

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Evaluación del Desempeño Ambiental del Edificio de Residencias Estudiantiles del
Instituto Tecnológico de Costa Rica en las Etapas de Producción de Materias Primas,
Construcción y Ocupación”**

Melissa María Díaz Segura

CARTAGO, abril, 2016

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

**“Evaluación del Desempeño Ambiental del Edificio de Residencias Estudiantiles del
Instituto Tecnológico de Costa Rica en las Etapas de Producción de Materias Primas,
Construcción y Ocupación”**

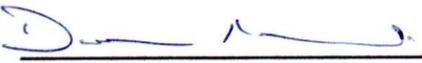
Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como
requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal


MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Director


Lic. David Benavides Ramírez
Lector 1


MSc. Jorge Alberto Calvo Gutiérrez
Lector 2


MSc. Diana Alexandra Zambrano Piamba
Coordinador COTRAFIG


PhD. Florra Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química


MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Les dedico este logro a mi familia y mis amigos más cercanos, por su apoyo incondicional.
Sin ustedes no lo hubiera logrado.

*“Todo tiene su tiempo,
y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”
Eclesiastés 3:1*

AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios por darme la salud y la posibilidad de concluir este proceso satisfactoriamente.

Mi agradecimiento a los profesores e investigadores del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por sus enseñanzas que me ayudaron a mi formación profesional.

Por último y no menos importante, este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración desinteresada de los expertos en análisis de ciclo de vida del CADIS y del FSLCI.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	14
Abstract	15
1 Introducción	16
1.1 <i>Objetivos</i>	17
1.1.1 Objetivo general.....	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2 Revisión de Literatura.....	18
2.1 <i>Antecedentes</i>	18
2.1.1 Antecedentes Históricos del Análisis de Ciclo de Vida	18
2.1.2 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida en Costa Rica	20
2.1.3 Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida en el Sector de la Construcción	22
2.1.3.1 Impacto Ambiental del Sector de la Construcción.....	24
2.2 <i>Conceptos Generales del Análisis de Ciclo de Vida</i>	29
2.2.1 Definición del ACV	29
2.2.2 Fases del ACV	29
2.2.2.1 Definición de objetivos y del ámbito de aplicación.	30
2.2.2.2 Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV).	31
2.2.2.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).	31
2.2.2.4 Interpretación del ciclo de vida.	36
3 Definición del Caso de Estudio	37
3.1 <i>Descripción General del Proyecto</i>	37
3.2 <i>Ubicación Geográfica</i>	38
3.3 <i>Infraestructura a Desarrollar</i>	39
3.4 <i>Servicios Básicos</i>	40
3.4.1 Agua Potable	40
3.4.2 Energía Eléctrica	40
3.4.3 Aguas Residuales	41
3.4.4 Aguas Pluviales.....	41

3.4.5	Manejo de Residuos Sólidos	42
3.4.5.1	Fase de Construcción	42
3.4.5.2	Fase de ocupación	44
4	Metodología.....	46
4.1	<i>Definición del Planteamiento y Alcance del ACV</i>	46
4.1.1	Unidad Funcional	46
4.1.2	Flujo de Referencia	46
4.1.3	Sistema de Producto y Límites del Sistema	47
4.1.4	Procedimientos de Asignación y Criterios de Corte.....	48
4.1.5	Categorías de Impacto Seleccionadas y Metodología de Evaluación de Impacto ..	48
4.1.6	Requisitos Iniciales de la Calidad de los Datos.....	50
4.1.7	Suposiciones.....	51
4.1.8	Limitaciones.....	51
4.2	<i>Elaboración del Inventario de Análisis de Ciclo de Vida.</i>	52
4.2.1	Fase de Producción de Materias Primas.....	52
4.2.2	Fase de Construcción	53
4.2.2.1	Transporte de materias primas	53
4.2.2.2	Consumo de agua y electricidad	53
4.2.2.3	Consumo de combustibles fósiles	54
4.2.2.4	Generación de residuos sólidos.....	54
4.2.2.5	Generación de aguas residuales ordinarias	54
4.2.2.6	Transformación del suelo urbano.....	55
4.2.3	Fase de Ocupación	56
4.2.3.1	Consumo de agua.....	56
4.2.3.2	Consumo eléctrico	56
4.2.3.3	Generación de aguas residuales ordinarias	57
4.2.3.4	Generación de residuos sólidos.....	57
4.2.3.5	Insumos para dar mantenimiento al edificio	57
4.2.4	Procesamiento de la Información	58
4.3	<i>Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida del Edificio</i>	58
4.4	<i>Interpretación de los Resultados del Análisis de Ciclo de Vida</i>	59
4.5	<i>Verificación de los Resultados del Análisis de Ciclo de Vida</i>	59

4.5.1	Análisis de Contribución.....	59
4.5.2	Análisis de Monte Carlo.....	59
5	Resultados y Discusión	61
5.1	<i>Fase de Producción de Materias Primas</i>	61
5.2	<i>Fase de Construcción</i>	64
5.2.1	Consumo Eléctrico.....	64
5.2.2	Consumo de Agua.....	67
5.2.3	Generación de Residuos Sólidos	68
5.2.4	Generación de Aguas Residuales Ordinarias	68
5.2.5	Consumo de Combustibles Fósiles, Transporte de Materias Primas y Transformación del Suelo Urbano.....	69
5.2.6	Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida en la Fase de Construcción	70
5.3	<i>Fase de Ocupación</i>	73
5.3.1	Consumo Eléctrico.....	73
5.3.2	Consumo de Agua.....	74
5.3.3	Generación de Aguas Residuales Ordinarias	75
5.3.4	Generación de Residuos Sólidos	75
5.3.5	Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida en la Fase de Ocupación	76
5.4	<i>Análisis Comparativo</i>	79
5.5	<i>Verificación de los Resultados del ACV</i>	81
5.5.1	Análisis de Contribución.....	81
5.5.2	Análisis de Monte Carlo.....	83
6	Conclusiones.....	85
7	Recomendaciones.....	87
8	Referencias	88
	Apéndices.....	95
	Apéndice 1: ICV de la Fase de Producción de Materias Primas del Edificio	96
	Apéndice 2: ICV de la Fase de Construcción del Edificio	102
	Apéndice 3: ICV de la Fase de Ocupación del Edificio	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Etapas del Ciclo de Vida de un Edificio	23
Figura 2-2 Emisiones Globales de CO2 Relacionadas al Sector Energía, por Sector Productivo (izquierda) y por Países Miembros y No Miembros de la OECD (derecha).	24
Figura 2-3 Huella de Carbono del Sector Constructivo en el Año 2011.....	27
Figura 2-4 Esquema Típico del ACV.....	29
Figura 2-5 Fases del Análisis del Ciclo de Vida.....	30
Figura 2-6 Los Cinco Pasos de la Fase de EICV.....	36
Figura 3-1 Ubicación del Proyecto Edificio de Residencias Estudiantiles.....	38
Figura 3-2 Vista de Planta del Proyecto Edificio de Residencias Estudiantiles.....	39
Figura 3-3 Vista Arquitectónica del Edificio de Residencias Estudiantiles.....	39
Figura 3-4 Composición de la Generación Eléctrica en Costa Rica en el Año 2015, y Esperada para el 2014-2035.....	41
Figura 3-5 Composición Porcentual de los Residuos Sólidos Urbanos de Costa Rica.....	45
Figura 4-1 Diagrama de Flujo del ACV del Edificio.....	47
Figura 4-2 Categorías de Impacto y Caminos Cubiertos por la Metodología ReCiPe.....	49
Figura 5-1 EICV de la Fase de Producción de Materias Primas del Edificio.....	61
Figura 5-2 Consumo Eléctrico Real y Previsto Para la Fase de Construcción del Edificio.....	64
Figura 5-3 Consumo de Agua Real y Previsto Para la Fase de Ocupación del Edificio.....	67
Figura 5-4 Flujo de Personal Durante la Fase de Construcción del Edificio.....	69
Figura 5-5 EICV de la Fase de Construcción del Edificio.....	70
Figura 5-6 EICV de la Fase de Ocupación del Edificio.....	76
Figura 5-7 Análisis Comparativo de las Fases de Producción de Materia Primas, Construcción y Ocupación del Edificio.....	79
Figura 5-8 Resultados del Análisis de Monte Carlo para las Fases del Ciclo de Vida Analizadas.....	84

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1 Impactos Ambientales Analizados en Varios Estudios Publicados de ACV en el Sector Construcción.....	28
Cuadro 2-2 Principales Categorías de Impacto Ambiental y sus Características.....	33
Cuadro 3-1 Manejo de Residuos Sólidos Durante la Construcción.	42
Cuadro 4-1 Categorías de Impacto y Daños Seleccionados para el Análisis.	50
Cuadro 5-1 Composición Eléctrica Estimada Durante la Fase de Construcción del Edificio.	66
Cuadro 5-2 Determinación del Consumo Hídrico por Persona Durante la Fase de Construcción del Edificio.	68
Cuadro 5-3 Determinación del Consumo Eléctrico en la Fase de Ocupación del Edificio..	73
Cuadro 5-4 Composición Eléctrica Estimada Durante la Fase de Ocupación del Edificio..	74
Cuadro 5-5 Determinación del Consumo Hídrico por Persona Durante la Fase de Ocupación del Edificio.	74
Cuadro 5-6 Generación de Residuos Sólidos y Tratamiento Durante la Fase de Ocupación del Edificio.	75
Cuadro 5-7 Análisis de Contribución de las Fases de Ciclo de Vida del Edificio.	81

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ALCALA	Association for Life Cycle Assessment in Latin America (Asociación Latino Americana para la Evaluación del Ciclo de Vida)
CADIS	Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable
CEN	Comité Europeo de Normalización
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
CFC	Clorofluorocarbonos
CH ₄	Metano
CILCA	Conferencia Internacional en América Latina sobre Análisis de Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de carbono
EICV	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICTJA	Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
ISO	International Standards Organization (Organización Internacional de Normalización)
JASEC	Junta Administradora de Servicios Eléctricos de Cartago
JRC	Joint Reseach Centre (Centro Común de Investigación)
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MJ	Megajoules

NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (Compuestos Orgánicos Volátiles Libres de Metano)
N ₂ O	Óxido de Nitrógeno
OECD	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos
P	Fósforo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
RECOPE	Refinadora Costarricense de Petróleo
SETAC	Sociedad de Toxicología y Química Ambiental
SO ₂	Dióxido de Azufre
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

RESUMEN

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología útil para cuantificar los impactos ambientales de procesos, productos y servicios. En este caso se utilizó para determinar el desempeño ambiental del edificio de Residencias Estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación. Para ello se generó un inventario con las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida, que luego se evaluó por medio del software SimaPro 8.0.5, utilizando la base de datos Ecoinvent. Los resultados de la evaluación del ciclo de vida permitieron determinar los procesos que generan los mayores impactos ambientales del edificio y los beneficios de las medidas ambientales implementadas; así como realizar un análisis comparativo del impacto ambiental de las fases evaluadas. Además se verificaron los resultados del ACV mediante un análisis de contribución de los procesos más influyentes y una simulación estadística mediante el método de Monte Carlo. En términos generales la fase de producción de materias primas y ocupación generaron los mayores impactos ambientales. En la primera fase, los materiales que generaron un mayor impacto ambiental fueron los clasificados dentro de las categorías “Metales” y “Minerales”. Durante la fase de construcción las mayores huellas ambientales se debieron al transporte de materiales al sitio y el traslado de material inerte hacia el relleno sanitario. Para la fase de ocupación del edificio, el consumo eléctrico y la generación de aguas residuales ordinarias generaron los impactos más influyentes. En las fases de construcción y ocupación se encontraron cargas ambientales evitadas significativas gracias a las buenas prácticas ambientales implementadas.

Palabras clave: Sustentabilidad, Análisis de Ciclo de Vida, Evaluación de Impacto Ambiental, Construcción, SimaPro, Ecoinvent

ABSTRACT

The Life Cycle Assessment is a useful methodology to quantify the environmental impacts of processes, products and services. In this case, it was used to determine the environmental performance of the student residences building of the Costa Rican Institute of Technology in the stages of production of raw materials, construction and occupation. An inventory of the inputs and outputs of each stage of the life cycle was conducted, and then evaluated by the SimaPro 8.0.5 software and the use of the Ecoinvent database. The life cycle evaluation allowed to determine which processes generate the greatest environmental impacts of the building and the benefits of the environmental measures implemented; a comparative analysis of the environmental impact of the stages evaluated was generated as well. In addition, LCA results were verified by a contribution analysis of the most influential processes and a statistical simulation by the Monte Carlo method. Overall, the production of raw materials and occupation stages generated the highest environmental impacts. In the first stage, the materials that cause the biggest environmental impacts are the ones classified into the categories “Metals” and “Minerals”. During the construction phase, the highest environmental footprints were due to transport of materials to the site and the transfer of inert material to the landfill. For the occupation phase, energy consumption and wastewater generation caused the higher impacts. Significant environmental burdens found avoided thanks to the implementation of good environmental practices in the phases of construction and occupation.

Key words: Sustainability, Life Cycle Assessment, Impact Assessment, Construction, SimaPro, Ecoinvent

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población estudiantil y las políticas enmarcadas en la atracción de estudiantes de zonas alejadas y de bajos recursos, aunado a las dificultades en los medios de transporte colectivo, hace que cada vez más estudiantes requieran hospedarse cerca del campus universitario (TEC, 2012).

