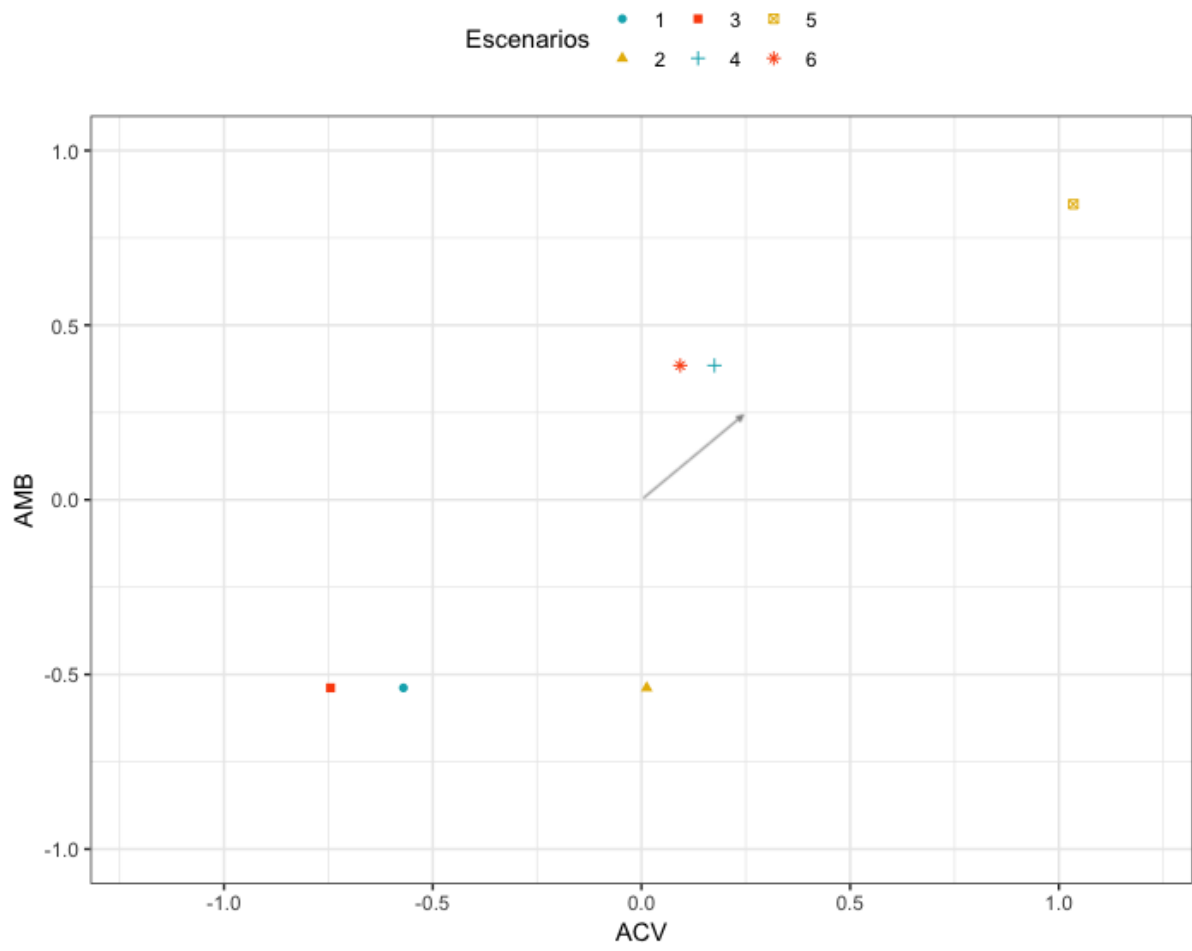


Figura E.1: Comparación de los datos estandarizados del ACV y la parte ambiental del PAJ.