La iniciativa de construcción de una nueva residencia estudiantil en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), busca ampliar la cobertura y aumentar el acceso a la educación superior a estudiantes con condición socioeconómica limitada. Este proyecto forma parte del Proyecto de Mejoramiento de la Educación Superior (PMES) financiado parcialmente por el Banco Mundial. Es requerimiento de esta entidad comprometerse a seguir una serie de “Políticas de Salvaguardias” ambientales y sociales que buscan evitar o minimizar los impactos sociales y ambientales de los proyectos financiados (Ford, 2013).

Con este objetivo, el TEC busca determinar y cuantificar el desempeño ambiental de las medidas tomadas en el diseño y ejecución de sus obras.

Una herramienta científica ampliamente utilizada para lograrlo es el Análisis de Ciclo de Vida (en adelante ACV). Esta metodología permite conocer el impacto ambiental de un producto, proceso o actividad durante todas las fases de su ciclo de vida. La información que aporta dicha evaluación permite a las organizaciones conocer mejor sus procesos e impactos ambientales asociados. Permite también la identificación de oportunidades de mejora y la detección de las necesidades futuras. Por tanto, puede aplicarse sobre un material o solución constructiva, o bien sobre un edificio o grupo de edificios (Zambalza et al, 2014).

En Costa Rica la aplicación del ACV en los diferentes ámbitos aún es incipiente. En el caso del sector constructivo no se tienen claro los impactos ambientales generados directa o indirectamente durante cada etapa del ciclo de vida de un edificio.

El presente estudio busca determinar los impactos ambientales potenciales generados durante las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio de Residencias Estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Determinar el desempeño ambiental del proyecto Residencias Estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio.

1.1.2 Objetivos específicos

Determinar los impactos ambientales potenciales durante las fases de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio de residencias estudiantiles mediante el uso de la herramienta SimaPro 8.0.5.

Analizar los resultados obtenidos del Análisis de Ciclo de Vida en las fases de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio de Residencias Estudiantiles.

Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las fases de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio de Residencias Estudiantiles.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

A continuación se enunciarán los principales conceptos del análisis de ciclo de vida, antecedentes y aplicaciones en Costa Rica. Posteriormente se analizará su aplicación al sector de la construcción tanto a nivel nacional como internacional.

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes Históricos del Análisis de Ciclo de Vida

A raíz de varios desastres ambientales ocurridos en los años 1970 y 1980, en Estados Unidos se empezó a implementar acciones regulatorias para controlar las liberaciones puntuales de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Estas regulaciones fueron fundamentales para generar un cambio en la gestión y manejo ambiental. Sin embargo, los esfuerzos de tratamiento estuvieron por mucho tiempo enfocados en cubrir solamente una etapa del ciclo de vida del producto (por ejemplo, la producción, uso o eliminación), un solo medio (aire, agua o suelo), o un solo tema (por ejemplo, límites químicos individuales). Estas estrategias no siempre conducen hacia un beneficio ambiental neto de los procesos (Fava et al, 2014).

Fue necesaria una evaluación adicional de las entradas al proceso, lo cual condujo al desarrollo de programas de pre-tratamiento y prevención de la contaminación. Al mismo tiempo, la sociedad se dio cuenta de que el intento de resolver nuestra problemática ambiental va más allá de las instalaciones de fabricación; ya que por ejemplo, los productos y embalajes crean una enorme cantidad de residuos sólidos al término de su vida útil. Muchas otras observaciones se estaban produciendo por las organizaciones y líderes que exigían otra manera de entender de forma más completa el impacto total de la sociedad en el planeta (Fava et al, 2014).

El ACV emergió como una de esas herramientas que avanzaron suficiente para llenar ese vacío, permitiendo comprender mejor los riesgos, oportunidades, y compensaciones de las muchas etapas del ciclo de vida del producto, así como los múltiples impactos que podrían ocurrir en cada etapa del sistema.

Los primeros estudios de ciclo de vida de los productos se realizaron en Estados Unidos y países europeos como Inglaterra, Francia y Suiza. Sin embargo cada estudio se desarrolló con sus propias metodologías de trabajo. El énfasis de los primeros ACV se enfocó en el ahorro energético y la conservación de los recursos, más que en el impacto de la contaminación (Kopffler, 2014).

No fue hasta 1990, cuando la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) auspició en Estados Unidos, el taller internacional “Marco Técnico para las Evaluaciones de Ciclo de Vida”, donde por primera vez se acuñó el término “Análisis del Ciclo de Vida”. A partir de este momento tardó 7 años en finalizar la primera serie internacional de estandarización ISO en 1997, la cual luego fue ligeramente actualizada por la ISO 14040 en 2006. Esta última se convirtió en la base de todos los estándares de análisis de ciclo de vida, y define la estructura mundialmente aceptada que debe tener un análisis de ciclo de vida (Kopffler, 2014).

La SETAC, en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA o UNEP por sus siglas en inglés) en el año 2002 fundó el proyecto Iniciativa de Ciclo de Vida (ICV). Este contribuye con el Marco de 10 Años de Programas para promover Patrones de Consumo y Producción Sostenibles, conforme a lo solicitado en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, celebrada en Johannesburgo (2002). Su objetivo es promover el análisis de ciclo de vida a nivel global y facilitar el intercambio de conocimientos de más de 2.000 expertos de todo el mundo y cuatro redes regionales de diferentes continentes (UNEP/SETAC, 2015).

Actualmente el ACV se ha convertido en un reconocido instrumento para evaluar las cargas ecológicas y los impactos en la salud humana relacionados con el ciclo completo de vida (creación, uso y destino final) de productos, procesos y actividades, lo que permite modelar todo el sistema desde el cual proceden los productos o determinar en qué procesos o actividades operan.

Sin embargo, en los últimos 20 años se ha dado un cambio en el desarrollo y aplicación del ACV. Los esfuerzos iniciales se enfocaron en desarrollar y mejorar la definición básica de elementos metodológicos como el objetivo y el alcance, análisis de inventario, la evaluación del impacto, y la calidad y disponibilidad de datos. Estos esfuerzos aún continúan en desarrollo. No obstante, en los últimos 8 años, se ha dado un aumento en la demanda de información del ciclo de vida de los productos y procesos. Este fenómeno se ha dado en campos tan variados como la construcción ecológica, el comercio minorista, la electrónica, y en las expectativas de compra por parte de los clientes. Se evidencia que existe una necesidad de hacer que la información del ciclo de vida se encuentre a disposición de personas no necesariamente especialistas en ACV en diferentes áreas profesionales como contratación, innovación, comercialización, entre otras. La información del ciclo de vida se integrará como apoyo a las herramientas existentes para la toma de decisiones y diversas prácticas empresariales (Kopffler, 2014).

2.1.2 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida en Costa Rica

El enfoque de ciclo de vida tuvo sus inicios en la formulación de políticas públicas sobre plaguicidas en Costa Rica en el año 2002. Diversas organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales expresaron su preocupación por los plaguicidas empleados en cultivos de plátano, fresa, helechos y flores. Estas preocupaciones se basaban únicamente en la percepción, es decir, carecían de sustento científico, por lo que en el 2002 la Contraloría General de la República decidió realizar un proyecto con enfoque de ciclo de vida para investigar el uso de plaguicidas y sus consecuencias en la salud y el medio ambiente en el país. Se analizaron 25 de los ingredientes activos más usados en plaguicidas en Costa Rica durante 1998, así como diversos tipos de exposición a dichas sustancias (con efectos en la salud y el medio ambiente). Los resultados del proyecto indicaron que cinco de los ingredientes activos eran responsables de aproximadamente 95% del impacto en la salud humana, y que tres de ellos explicaban 90% del impacto ambiental. Estos resultados no eran sino una mera aproximación a la forma en que los ingredientes activos afectan la salud humana y el medio ambiente en Costa Rica; no obstante, la información obtenida fue útil para asesorar a otras

entidades gubernamentales en las características de los ingredientes activos (PNUMA, 2004).

En el año 2003 se creó la Asociación Latino Americana para la Evaluación del Ciclo de Vida (ALCALA, por sus siglas en inglés), la cual tuvo su lanzamiento oficial durante la primera Conferencia Internacional en América Latina sobre ACV (CILCA) efectuada en el 2005 en San José, Costa Rica. ALCALA realiza capacitaciones y demostraciones prácticas sobre los beneficios ambientales, sociales y económicos del enfoque de ciclo de vida. Además busca la colaboración y el fortalecimiento de vínculos en la región, y desarrolla políticas relativas al desarrollo sostenible. Mantiene la colaboración con la iniciativa de ciclo de vida de la UNEP/SETAC participando en proyectos, conferencias y talleres a nivel nacional e internacional. Además es miembro fundador de la Red IberoAmericana de ACV y colabora con el Green Building Council de Costa Rica, para introducir el enfoque de ciclo de vida en los conceptos fundamentales de la construcción sostenible (ALCALA, 2013).

Por su parte, en el sector privado se han desarrollado iniciativas empresariales de análisis de ciclo de vida de sus procesos. Es el caso de las compañías Cayuga Collection y Florida Ice and Farm CO. Cayuga Collection es un administrador de los hoteles boutique en Costa Rica y Nicaragua, con un fuerte compromiso con la sostenibilidad medioambiental, social y económico. Esta empresa invierte de manera que todos los elementos de los hoteles contribuyen a la reducción de los impactos en el ciclo de vida. Desde el diseño arquitectónico para la elección de la tecnología, incluyendo la operación del hotel y las actividades después de que el huésped abandona las instalaciones. Cuando se planea la construcción de un nuevo hotel, Cayuga analiza los impactos a través del ciclo de vida del edificio, desde los materiales de construcción a la operación. El diseño y la infraestructura se eligen para minimizar el consumo de agua y energía, incluyendo características tales como la ventilación y la calefacción solar pasiva. Los hoteles son operados aprovechando de los recursos naturales, por ejemplo, la ropa se seca al aire libre, siempre que sea posible. El agua es tratada antes de volver al medio ambiente y los residuos sólidos son reciclados (por ejemplo, aluminio y plástico), o utilizados para la producción de biogás, abono, o

alimentos para las granjas de cerdos. Los proveedores locales son preferidos, apoyando a las empresas locales y reduciendo los impactos ambientales debidos al transporte (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2014).

Florida Ice and Farm CO. es una organización dedicada a la producción de alimentos, bebidas y bienes raíces. Según la UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2014), la compañía comenzó a utilizar indicadores ambientales en 2004, con la certificación del sistema de gestión ambiental ISO 14001. Actualmente se utilizan como indicadores clave de rendimiento para todas las unidades de negocio. El ACV no se utiliza a su máxima capacidad, sin embargo, el objetivo actual es incluir más aspectos de la metodología y estar más cerca de lograr la gestión del ciclo de vida en todas las líneas de productos; diferenciando la empresa en el mercado. En el 2015, Florida Bebidas se convirtió en la primera empresa costarricense en recibir la Certificación de Huella de Agua, aplicando la metodología de ACV a uno de sus productos principales: Agua Cristal (Mora, 2015).

2.1.3 Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida en el Sector de la Construcción

Históricamente, la industria de la construcción se ha enfocado en buscar alternativas de reducción de consumo energético, con el fin de disminuir los costos durante la etapa de ocupación del edificio y por consecuencia, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Por lo general, cuando se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se hace durante la etapa operativa y pocas veces se maneja su reducción de una manera integral desde el diseño de un edificio y la concepción de la obra. Aunado a esto, la industria de la construcción, requiere de la extracción de grandes cantidades de materiales que al final se convierte también en consumo de energía y en emisiones contaminantes hacia la atmósfera. Cada material de construcción debe ser extraído, procesado y transportado a su lugar de uso por lo que se considera que los materiales tienen energía y CO₂ incorporado (Hammond & Jones, 2008).

El ACV se ha utilizado en el sector de la construcción desde 1990 y es aceptado internacionalmente como una herramienta útil para diseñar, planificar y tomar decisiones, proporcionando una evaluación analítica en las etapas del ciclo de vida del edificio. La

aplicación del ACV, permite la toma de decisiones no solamente en términos económicos sino también evaluando los beneficios ambientales globales (Srebric et al, 2011).

Según el estándar “Sustainability of Construction Works” del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 350), el ciclo de vida de un edificio incluye cuatro etapas (ver Figura 2-1): producción de materias primas, construcción, uso y fin de vida.

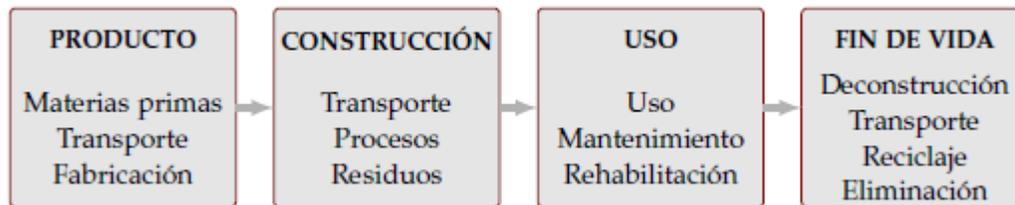


Figura 2-1 Etapas del Ciclo de Vida de un Edificio
Fuente: CEN/TC 350

La energía en un edificio se consume de dos formas: directamente durante la construcción, uso y demolición, e indirectamente a través de la producción de los materiales utilizados en el edificio, término que se conoce como energía incorporada (Sartori *et al*, 2007).

Según la UNEP (2009), las emisiones de GEI procedentes de los edificios surgen principalmente de su consumo de energía a base de combustibles fósiles, tanto a través del uso directo de combustibles fósiles como mediante el uso de la electricidad que se ha generado a partir de combustibles fósiles. Las emisiones de gases de efecto invernadero significativas también se generan a través de los materiales de construcción, en particular, los materiales de aislamiento y refrigeración y sistemas de refrigeración. En términos generales, la energía se consume durante las siguientes actividades:

- a. Fabricación de materiales de construcción (energía “incrustada”)
- b. El transporte de estos materiales desde las plantas de producción hasta el sitio construcción (energía “gris”)
- c. Construcción del edificio (energía “inducida”)
- d. Funcionamiento del edificio (energía “operativa”)
- e. Demolición del edificio (y el reciclaje de sus partes, donde esto ocurre).

El consumo de energía durante la fase de ocupación de un edificio depende de una amplia gama de factores relacionados entre sí, como el clima y la ubicación, el nivel de la

demanda, la oferta, y la fuente de energía, la función y el uso del edificio, el diseño y los materiales de construcción, incluso el nivel de ingresos y el comportamiento de sus ocupantes. Las condiciones climáticas y el tipo de ambiente en el que se encuentra un edificio, afectan a todos los aspectos del uso de energía de un edificio durante su vida útil. Sin embargo, el nivel de las emisiones de gases de efecto invernadero de los edificios está más estrechamente correlacionada con el nivel de la demanda, el suministro y la fuente de energía (UNEP, 2009).

2.1.3.1 Impacto Ambiental del Sector de la Construcción

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), mundialmente el sector de la construcción representa alrededor del 10% de las emisiones directas de CO₂. Sin embargo, al incluir las emisiones generadas por el uso de electricidad, se incrementa cerca del 30% (IEA, 2010). El aporte de emisiones de GEI y CO₂ de países en desarrollo representa un porcentaje mínimo del total de emisiones globales. Sin embargo, se prevé que de seguir la misma ruta de industrialización que los países desarrollados, las emisiones de GEI producidas por la región se incrementarían proporcionalmente (PNUMA, 2014). Tal comportamiento se puede observar en la figura 2-2.

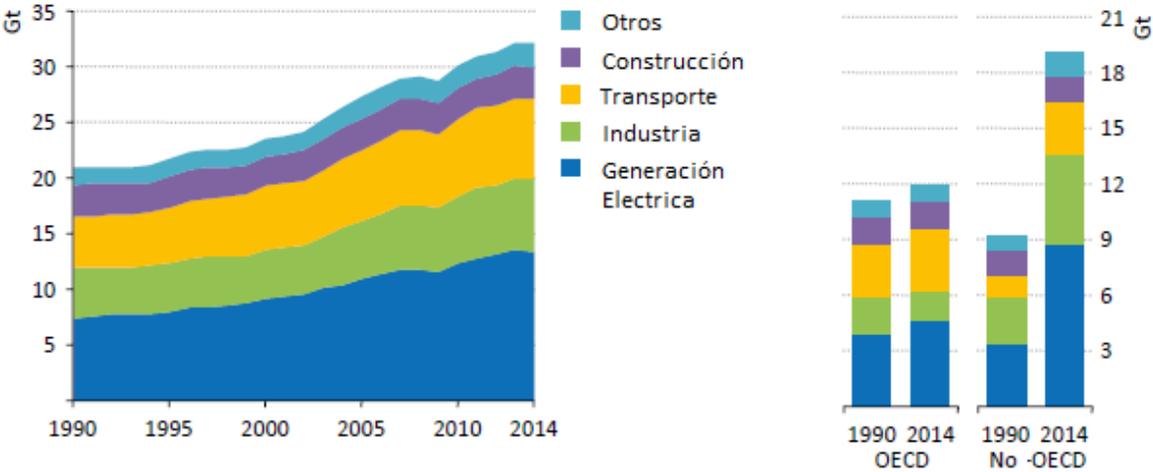


Figura 2-2 Emisiones Globales de CO₂ Relacionadas al Sector Energía, por Sector Productivo (izquierda) y por Países Miembros y No Miembros de la OECD (derecha). Fuente: IEA, 2015.

Para el caso de Latinoamérica, se estima que del 2000 al 2020 la población en zonas urbanas en América Latina y el Caribe aumentará de 76% a 89% (Cesano *et al*, 2013). Este es un dato relevante si se consideran las estimaciones actuales de los impactos ambientales producidos por las edificaciones. A nivel latinoamericano se estima que los edificios consumen el 21% del agua, 42% de la energía eléctrica, producen el 25% de las emisiones de CO₂ y el 65% de residuos (Cesano *et al*, 2013).

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), de cara a un rápido crecimiento urbano, derivado de un significativo crecimiento económico en las últimas décadas, los países latinoamericanos son actores clave para el desarrollo e implementación de medidas para el crecimiento verde y la mitigación y adaptación al cambio climático (OECD, 2012).

Costa Rica establece en su Plan Nacional de Desarrollo 2011-2014 aspiraciones nacionales ambiciosas. Se pretende llegar a ser una de las primeras naciones desarrolladas de América Latina, ser un país líder en el mundo con uso de energía de fuentes 100 % renovables y alcanzar el estatus de una nación carbono-neutral para el 2021 (MIDEPLAN, 2010). Sin embargo para lograr el cumplimiento de estos objetivos, el país se enfrenta a grandes retos.

Según el Programa Estado de la Nación (2014), a pesar de los logros en las áreas de conservación y política forestal, el impacto de las actividades humanas y productivas es insostenible. El ritmo de consumo de los recursos es mayor que la capacidad del territorio, lo cual compromete la sostenibilidad.

Por su parte, el consumo de electricidad ha aumentado 4,2 veces en la última década, creciendo en un estimado de 5,3 % anual, impulsado por un alto grado de electrificación en el país e incrementado por el uso residencial e industrial (PNUMA, 2014).

Los edificios son responsables de 60 a 75% del uso total de la electricidad del país y el 40-60% del volumen de residuos. Más del 60% de la población vive en zonas urbanas planas, donde el 97% de los edificios son de una sola planta. La presión sobre la tierra está aumentando a un ritmo más acelerado, lo que hace necesario fomentar ciudades compactas y edificios de gran altura. Debido al crecimiento de la población y el desarrollo económico,

las actividades de construcción son ahora más intensas que nunca. El mercado del cemento ha estado creciendo a un 3,7% en los últimos diez años a pesar de la reciente desaceleración del mercado en el período 2008-2009 (MINAE, 2013).

Por su parte el sector de la construcción tuvo una caída general en el 2013 del 4 % en la tramitación de obras, sin embargo, la obra habitacional, que representa más del 40 % de la construcción total del país, mantuvo un crecimiento del 7 % (Bermúdez, 2014).

Según indicadores del CFIA, para el año 2014, se construyó un total de 8,1 millones de m², de los cuales la mayor concentración fue de obras de tipo habitacional, seguidos de obras comerciales, urbanísticas, industriales e institucionales. El acumulado histórico se estima que sea de 38,6 millones de m² entre el 2012 a 2021, mostrando un crecimiento anual de 4,5 millones de m², lo que equivale a un incremento anual del 3,7% (CFIA, 2015).

Se estima que la cantidad de residuos generados por la construcción tenga un patrón similar de crecimiento. Estos desechos, generados en enormes cantidades, son una mezcla de residuos que en algunos casos incluyen residuos peligrosos y suelen ser gestionados con poco o ningún control. La separación en el origen de los residuos es inadecuada o inexistente y estos son dispuestos habitualmente en botaderos ilegales o, simplemente, en lotes baldíos cercanos a los sitios de construcción de donde proceden. Ocasionalmente se transportan hasta los rellenos sanitarios más cercanos. Sin embargo, la problemática asociada a su disposición final es el gran volumen que ocupan, y por lo tanto la disminución que provocan en la vida útil de estos lugares. El país carece en la actualidad de plantas para reciclar escombros ni sitios controlados para su disposición, aunque en el futuro probablemente se reciclarán cantidades significativamente grandes, como consecuencia de tarifas de vertido más altas, legislación obligatoria y del éxito de empresarios emprendedores para procesar estos residuos (UICN, 2011).

Las estimaciones indican que el sector constructivo generó un total de 4.1 millones de toneladas de emisiones de CO₂ en el 2011. Las proyecciones para el periodo 2012-2021 señalan que el sector podría liberar 46,8 millones de toneladas de CO₂. Tal como se observa en la figura 2-3, la huella ambiental del sector en el 2011 se compuso principalmente por la producción de materiales de construcción metálicos, no metálicos, maderables, y por el

consumo eléctrico de los edificios en la fase de ocupación. El cemento representó casi el 75% de las emisiones no metálicas y un 20-22% del sector (MINAE, 2013).

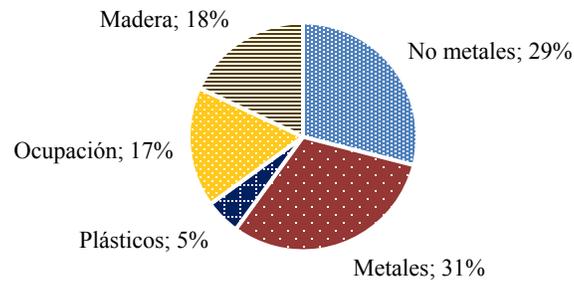


Figura 2-3 Huella de Carbono del Sector Constructivo en el Año 2011.
Fuente: Adaptado de MINAE (2013)

Otra fuente de emisiones de CO₂ es la generación de aguas residuales. En Costa Rica, el 75% de las aguas residuales domésticas se tratan utilizando tanques sépticos y letrinas, lo cual compromete las reservas de agua. La mayor parte del porcentaje restante va a los ríos sin ningún tipo de tratamiento (actualmente cerca del 5% recibe tratamiento). Teniendo en cuenta el CH₄ y N₂O liberado a estas aguas, existe un potencial de mitigación que debe ser incluido en la Estrategia Nacional de Carbono, sin mencionar los beneficios ambientales y de salud (MINAE, 2013).

Las prácticas de construcción sostenible toman cada vez más fuerza en el sector de la construcción. Se trata de una inversión que se recupera a corto y mediano plazo, ya que se debe invertir en certificaciones, materiales especiales tales como aislantes térmicos. Aun así los beneficios son mayores, como por ejemplo, se podría disminuir hasta en un 50% el consumo de energía eléctrica por la utilización de aislantes, aprovechamiento de la luz solar y calentamiento del agua con la misma (Rodríguez, 2015).

La aplicación de la metodología de ACV ha permitido determinar los impactos ambientales potenciales de diversos proyectos constructivos. El cuadro 2-1 muestra varios estudios publicados junto a sus respectivos impactos ambientales analizados.

Cuadro 2-1 Impactos Ambientales Analizados en Varios Estudios Publicados de ACV en el Sector Construcción.

Referencia	Contenido, País	CG	A	E	OF	TH	CE	CA	RA	GR	EC	CR	EA	US
Scheuer <i>et al.</i> 2003	ACV en un edificio del Campus Universitario con un área de 7300 m2, EEUU.	x	x		x		x			x				
Chargoy, 2011	Perfil Ambiental de Viviendas de Interés Social, México	x	x	x		x	x		x		x			x
Hernández, 2012	Metodología de ACV en Edificios, España	x	x	x	x	x			x		x			x

Abreviaciones: CG: Potencial de Calentamiento Global, A: Acidificación, E: Eutrofización, OF: Concentración de Ozono Fotoquímico, TH: Toxicidad Humana, CE: Consumo de Energía, CA: Consumo de Agua, RA: Decrecimiento de los Recursos Abióticos, GR: Generación de Residuos, EC: Ecotoxicidad, CR: Consumo de Recursos, EA: Emisiones al Aire, US: Uso del Suelo

2.2 CONCEPTOS GENERALES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

2.2.1 Definición del ACV

El ACV es una de las técnicas desarrolladas para comprender y tratar los impactos asociados a los productos o servicios. Según la norma ISO 14040 (2007), el ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un proceso o producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclaje y disposición final (proceso llamado “de la cuna a la tumba”). En general los impactos económicos y sociales están fuera del alcance de los ACV, aunque se pueden combinar con otras técnicas de análisis.



Figura 2-4 Esquema Típico del ACV.
Fuente: Gazulla (2013).

2.2.2 Fases del ACV

La metodología del ACV está totalmente estandarizada a través de las normas ISO 14040:2007 y ISO 14044:2007, y consta de 4 fases interrelacionadas como se muestra en la Figura 2-5.

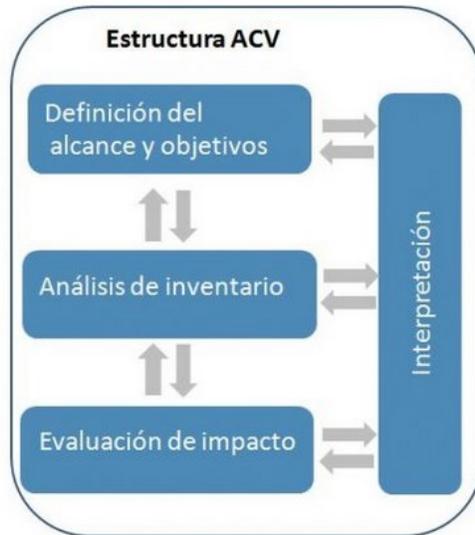


Figura 2-5 Fases del Análisis del Ciclo de Vida.
Fuente: Gazulla (2013).
Adaptado de la Norma ISO 14040 (2007)

Tal como se observa en la Figura 2-5, las cuatro fases que componen el ACV se conectan mutuamente con flechas, las cuales representan flujos de información de una fase a otra. El flujo bidireccional indica que el ACV no es un proceso secuencial que comienza con la meta y la definición del alcance y termina con una interpretación. Por el contrario, el ACV es un proceso iterativo, donde el objetivo y el alcance pueden ser modificados después de un análisis de inventario, después de la fase de impacto evaluación o interpretación. Del mismo modo el análisis de inventario puede ser modificado después de la evaluación del impacto o la interpretación (UNEP, 2004).

A continuación se detallará cada una de las fases de un ACV.

2.2.2.1 Definición de objetivos y del ámbito de aplicación.

Según la norma ISO 14040 (2007), el objetivo del ACV debe establecer la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y el público previsto. El alcance por su parte debe estar suficientemente definido para asegurar que la amplitud, y el nivel de detalle del estudio sean compatibles para alcanzar el objetivo establecido. El alcance incluye los siguientes puntos: el sistema de producto, los límites del estudio, la unidad

funcional, el flujo de referencia, las categorías de impacto a analizar, las suposiciones, las limitaciones y los requisitos de la calidad de los datos.

Según Chargoy (2011), un concepto fundamental en el ACV es la unidad funcional: sirve como base para los cálculos de los inventarios y los impactos ambientales, además permite comparar sistemas diferentes pero con la misma función. La norma ISO 14040 (2007), establece que la unidad funcional define cuantitativamente la función que tiene un producto, de modo que se emplea como unidad de referencia en el estudio.

2.2.2.2 Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV).

En esta fase se cuantifican todos los datos de energía, emisiones y materiales entrantes y salientes del sistema durante toda su vida útil, los cuales son extraídos o emitidos hacia el medioambiente (Gazulla, 2013). Estos datos deben satisfacer la unidad funcional, es decir, relacionarse con la base de cálculo. A esta relación se le denomina flujo de referencia (Chargoy, 2011).

Según Goedkoop *et al* (2007), existen dos clases de datos que se pueden utilizar en un inventario:

- a) Datos de primer plano: Datos específicos que es necesario obtener para modelar un sistema. Son datos no genéricos que sólo aplican a un determinado proceso en un determinado lugar.
- b) Datos de segundo plano: Datos genéricos de producción de materiales, energía transporte, y manejo de desechos. Estos datos se pueden encontrar en otros inventarios y en la literatura.

La obtención de los datos de segundo plano se puede realizar a partir de los simuladores de ACV. Este tipo de software toma los datos de inventarios como Ecoinvent. (Goedkoop *et al*, 2007).

2.2.2.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).

La tercera fase, llamada evaluación de impacto (EICV) es el núcleo central del análisis de ciclo de vida y representa una parte crítica del mismo. Según Niembro & Gonzales

(2010), la magnitud y significancia de los costos sociales y medioambientales asociados a actividades específicas en un ciclo de vida se identifican durante la EICV.

La EICV es una técnica diferente a otras herramientas de valoración ambiental, tales como la evaluación del desempeño ambiental, la evaluación de impacto ambiental y la evaluación de riesgo. El enfoque de las EICV está basado en una unidad funcional, no así las otras técnicas, aunque puede utilizar información recopilada por ellas (Niembro & Gonzales, 2010).

A continuación se detallará brevemente en qué consiste cada una de las etapas del EICV.

- a) Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización.

En esta etapa se seleccionan los impactos de acuerdo con la meta del estudio y el método elegido para cada categoría de impacto. Las categorías de impacto e indicadores de categoría reflejan los asuntos ambientales relacionados con el sistema bajo estudio. Los modelos de caracterización vinculan los resultados del inventario con los indicadores de categoría a través de factores de caracterización. El indicador de categoría es la representación cuantificable de una categoría de impacto de EICV (Niembro & Gonzales, 2010).

Existen diversas categorías de impacto a seleccionar de acuerdo a los objetivos del estudio. A modo orientativo, en el Cuadro 2-2 se indican las principales categorías de impacto ambiental contempladas por la SETAC.

Cuadro 2-2 Principales Categorías de Impacto Ambiental y sus Características.
Fuente: Adaptado de IHOB, (2009) y Goedkoop *et al.*, (2013).

Categoría de Impacto Ambiental		Unidad de Referencia	Factor de Caracterización
Calentamiento Global	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas.	Kg. Eq CO ₂	Potencial de Calentamiento Global
Agotamiento de Combustibles Fósiles	Cantidad de combustibles fósiles extraídos para obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	Kg de aceite	Potencial de Agotamiento Fósil
Reducción de la Capa de Ozono	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica.	Kg. Eq. CFC-11	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono
Eutrofización del Agua Dulce	Crecimiento excesivo de la población de algas, originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	Kg. Eq. de P	Potencial de Eutrofización
Acidificación Terrestre	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	Kg. Eq SO ₂	Potencial de Acidificación
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad).	Kg. Eq. NMVOCs	Potencial de Formación de Oxidantes Fotoquímicos
Ocupación del Suelo	Daños a los ecosistemas debido a los efectos de la ocupación y la transformación de la tierra en una determinada superficie durante un tiempo determinado.	m ² x año	Potencial de Ocupación del Suelo
Agotamiento del Agua	Este indicador simplemente expresa la cantidad total de agua consumida.	m ³	Potencial de Agotamiento del Agua
Agotamiento de Minerales	Agotamiento de los depósitos de minerales	Kg	Potencial de Agotamiento Mineral

Existen diversos métodos para la evaluación de impactos ambientales potenciales. La norma ISO 14044 trajo la normalización de los principios básicos para aplicar el ACV, pero dicha norma no especifica qué métodos de EICV aplicar en la práctica. Sin embargo le da al practicante el consejo de aplicar métodos de aceptación internacional general y científica (Hauschild & Huijbregts, 2015). La elección de los indicadores

apropiados y las metodologías para analizar los resultados de un inventario es siempre subjetiva (Blengini & Di Carlo, 2010).

b) Asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (Clasificación).

Aquí, los flujos elementales del inventario, como el consumo de recursos y las emisiones a la atmósfera son asignados a las categorías de impacto seleccionados en el paso 1, de acuerdo con su capacidad para contribuir a diferentes problemas ambientales (Hauschild & Huijbregts, 2015).

c) Cálculo de los resultados del indicador de categoría (Caracterización).

Para cada flujo elemental asignado a una categoría de impacto, la cantidad se multiplica con un factor de caracterización. El factor de caracterización para un flujo primario proporciona una representación cuantitativa de su importancia para una categoría de impacto específica. La puntuación resultante para el indicador se expresa en una métrica común a todas las contribuciones dentro de la categoría de impacto, por ejemplo en términos de kg de CO₂ equivalente para la contribución de una emisión de metano procedente de la producción de 1 kg de arroz al calentamiento global. Las puntuaciones del indicador para todos los flujos elementales que contribuyen a una categoría de impacto específica se suman para llegar a una puntuación total de impacto para esa categoría de impacto (Hauschild & Huijbregts, 2015).

Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental (comúnmente llamado punto final de categoría o “endpoint”), o bien, considerar los efectos intermedios (puntos medios de categoría o “midpoint”). Los puntos medios de categoría se hallan más cercanos a la intervención ambiental, permitiendo, en general, modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención. Éstas proporcionan una información más detallada de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Los puntos finales de categoría son variables que afectan directamente a la sociedad, por tanto su elección resultaría más relevante y comprensible a escala global. Sin embargo, la metodología para cuantificar el efecto de los puntos finales no está plenamente

elaborada ni existe suficiente consenso científico necesario para recomendar su uso. Por todo ello, actualmente, es más común recurrir a categorías de impacto intermedias (Ecoraee, 2013).

Mientras que los tres primeros pasos del EICV son obligatorios para estar en el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14044, los dos siguientes pasos descritos por Hauschild & Huijbregts, (2015), son opcionales:

d) Cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría con respecto a la información de referencia (Normalización).

Las puntuaciones de los indicadores resultantes de la etapa de caracterización se reportan en métricas que difieren entre las distintas categorías de impacto. Con el fin de obtener una primera impresión de sus magnitudes relativas, se pueden expresar en relación a una escala de referencia en común que se encuentra disponible para todas las categorías de impacto. Una elección frecuente de escala de referencia es el impacto anual de una persona promedio para cada una de las categorías de impacto. Para este caso, la normalización expresa las diferentes categorías en equivalentes persona o persona año, lo cual puede apoyar la comprobación de resultados inconsistentes y ayuda a la comunicación de los resultados. Además, la normalización se puede usar como preparación para una ponderación de los resultados de los indicadores.

e) Conversión de los resultados de los indicadores de diferentes categorías de impacto usando factores numéricos basados en opciones de valor (Ponderación).

Una ponderación se puede realizar con el fin de apoyar una comparación final de resultados de los indicadores a través de categorías de impacto, aplicando factores de ponderación que se basan en el opciones y representan la importancia asignada a cadauna de las categorías de impacto. La Ponderación puede ser necesaria para concluir estudios donde existen traslapes entre resultados para las diferentes categorías de impacto, por ejemplo, la comparación entre fósiles combustibles con una contribución principal al calentamiento global y biocombustibles con principales contribuciones a los impactos del uso de la tierra y el agua (Herrmann et al., 2013). Después de la

ponderación, los resultados pueden ser agregados a través de las categorías de impacto a una sola puntuación con el fin de facilitar la interpretación.

Un ejemplo esquemático del proceso de EICV se muestra en la Figura 2-6.

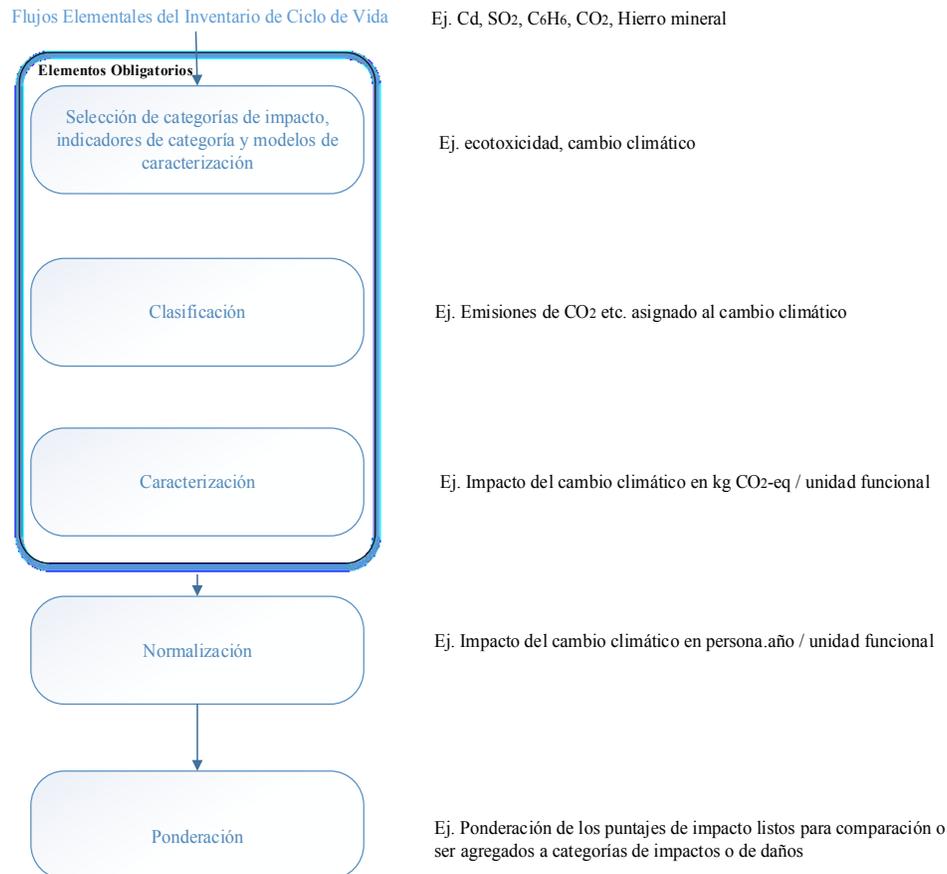


Figura 2-6 Los Cinco Pasos de la Fase de EICV.
Fuente: Adaptado de Hauschild & Huijbregts, (2015)

2.2.2.4 Interpretación del ciclo de vida.

Esta es la fase final del análisis del ACV, donde los resultados de las fases precedentes son evaluados juntos, en consonancia con los objetivos definidos en el estudio, para poder establecer las conclusiones y recomendaciones finales. Para ello se incluyen diversas técnicas como el análisis de sensibilidad sobre los datos utilizados, análisis de la relevancia de las etapas del proceso, análisis de escenarios alternativos, etc (Gazulla, 2013).

3 DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

A continuación se realizará una breve descripción del proyecto en estudio, al cual se le aplicará el ACV, el alcance y la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El edificio de Residencias Estudiantiles es un proyecto residencial que se desarrollará dentro del Campus Universitario del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consta de un área total de 6532 m², que se compone de un área constructiva de 3757 m² y áreas complementarias de 2775 m².

El proyecto consta de cuatro niveles con 12 dormitorios por piso para 4 personas cada uno. En total son 48 habitaciones compartidas que albergarán a un total de 192 estudiantes universitarios. En cada nivel se cuenta áreas comunes que incluyen: dos baterías de servicios sanitarios (para hombres y para mujeres respectivamente), una sala de estudio, dos áreas de cocina y comedor, gradas de emergencia y principales, elevador, cuarto de tableros, lavandería, oficina para la administración y pasillos de circulación. Cada habitación cuenta con servicio sanitario y baño, cama, clóset, escritorio y refrigeradora. El periodo constructivo se estima del mes de mayo del 2015 a julio del 2016.

Las necesidades energéticas en la etapa de ocupación del edificio son agua caliente, consumo eléctrico de cocina, electrodomésticos e iluminación. Sin embargo en el diseño se implementaron técnicas constructivas sostenibles como las siguientes:

- Implementación de tecnologías de ahorro energético para como calentadores solares de tipo forzado para el uso del agua caliente, sensores de iluminación en los pasillos y ventilación natural.
- Utilización de accesorios para el ahorro de agua como inodoros de doble descarga y orinales secos.
- Utilización de materiales constructivos con poca o nula necesidad de mantenimiento, para minimizar el impacto ambiental durante la fase de ocupación del edificio.

3.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El proyecto se ubica en la zona del distrito 01 Oriental y 09 Dulce Nombre, del cantón 01 Cartago, provincia 03 Cartago. Específicamente, en el costado noroeste del Campus Universitario del Instituto Tecnológico de Costa Rica, tal como se muestra en la figura 3-1. Según Benavides (2013), el ámbito local, generado a partir de la hoja topográfica Istarú escala 1:50.000, del Instituto Geográfico Nacional, se encuentra delimitado por las coordenadas geográficas correspondientes a los puntos extremos de la propiedad en donde se sitúa el proyecto, estas coordenadas son las siguientes:

- | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 545 890 E, 204 860 N | 3) 546 818 E, 204 452 N | 5) 546 409 E, 204 179 N |
| 2) 546 542 E, 204 594 N | 4) 546 894 E, 204 096 N | 6) 545 756 E, 204 342 N |



Figura 3-1 Ubicación del Proyecto Edificio de Residencias Estudiantiles.
Fuente: Benavides D. (2013)

3.3 INFRAESTRUCTURA A DESARROLLAR

El edificio se considera a nivel estructural como tres edificios independientes unidos por juntas de construcción: una parte central con dos alas iguales de dormitorios, pero ubicadas en forma de espejo en planta (Carranza, 2012). Las Figuras 3-2 y 3-3 muestran las vistas de planta y arquitectónica del edificio de Residencias Estudiantiles.



**Figura 3-2 Vista de Planta del Proyecto Edificio de Residencias Estudiantiles.
Fuente: Benavides, D. (2013).**



**Figura 3-3 Vista Arquitectónica del Edificio de Residencias Estudiantiles.
Fuente: Fernández & Orozco (2013).**

Los materiales predominantes de la estructura a desarrollar, de acuerdo a las especificaciones del proyecto son concreto de 280 kg/cm² en el caso de cimentaciones, columnas, vigas y muros de concreto. Para contrapisos se consideró 210 kg/cm².

La estructura también cuenta con bloques de concreto y de arcilla, acero estructural para las vigas y placas de apoyo, y acero de refuerzo como varillas.

3.4 SERVICIOS BÁSICOS

El plan de gestión ambiental establecido por el TEC (Benavides, 2013), establece los lineamientos para los servicios básicos en las etapas de construcción y ocupación del edificio, los cuales se enlistan a continuación.

3.4.1 Agua Potable

El suministro de agua potable del proyecto tanto en su fase de construcción como en la fase de operación, será abastecido por medio del acueducto municipal de Cartago.

3.4.2 Energía Eléctrica

En lo relativo al suministro de energía eléctrica, el proyecto durante sus fases de construcción y ocupación se abastecerá de la red existente, la cual es suplida por Junta Administradora de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC).

Según Mora (2016), para el año 2015 JASEC cubrió la demanda con fuentes propias un 38,51% y compró un 61,49% al ICE. Las fuentes propias se componen de cinco plantas hidroeléctricas pequeñas: dos de ellas de tipo filo de agua y tres con un pequeño embalse. Se espera que, con los proyectos de expansión, a partir del 2017 JASEC pueda abastecer un 82% de su demanda, comprándole al ICE tan sólo un 18% (Fornaguera, 2015).

Por su parte el ICE utiliza tanto fuentes de generación propia como privada, por lo que su composición eléctrica es mucho más diversa. Durante el año 2015 su matriz eléctrica se compuso de un 75,53% de fuentes hidroeléctricas, un 12,88% de energía geotérmica, un 9,81% eólica, un notorio 1,05% de fuentes térmicas o hidrocarburos y el restante porcentaje de fuentes solares y biomásicas (Arias, 2015). Tal como se observa en la figura 3-4, esta

matriz no se espera que sufra cambios significativos para el periodo 2014-2035, según las proyecciones recomendadas en el Plan de Expansión Eléctrica (ICE, 2014).

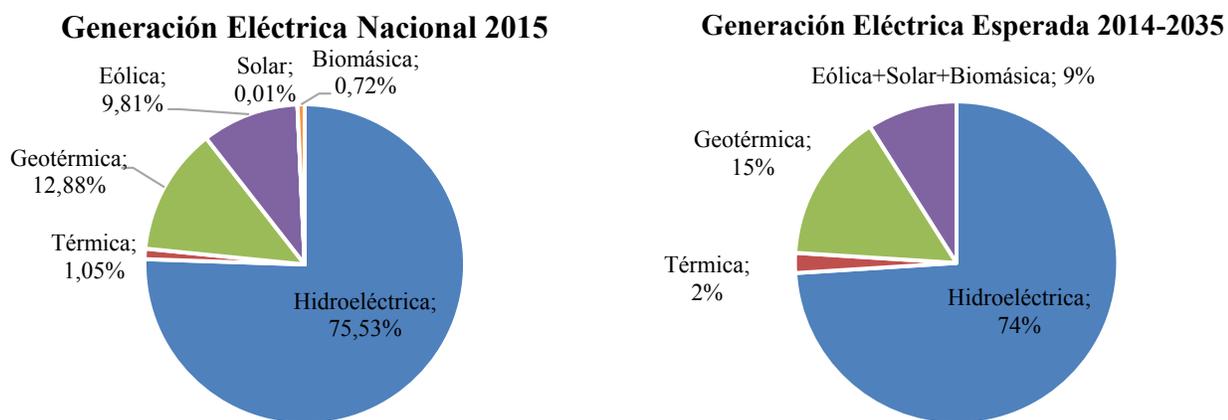


Figura 3-4 Composición de la Generación Eléctrica en Costa Rica en el Año 2015, y Esperada para el 2014-2035.
Fuente: Adaptado de Arias (2015) e ICE (2014).

Para el año 2015, la generación por fuentes hidroeléctricas se compuso de un 53,7% de plantas con embalse y un 43,7% de plantas tipo filo de agua según datos de la ARESEP (2015).

3.4.3 Aguas Residuales

Para darle un apropiado tratamiento a las aguas residuales (aguas negras y servidas) que se generen durante la construcción y ocupación del nuevo edificio, el plan de gestión ambiental prevé la utilización de la planta de tratamiento del TEC.

3.4.4 Aguas Pluviales

Las aguas pluviales se conducirán al sistema de alcantarillado interno del Campus Universitario, que desfoga en el río Toyogres.

3.4.5 Manejo de Residuos Sólidos

3.4.5.1 Fase de Construcción

Durante la fase de construcción, el contratista es el encargado de la gestión de sus residuos, y será supervisado por la Regencia Ambiental del TEC.

El plan de manejo ambiental establecido por el contratista se enfoca en la implementación de las “tres R’s”: Reducir, Reutilizar y Reciclar, con el fin de minimizar al máximo sus residuos. Según este plan, los residuos generados se clasificarán en un centro de acopio de acuerdo al tipo: ordinarios, de obra, tóxicos y reciclables. Los materiales que no se puedan reutilizar, y que son reciclables se dispondrán en sitios internos dentro del Campus del TEC previamente designados, para ser enviados a las recicladoras correspondientes, de acuerdo al programa de manejo de residuos institucional. Los materiales que no pueden ser reutilizados o reciclados se considerarán como desechos y se dispondrán en el relleno sanitario Los Pinos, mediante el servicio de recolección que provee la Municipalidad de Cartago (Arce & Sáenz, 2015).

En el Cuadro 3-1 se detalla el manejo de los residuos durante la etapa constructiva del edificio, según el plan de manejo ambiental del contratista.

Cuadro 3-1 Manejo de Residuos Sólidos Durante la Construcción.
Fuente: Adaptado de Arce & Sáenz (2015).

Residuo	Características	Fuente generadora	Almacenamiento temporal	Disposición Final
Tierra	Partículas de material	Movimiento de tierras	No se almacenará en el proyecto, se transportará inmediatamente	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos.
Residuos capa vegetal	Material sólido con vegetación	Movimiento de tierras	No se almacenará en el proyecto, se transportará inmediatamente	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Troncos	Piezas de diferentes dimensiones	Movimiento de tierras	No se almacenará en el proyecto, se transportará inmediatamente	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos

Continuación del Cuadro 3-1

Residuo	Características	Fuente generadora	Almacenamiento temporal	Disposición Final
Ramas de árboles	Piezas de diferentes dimensiones	Movimiento de tierras	No se almacenará en el proyecto, se transportará inmediatamente	Relleno sanitario Los Pinos
Piedras, Rocas	Piezas de diferentes dimensiones	Movimiento de tierras	No se almacenará en el proyecto, se transportará inmediatamente	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Residuos de madera	Tablones, reglas, venillas, tablillas de diferentes dimensiones	Construcción de las obras temporales, desencofrado de formaleta, cajas de equipos	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Restos de tubería plástica	Pedazos de tubería de diferentes dimensiones	Construcción de las obras temporales, instalaciones eléctricas y mecánicas	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Restos cables eléctricos	Colas de cables de diferentes longitudes	Montaje del sistema eléctrico	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Escombros y restos de concreto	Restos de polvo de concreto quebrado, cemento y material particulado	Sobrante en las chorreas. Cambios en la construcción	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Residuos orgánicos	Residuos de alimentos	Comedor	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Residuos sanitarios	Restos de papel higiénico	Sanitarios temporales	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Residuos de cartón y papel	Pedazos de cajas cartón y papel de desecho	Trabajo en oficinas, cajas de materiales y equipos	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Residuos de plástico	Restos de bolsas, envases de botellas no contaminadas	Oficinas, comedores, embalajes de materiales y equipos	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Metales	Cabos de varilla, de perling, de mallas, placas metálicas	Trabajos de armadura, estructura metálica,	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos

Continuación del Cuadro 3-1

Residuo	Características	Fuente generadora	Almacenamiento temporal	Disposición Final
Sacos de cemento	Bolsas de papel en pedazo que contienen restos de cemento	Elaboración de concreto para construcción	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Restos de divisiones livianas	Cabos de láminas de fibrocemento, gypsum	Elaboración de paredes livianas	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos
Restos de vidrio	Pedazos de vidrio de diferentes dimensiones	Montaje de vidrios, residuos generados en oficinas y comedor	Centro de acopio	Sitios internos autorizados dentro del campus del TEC, o relleno sanitario Los Pinos
Restos de cielo, fibra mineral	Pedazos de láminas de cielo, de diferentes dimensiones	Montaje de cielo suspendido	Centro de copio	Relleno sanitario Los Pinos
Material con aceites o combustibles	Trapos, arena con líquidos impregnados, recipientes de sustancias	Trabajos de pintura	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos. Los recipientes con sustancias serán devueltos en la medida de lo posible a sus proveedores.
Otros	Materiales no catalogados	En función del material	Centro de acopio	Relleno sanitario Los Pinos

Cabe resaltar que la disposición final de los residuos puede variar, si al momento de su descarte se considera una mejor opción para su tratamiento y gestión.

3.4.5.2 Fase de ocupación

Durante la fase de ocupación del edificio se buscará brindar una gestión responsable a los residuos sólidos generados por medio de prácticas de separación en la fuente y reciclaje de los residuos sólidos valorizables.

Según el Programa Estado de la Nación (2012), el índice de generación per cápita es de 0,63 kg/hab día. La composición porcentual típica de los residuos sólidos para una zona urbana como la del edificio se muestra en la figura 3-5.

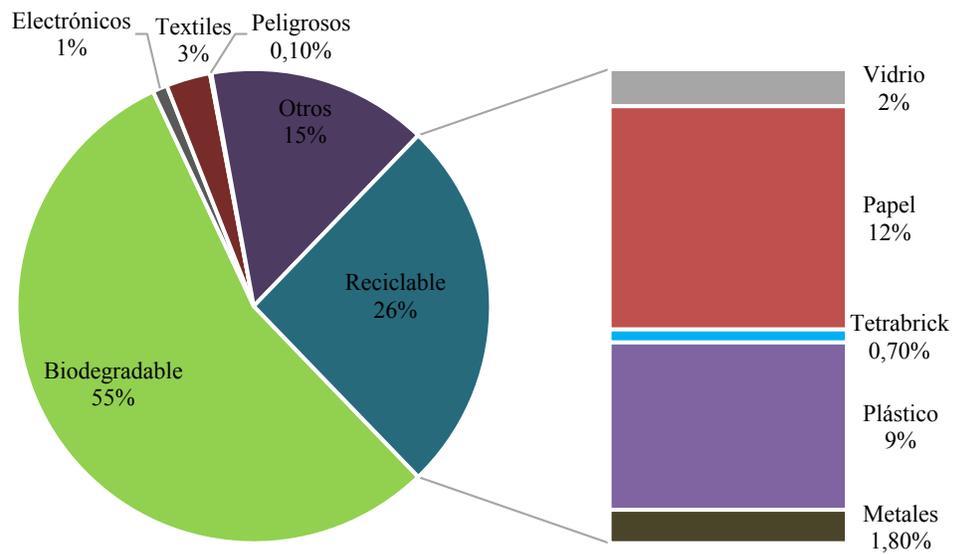


Figura 3-5 Composición Porcentual de los Residuos Sólidos Urbanos de Costa Rica.
Fuente: Adaptado de Programa Estado de la Nación (2012).

Los residuos reciclables se gestionarán por medio del programa de manejo de residuos institucional. Se dispondrá del servicio municipal para la recolección de los residuos ordinarios biodegradables y no valorizables.

4 METODOLOGÍA

La metodología para elaboración de este estudio se divide en las siguientes cinco etapas:

4.1 DEFINICIÓN DEL PLANTEAMIENTO Y ALCANCE DEL ACV

En concordancia con la metodología especificada en la ISO 14040 y 14044, se definió el alcance del estudio (I etapa del ACV) con el fin de asegurar que la amplitud, profundidad y nivel de detalle del estudio sean compatibles con los objetivos establecidos.

4.1.1 Unidad Funcional

La unidad funcional para este estudio se definió de la siguiente manera:

“Ofrecer un edificio habitacional de 6532 m² que sirva como residencia para la comunidad estudiantil con condición socioeconómica limitada del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por un periodo de 60 años.”

4.1.2 Flujo de Referencia

Para cada fase del ciclo de vida del edificio se estableció el flujo de referencia (FR) que satisface la unidad funcional. Se define como procesos, las entradas y salidas de la materia, energía o emisiones recopiladas en el inventario.

- Fase de producción de materias primas

$$FR = \text{Cantidad de Material} \times \text{Peso unitario}$$

- Fase de construcción

$$FR = \sum \text{Procesos mensuales}$$

- Fase de Ocupación

$$FR = \sum \text{Procesos anuales} \times \text{Vida Útil del Edificio}$$

4.1.3 Sistema de Producto y Límites del Sistema

El sistema de producto en estudio es el edificio de residencias estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica, cuya principal función es ser un espacio de convivencia sana para la comunidad estudiantil con condición socioeconómica limitada.

Los límites del sistema contemplaron el análisis detallado de tres etapas del ciclo de vida del edificio: producción de materias primas, construcción y ocupación. La fase de fin de vida del edificio se excluyó del alcance del estudio, debido a la incertidumbre en la gestión de los residuos de demolición.

La figura 4-1 representa el diagrama de flujo del proceso en estudio. En él se identificaron los procesos unitarios involucrados, así como las entradas (energía, agua, materiales) y salidas de flujos elementales (residuos y emisiones) en cada fase del ciclo de vida. También se señalan los límites del sistema previamente definidos:



Figura 4-1 Diagrama de Flujo del ACV del Edificio.

4.1.4 Procedimientos de Asignación y Criterios de Corte

Como criterio de corte se evaluaron los materiales y materias primas que representan un peso mayor a 0,05% del peso total, ya que materiales con pesos menores a este valor no influyen significativamente en los resultados. No obstante se procuró que la suma de los elementos descartados no fuera mayor a un 5% del total de los materiales del inventario. Además se incluyeron materiales que aunque tuvieran un peso no significativo, tuvieran una cierta relevancia en términos ambientales.

4.1.5 Categorías de Impacto Seleccionadas y Metodología de Evaluación de Impacto

El método de evaluación de impacto utilizado fue ReCiPe, ponderación jerárquica (H), el cual es uno de los más comunes encontrados en la literatura, y es el método recomendado por el Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) para América Latina.

Este método cuenta con 18 categorías de impacto *midpoints*, los cuales son relativamente robustos, y tres puntos finales *endpoints* que son fáciles de interpretar: daños a la salud humana, daños al ecosistema, y disponibilidad de recursos.

Los factores de caracterización empleados provienen del método de evaluación elegido.

La Figura 4-2 muestra la manera en que los *midpoints* y *endpoints* se relacionan entre sí con los datos del inventario, para el método ReCiPe.

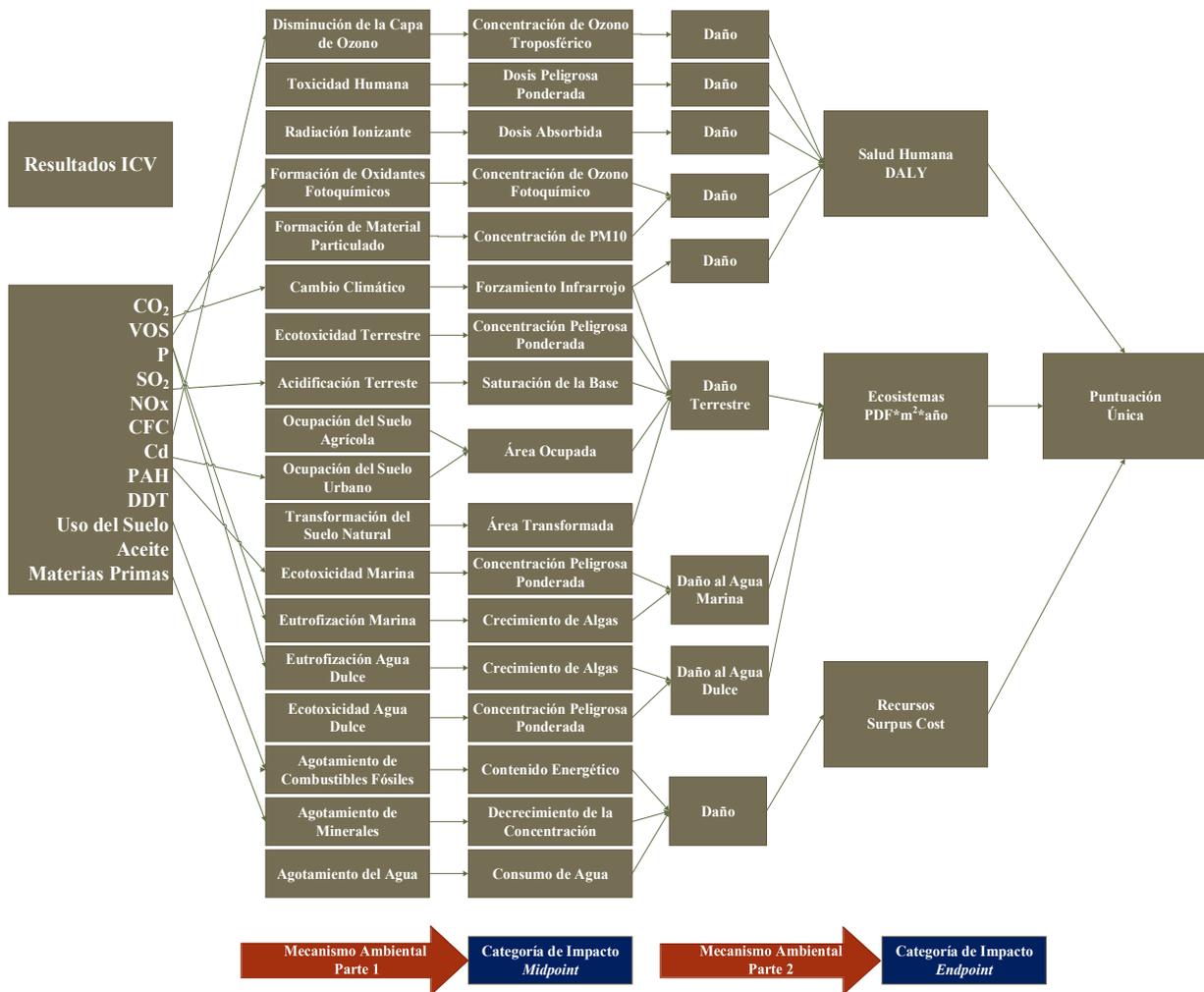


Figura 4-2 Categorías de Impacto y Caminos Cubiertos por la Metodología ReCiPe.
Fuente: Adaptado de JRC (2010).

Se seleccionaron 14 categorías de impacto ambiental para este análisis en específico. Su relación a los daños ambientales se muestra en el Cuadro 4-1.

Cuadro 4-1 Categorías de Impacto y Daños Seleccionados para el Análisis.

Daño	Impacto Ambiental	Sigla
Salud Humana	Disminución de la Capa de Ozono	CO
	Formación de Oxidantes Fotoquímicos	OF
	Cambio Climático	CC
	Toxicidad Humana	TH
Ecosistema	Acidificación Terrestre	AT
	Ocupación del Suelo Agrícola	OA
	Ocupación del Suelo Urbano	OU
	Eutrofización del Agua Dulce	EU
	Ecotoxicidad del Agua Dulce	EC
	Ecotoxicidad Terrestre	ET
Recursos	Transformación del Suelo Natural	TN
	Agotamiento de Combustibles Fósiles	CF
	Agotamiento del Agua	AA
	Agotamiento de Minerales	AM

La metodología de la fase de evaluación de impacto incluyó las fases de clasificación y caracterización que son las obligatorias para todo análisis de ACV.

4.1.6 Requisitos Iniciales de la Calidad de los Datos

Las consideraciones referentes a la recolección de los datos son las siguientes:

- Los flujos de entrada y salida recopilados en las diferentes fases del ciclo de vida están debidamente respaldados por la fuente donde se tomaron.
- Los datos no sobrepasan los 5 años de emitidos. Además se procuró que fueran válidos dentro del país.
- Los materiales compuestos con un peso mayor a 0,05% del total se desglosaron por sus componentes y se evaluó el peso de cada componente por separado.
- La información obtenida puede ser reproducida para futuros estudios.

4.1.7 Suposiciones

Las siguientes son las suposiciones tomadas durante el análisis:

- Se asumieron las principales rutas de transporte de carga pesada en el país para el transporte de la materia prima hasta el sitio constructivo.
- El transporte de materias primas se estimó únicamente desde su sitio de fabricación o principal distribuidor en Costa Rica hasta el sitio constructivo, excluyendo el transporte a intermediarios como distribuidores mayoristas, depósitos y ferreterías.
- Se asumió para todos los casos un transporte de carga de 16 a 32 toneladas métricas, bajo la normativa EURO III, pues en general la flota vehicular de Costa Rica se compone de tecnologías iguales o inferiores a esta.
- Se determinó un consumo eléctrico y de agua durante la fase de ocupación, de acuerdo a los datos especificados en el diseño y la capacidad del edificio.
- Se consideró que la cantidad de agua residual generada durante la fase ocupacional es equivalente al consumo de agua calculado, multiplicado por un factor de retorno.
- Se estableció una vida útil del edificio de 60 años.

4.1.8 Limitaciones

Se enuncian a continuación las principales limitaciones dentro del estudio:

- Como principal limitación del estudio se encuentra la dificultad del acceso a la información para realizar el ACV. Muchas empresas consideran que la información solicitada es de carácter confidencial por lo que prefieren retener la información.
- Muchos proveedores no cuentan con la información clara y cuantificable que se necesita para este tipo de análisis; por ejemplo, la procedencia exacta de sus materias primas, tipo de transporte, especificaciones técnicas y descripción de los procesos de producción de materiales. Por esta razón se tomaron datos de segundo plano (base de datos internacionales) para la fase de producción de materias primas, lo cual encarece la precisión de los resultados.
- Debido a la falta de información por parte de los proveedores sobre la procedencia exacta de sus materiales importados, se omitió la contabilización del transporte de materiales a nivel internacional.

- Debido a que no se contó con información sobre las rutas de transporte del personal al sitio, se omitió esta entrada como flujo de energía durante la fase constructiva.
- Al no existir actualmente una directriz clara sobre el manejo y disposición de los desechos de construcción en Costa Rica, se decidió excluir la fase de fin de vida del edificio del alcance del estudio.

4.2 ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

Se realizó una recopilación de información sobre las entradas y salidas en cada una de las fases del ciclo de vida: producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio. El detalle de la información recolectada se enuncia a continuación.

4.2.1 Fase de Producción de Materias Primas

Para esta primera fase se creó la lista de materiales para la construcción, basada en el presupuesto previamente realizado para la obra. Para determinar las características de los diferentes materiales se contactó a los principales proveedores del país y se les solicitó la ficha técnica. En algunos casos se solicitó la ficha de seguridad para los materiales correspondientes.

Con esta información se determinó el tipo, la cantidad y peso de las materias primas y materiales requeridos para la construcción del edificio.

Se utilizó la información de la base de datos internacional Ecoinvent versión 3, para determinar las materias primas, el consumo de recursos y las necesidades energéticas para cada uno de los materiales necesarios para la construcción.

Por último, para generar una mejor visualización de los resultados en la fase de EICV, los materiales se clasificaron en las siguientes categorías: minerales, metales, orgánicos, plásticos, maderas, pinturas y revestimientos, cerámicos y vidrio.

4.2.2 Fase de Construcción

Para esta fase se cuantificaron las entradas y salidas generadas durante el periodo de construcción del edificio de mayo 2015 a julio 2016. La metodología utilizada para cada entrada o salida se amplía a continuación.

4.2.2.1 Transporte de materias primas

Mediante la herramienta *Google Maps* se determinó la distancia recorrida de cada material desde el sitio de manufactura o principal centro de distribución hasta la construcción, utilizando las principales rutas de transporte costarricense. Se omitieron los posibles intermediarios (depósitos mayoristas, ferreterías, etc.). Con esta información se realizó el siguiente cálculo, el cual expresa el transporte en unidades de toneladas por kilómetro recorrido (tkm):

$$T = \sum D \times P$$

Donde: T =Transporte de la materia prima (tkm)

D = Distancia recorrida (km)

P =Peso del material (ton)

4.2.2.2 Consumo de agua y electricidad

Se recopiló la información reportada en los informes mensuales de la Regencia Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica durante la etapa de construcción del edificio. Debido a que al momento del estudio el edificio se encontraba aún en construcción, se hizo una estimación de los consumos de los meses faltantes, según las actividades programadas en el cronograma del proyecto. El consumo de agua se reportó en m³ totales, y el consumo eléctrico se reportó en kWh.

Con el fin de generar un modelo más cercano a la realidad, se realizó un análisis para estimar la composición de la generación eléctrica suministrada durante el periodo constructivo. Para ello se consultó a especialistas en el tema y se recopiló información de la generación eléctrica del ICE Y JASEC del año 2015.

El cálculo de la energía consumida del edificio por tipo de energía se muestra a continuación.

$$C_E = C \times P$$

Donde: C_E =Consumo eléctrico por tipo de energía (kWh)

C = Consumo eléctrico total durante la construcción (kWh)

P =Porcentaje de tipo de energía (%)

4.2.2.3 Consumo de combustibles fósiles

Para la obtención de esta información se evaluó la información reportada por la empresa constructora en los informes mensuales de la Regencia Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde se reporta el tipo y cantidad de litros de combustibles fósiles consumidos por los equipos para la construcción.

4.2.2.4 Generación de residuos sólidos

Se recopiló el tipo, la cantidad y destino final de los desechos sólidos generados durante la fase constructiva, mediante los informes mensuales de la Regencia Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Los residuos fueron reportados en kg totales.

4.2.2.5 Generación de aguas residuales ordinarias

Para determinar la generación de aguas residuales ordinarias durante la fase de construcción, fue necesario establecer el tipo de aparatos sanitarios temporales y sus volúmenes de descarga, el consumo hídrico aproximado por persona en la obra y la cantidad de personal mensual.

Para obtener el consumo hídrico por persona se consultó al personal la frecuencia y duración diaria de uso de los aparatos sanitarios. El cálculo se realizó de la siguiente forma:

$$C = \sum F \times V$$

Donde: C = Consumo hídrico por persona ($m^3/p d$)

F = Frecuencia diaria de uso del aparato sanitario ($p^{-1}d^{-1}$)

V =Volumen de descarga del aparato sanitario (m^3)

Cabe destacar que el volumen de descarga de cada aparato sanitario se estimó por medio de fichas técnicas si existiesen, o promedios de consumos estimados.

Al multiplicar el consumo hídrico por persona por la cantidad de personal mensual y el número de días laborados al mes, se obtiene el volumen mensual de aguas residuales, tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$V_m = \sum C \times N \times D$$

Donde: $V_m =$ Volumen mensual de aguas residuales (m^3)

$C =$ Consumo hídrico por persona ($m^3/p d$)

$N =$ Cantidad de personal mensual (p)

$D =$ Días laborados por mes (d)

. La sumatoria de los volúmenes mensuales da como resultado el volumen total de las aguas residuales generadas durante el proceso constructivo.

$$V_T = \sum V_m$$

Donde: $V_T =$ Volumen total de aguas residuales (m^3)

4.2.2.6 Transformación del suelo urbano

Se contabilizaron también los impactos ambientales relacionados a la transformación del suelo urbano para la construcción, tomando en cuenta el área total del proyecto.

4.2.3 Fase de Ocupación

Para la etapa de ocupación del edificio se estimaron los siguientes datos, tomando en cuenta el diseño y la capacidad máxima del edificio, durante una vida útil de 60 años.

4.2.3.1 Consumo de agua

Para la determinación de la demanda de agua potable fue necesario establecer el tipo de aparatos de consumo a instalarse en el edificio y sus volúmenes de descarga, en base a los planos del edificio. También fue necesario calcular el consumo hídrico típico de los residentes estudiantiles. Para ello se realizó una encuesta a 100 estudiantes del edificio de residencias actualmente existente, donde se les consultó la frecuencia y duración de uso diario de los aparatos de consumo. Se calculó el consumo hídrico por persona de forma similar al consumo hídrico en la fase de construcción del edificio. El resultado se multiplicó por la capacidad máxima de residentes durante la fase de ocupación, y la vida útil del mismo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{AP} = \sum C \times P \times V \times 365$$

Donde: V_{AP} = Volumen Total de agua potable (m^3)

C = Consumo hídrico por persona ($m^3/p d$)

P = Capacidad máxima de residentes (p)

V = Vida útil del edificio (años)

El resultado se convirtió a kg, utilizando la densidad típica del agua, para que el dato fuera asimilable por el software.

4.2.3.2 Consumo eléctrico

Se basó en el diseño eléctrico previamente aprobado para determinar la demanda eléctrica total del edificio durante su vida útil. El cálculo de dicho parámetro se muestra a continuación:

$$D = P \times F_P$$

Donde: D =Demanda eléctrica total (kW)

P = Potencia nominal aparente total (kVA)

F_P = Factor de potencia

La demanda resultante se multiplicó por el tiempo proyectado, para obtener el consumo en kWh de los 60 años de vida útil del edificio. Este consumo se desglosó por tipo de energía, según la proyección de la generación eléctrica nacional para ese periodo de tiempo.

4.2.3.3 Generación de aguas residuales ordinarias

El volumen del agua residual generada durante la fase de ocupación del edificio se obtuvo mediante el siguiente cálculo:

$$V_{AR} = V_{AP} \times F_R$$

Donde: V_{AR} = Volumen total de agua residual (m^3)

V_{AP} = Volumen total de agua potable (m^3)

F_R = Factor de retorno

Se consideró un factor de retorno de 0,85. Este corresponde a la fracción porcentual típica del consumo total de agua potable utilizada en actividades domésticas y que se transforma en agua residual.

4.2.3.4 Generación de residuos sólidos

La determinación de la generación de residuos sólidos durante la fase de ocupación del edificio, se realizó en base a la composición nacional de la generación de residuos sólidos y el índice de generación per cápita reportado en el Programa Estado de la Nación (2012). La generación de residuos se estimó mediante el siguiente cálculo:

$$G = I \times P$$

Donde: G = Generación de residuos ($kg/día$)

I = Índice de generación per cápita (kg/p día)

P = Capacidad máxima de residentes (p)

Con esta información se determinaron las toneladas de residuos por tipo, generados durante 60 años de vida útil del edificio.

4.2.3.5 Insumos para dar mantenimiento al edificio

Debido a las características de diseño propias de este edificio, el mantenimiento anual se considera mínimo o nulo, por lo tanto este rubro no se contempló durante la modelación del ACV del edificio.

4.2.4 Procesamiento de la Información

Mediante la elaboración de una hoja de cálculo en Excel para cada fase del ciclo de vida, los datos recopilados se convirtieron a unidades asimilables por el software SimaPro 8.0.5.

4.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO

Se utilizó la herramienta SimaPro 8.0.5, al ser uno de los softwares más populares a nivel mundial para la realización de ACV, gracias a su flexibilidad, robustez y confiabilidad.

En el programa se crearon las tres fases del ACV en estudio. En cada una se ingresaron los datos resultantes del inventario, según fueran entradas o salidas del proceso.

Se utilizó las bases de datos de inventarios internacionales incluidos en el software para lograr una mejor aproximación a los flujos de recursos de cada entrada o salida. Se priorizó en la utilización de la base de datos Ecoinvent versión 3, la cual es la base de datos más utilizada a nivel mundial para los estudios de ACV. Esta base de datos tiene la característica de que la información se encuentra referenciada a una ubicación geográfica específica. Debido a que actualmente no existen bases de datos validadas para Latinoamérica, se utilizaron datos con la designación “Resto del Mundo” (o “ROW” por sus siglas en inglés), que aplica para ubicaciones no incluidas en la base de datos. De esta forma se logró ajustar el estudio a la ubicación geográfica correspondiente.

Se efectuó la EICV en la etapa de caracterización para las siguientes fases del ciclo de vida: producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio. Se excluyó la fase de disposición final.

Por último, para obtener un análisis general del impacto ambiental del edificio, se realizó una EICV de tipo comparativa que incluyó las tres fases en estudio.

4.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En esta etapa se determinaron los impactos ambientales potenciales más significativos de cada una de las EICV realizadas. Se analizó la influencia de los flujos de entradas o salidas en las categorías de impacto seleccionadas, en base a la referencia bibliográfica existente a nivel nacional como internacional.

4.5 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Con el fin de verificar los resultados del estudio se realizaron dos tipos de análisis, utilizando la herramienta SimaPro 8.0.5.

4.5.1 Análisis de Contribución

Mediante un análisis individual de las categorías de impacto, se determinó qué flujos (entradas y salidas) están jugando un papel importante en los resultados para cada una de las fases del ACV en estudio.

4.5.2 Análisis de Monte Carlo

Para realizar el análisis de Monte Carlo, primeramente se determinó la incertidumbre de cada uno de los datos del inventario de ACV, por medio de indicadores de calidad de los datos. Estos se añaden a una distribución logarítmica normal que será evaluada mediante el método estadístico Monte Carlo.

Los indicadores de calidad incluidos en el software son: "Fiabilidad", "Integridad", "Correlación Temporal", "Correlación Geográfica", y "Correlación Tecnológica". Cada indicador tiene cinco niveles de calidad, con una puntuación entre 1 y 5. De acuerdo con ello, se le atribuye la suma de las cinco puntuaciones a cada entrada o salida del inventario.

A cada puntuación, el software le otorga una incertidumbre con distribución normal, un valor medio de cero y una varianza a partir de la opinión de expertos. La incertidumbre general se incrementa por la adición de distribuciones normales a la distribución normal subyacente derivada de una incertidumbre predeterminada, según el tipo de dato.

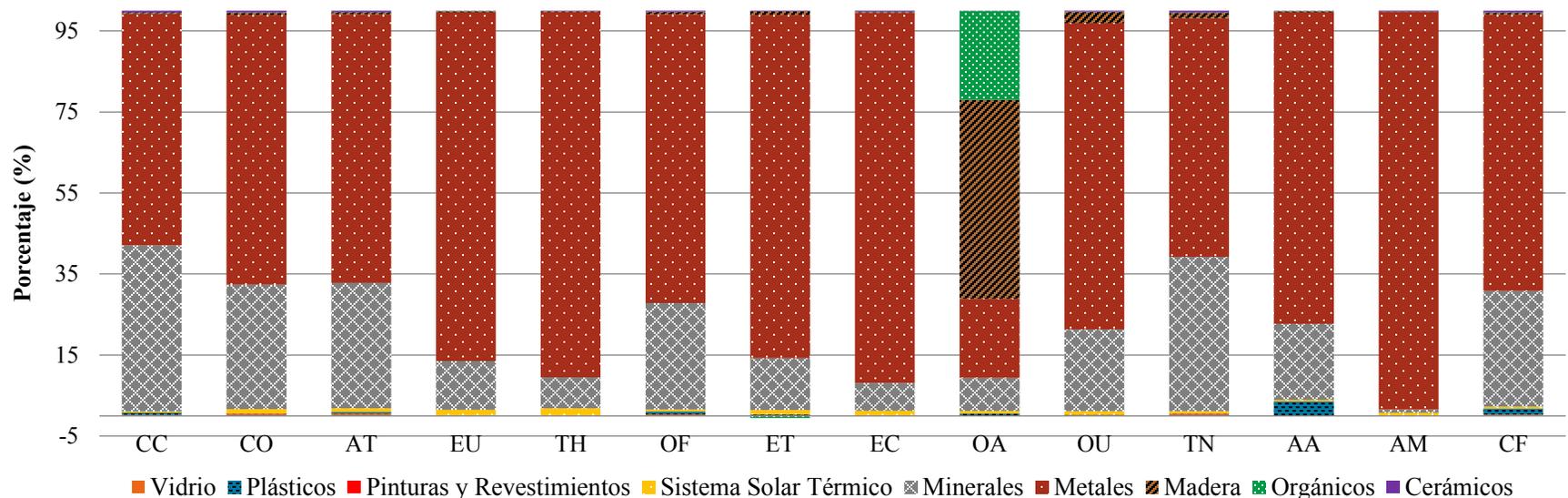
El análisis de Monte Carlo generó números aleatorios para cada uno de los datos del inventario. Se realizó un número de 1000 corridas con un 95% de confianza. Con ello se generó una gráfica con barras de error donde se muestra el intervalo de confianza de los resultados del inventario para cada uno de los impactos ambientales analizados.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describen los resultados de las entradas y salidas recopiladas durante el estudio. Además se brinda una interpretación de la EICV de cada una de las fases del ciclo de vida del edificio y un análisis comparativo de los impactos en cada una de ellas. Por último se realizará un análisis de incertidumbre de los resultados obtenidos.

5.1 FASE DE PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Los resultados del inventario y los modelos creados para la fase de producción de materias primas se muestran en el Apéndice 1, cuadros A.1.1 y A.1.2. La EICV para los materiales del edificio se muestra en la Figura 5-1.



CC: Cambio Climático, CO: Disminución de la Capa de Ozono, AT: Acidificación Terrestre, EU: Eutrofización del Agua Dulce, TH: Toxicidad Humana, OF: Formación de Oxidantes Fotoquímico, ET: Ecotoxicidad Terrestre, EC: Ecotoxicidad Agua Dulce, OA: Ocupación Suelo Agrícola, OU: Ocupación Suelo Urbano, TN: Transformación de Suelo Natural, AA: Agotamiento de agua, AM: Agotamiento de Minerales, CF: Agotamiento Combustibles Fósiles

Figura 5-1 EICV de la Fase de Producción de Materias Primas del Edificio.

La utilización de bases de datos internacionales permitió cuantificar los impactos desde la extracción de las materias primas, pasando por los procesos de transformación y concluyendo con la fabricación de los materiales evaluados.

Se observa en la figura 5-1 que para la gran mayoría de los impactos ambientales evaluados, los materiales que poseen la carga ambiental más alta (mayor a un 57%) son los que se encuentran dentro de la categoría “Metales”; por ejemplo las varillas, mallas electrosoldadas, y la tubería estructural de hierro. La materia prima del acero es el arrabio, el cual tiene un proceso de producción en altos hornos que típicamente genera emisiones considerables de gases de efecto invernadero, partículas con minerales y aguas residuales especiales. Los efluentes generados durante el tratamiento de los minerales son caracterizados como residuos peligrosos y generan altos impactos potenciales en las categorías de eutrofización del agua dulce, toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre y del agua dulce. La figura 5-1 también refleja el agotamiento de minerales debido a la producción de metales. Un análisis más detallado de esta categoría permitió determinar que los procesos más influyentes son la extracción de manganeso para la producción de los recubrimientos de acero inoxidable y la extracción de coque para la producción de arrabio.

El segundo lugar con una huella ambiental alta, le corresponde a la categoría “Minerales”, que incluye materiales como concreto de varias resistencias, bloques de concreto y arcilla, entrepisos, arena y cemento. La industria cementera es la responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Boesch & Hellweg, 2010). El proceso de calcinación contribuye a la mitad de estas emisiones y el resto proviene de la quema de combustibles fósiles en los hornos para obtener la energía requerida del proceso (Huntzinger & Eatmon, 2009). El empleo de combustibles fósiles representa también un impacto alto en las categorías de transformación de suelo natural y agotamiento de combustibles fósiles. Sin embargo, para el caso de Costa Rica, es posible que la huella ambiental de la producción de cemento sea menor gracias a la implementación del coprocesamiento, donde se utilizan residuos como sustituto de materias primas y combustibles no renovables.

La EICV efectuada para la fase de producción de materias primas también destaca una contribución significativa de las categorías “Madera” y “Orgánicos” al impacto ambiental de ocupación del suelo agrícola. Esto se debe al cambio de uso de suelo que se debe hacer para la producción de las materias primas para la fabricación de las puertas, componentes de madera y el zacate.

También se observa una influencia significativa de la categoría “Plásticos” a los impactos ambientales de agotamiento de combustibles fósiles y del agua. Debido a que la materia prima principal es el petróleo, es de esperarse un impacto potencial por agotamiento de hidrocarburos. Por otra parte, el proceso de producción de PVC es el más influyente en la categoría de agotamiento del agua, debido a que involucra el consumo de una cantidad significativa de este recurso.

El sistema solar de tipo térmico influye en varias categorías de impacto, siendo las más significativas las de toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre. Esto se debe a la influencia de los procesos de producción de los componentes del sistema. Estos componentes son: una carcasa de aluminio anodizado, absorbedores en placa de aluminio, tubería de cobre, y vidrio temperado. Todos ellos involucran la extracción y el procesamiento de minerales, generando una serie de compuestos tóxicos con potencial de afectar agua, el suelo y la salud humana.

Debido a las características del diseño del edificio, se manejaron volúmenes pequeños de pinturas y revestimientos, por lo que su contribución a la carga ambiental de los materiales utilizados en el edificio no es significativa. Sin embargo su mayor porcentaje de impacto se encuentra en la categoría ecotoxicidad terrestre debido a su composición química característica.

Otro material que tiene una participación pequeña en la carga ambiental son los componentes de vidrio. El proceso de fabricación de vidrio conlleva procesos con un alto consumo de energía, generalmente proveniente de combustibles fósiles y un alto potencial de generación de emisiones, como óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y

partículas (Ministerio de Medio Ambiente, 2007). Por esta razón es de esperarse su influencia en las categorías de acidificación terrestre, oxidación fotoquímica y agotamiento de combustibles fósiles.

Por otra parte el análisis muestra una carga ambiental evitada de un -1% de la categoría “Orgánicos” en el impacto ecotoxicidad terrestre, que corresponde al uso de materiales orgánicos, en este caso zacate, para las áreas verdes.

5.2 FASE DE CONSTRUCCIÓN

La fase de construcción se inició en mayo del 2015 y su finalización estaba prevista para julio del 2016, por lo que al momento del estudio se contó con datos reales de los meses de mayo 2015 a febrero 2016.

A continuación se mostrarán los resultados para cada entrada o salida analizada.

5.2.1 Consumo Eléctrico

La proyección del consumo se realizó para los meses de marzo a julio del 2016, según las actividades previstas. Los resultados se muestran en la figura 5-2 y 5-3.

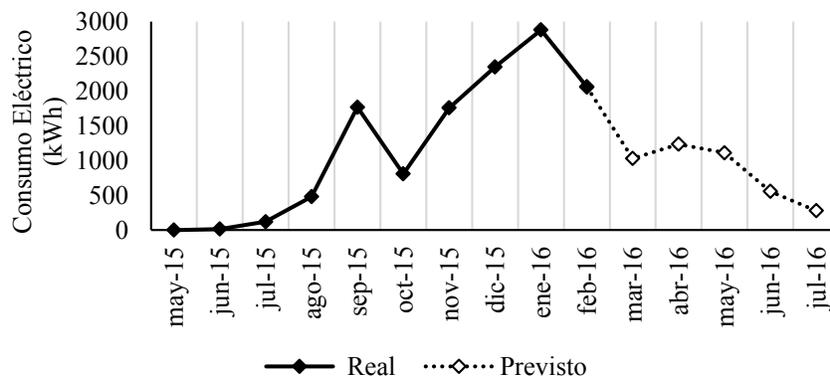


Figura 5-2 Consumo Eléctrico Real y Previsto Para la Fase de Construcción del Edificio.

El inicio de la obra contempló la construcción de las obras temporales y el movimiento de tierras, por lo que el consumo eléctrico fue muy bajo. A partir de junio comenzó la construcción de los cimientos y la estructura del edificio. Esto involucra un incremento paulatino del consumo eléctrico por las labores de bombeo de concreto, uso de

grúa, y maquinaria eléctrica como batidoras, compactadoras y equipo de soldar. En junio se inició el armado y colocación del acero de placas y vigas de amarre. Posteriormente se realizó el colado del concreto y se inició la colocación de las columnas y muros estructurales del primer nivel. En julio se instalaron las vigas de concreto reforzado del primer nivel así como los entrepisos del segundo nivel. Se continuó con la colocación de las columnas y muros estructurales del segundo nivel. Para el mes de agosto se colocó el entrepiso del tercer nivel y las columnas y muros estructurales del tercer nivel. En septiembre se continúa con la colocación de las vigas en concreto reforzado para el tercer nivel, y el entrepiso del cuarto nivel. En el mes de octubre se da una disminución en el consumo eléctrico debido al inicio de la construcción de obras estructurales secundarias como el área del ascensor, las escaleras principales, contrapisos y mampostería de arcilla para todos los niveles. Sin embargo el consumo sigue aumentando en los meses de noviembre y diciembre pues aún se deben colocar las columnas, los muros estructurales y las vigas corona del cuarto nivel. Para el mes de enero se finaliza la construcción de la obra gris y se inicia la fase de colocación de paredes internas y acabados, por lo que se prevé un descenso progresivo del consumo eléctrico. Se comienza con la colocación de la estructura y forros de paredes livianas para el primer nivel y segundo nivel. Esta labor se extiende a febrero. En febrero también se coloca la estructura del techo. Para el mes de marzo se inicia la colocación de la estructura y forros de paredes livianas para el tercer nivel y cuarto nivel. Durante los meses de abril y mayo se espera un aumento del consumo eléctrico debido a las labores de construcción de obras perimetrales como muros de contención, calles y aceras. También se iniciará la instalación de los sistemas pluviales, eléctricos, de agua caliente, telecomunicaciones y contra incendio. Paralelamente se iniciarán los repellos y empastados de las paredes livianas de cada piso. Los acabados de cielos, pisos y ventanería se iniciarán a finales de mayo y continuarán en junio, así como el pintado de las paredes repelladas, y el sellado de las paredes, columnas y vigas expuestas. Esto explica la disminución drástica en el consumo eléctrico. La entrega del edificio está planificada para julio del 2016.

En total se estimó un consumo eléctrico de 16 449,80 kWh durante la fase constructiva del edificio, el cual como se explicó antes es suministrado por JASEC. Sin embargo proviene de dos proveedores con matrices eléctricas diferentes.

Se procedió a determinar el porcentaje de contribución de cada tipo de energía suministrada en base a la composición de la generación eléctrica reportada por ambos proveedores para el 2015. Debido a que los embalses de JASEC son muy pequeños, se asumió que su matriz energética para el 2015 se compuso de energía hidroeléctrica tipo filo de agua.

Los resultados de la composición de la generación eléctrica total para la fase de construcción del edificio se muestran en el cuadro 5-1.

Cuadro 5-1 Composición Eléctrica Estimada Durante la Fase de Construcción del Edificio.

Empresa	Cobertura 2015	Generación 2015 (MWh)	Tipo de Energía	Composición de la Generación Eléctrica 2015
ICE	61,49%	379 996,19	Hidroeléctrica Filo de Agua	24,94%
			Hidroeléctrica Embalse	21,50%
			Térmica	0,65%
			Geotérmica	7,92%
			Eólica	6,03%
			Solar	0,01%
			Biomásica	0,44%
JASEC	38,51%	237 984,28	Hidroeléctrica Filo de Agua	38,51%
TOTAL	100,00%	617 980,48		100,00%

Nota: Los datos de la generación del 2015 fueron suministrados por Mora (2016).

Estos resultados son aproximados ya que como lo explica la Dirección de Comunicación e Identidad Corporativa del ICE (2015), las matrices eléctricas cambian día a día y el dato real suele ser diferente al estimado.

El consumo eléctrico en kWh, por tipo de generación, obtenido al multiplicar el consumo eléctrico estimado durante la fase constructiva por el porcentaje de la composición eléctrica, se puede consultar en el Apéndice 2, Cuadro A.2.2, donde se especifica además los modelos utilizados en el software.

5.2.2 Consumo de Agua

Un análisis similar al efectuado para el consumo eléctrico se realizó para el consumo de agua durante la etapa constructiva, como se muestra en la figura 5-3.

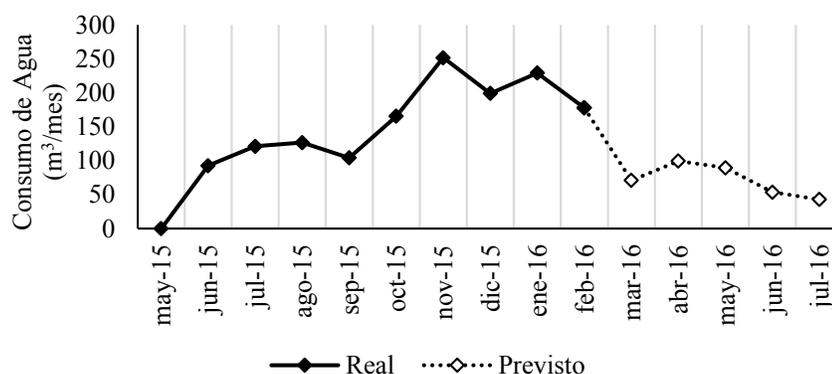


Figura 5-3 Consumo de Agua Real y Previsto Para la Fase de Ocupación del Edificio.

Como es de esperar, durante la construcción de las obras temporales y movimiento de tierras no se reporta un consumo de agua significativo. A partir del mes de junio se comienza a registrar un alza en la demanda de agua, debido a la instalación y uso de aparatos de consumo provisionales (servicios sanitarios, lavatorios, ducha y orinal) y el inicio de construcción de la obra gris.

Las actividades constructivas que tienen una mayor demanda de agua son las realizadas entre los meses de junio y diciembre, donde se realiza la fabricación, chorrea y el curado del concreto. A partir de febrero del 2016 se estima una disminución significativa del consumo de agua debido al inicio de la instalación de obras menores que no requieren altos consumos de agua. Sin embargo la construcción de las obras exteriores planificadas para iniciar en abril, y el incremento de personal especializado para la instalación de los diferentes sistemas se estima que generarán un aumento significativo en el consumo. Conforme se concluyan las actividades, se dará una disminución paulatina en el consumo debido a la salida del personal.

En total el consumo de agua resultante fue de 1 826,08 m³, los cuales se convirtieron a kg para ser ingresados al software, asumiendo una densidad de 1 kg/L.

5.2.3 Generación de Residuos Sólidos

Gracias al establecimiento de las prácticas de reducción y reuso desde el inicio del proyecto, se logró minimizar la generación de los residuos a niveles muy por debajo de los esperados para un proyecto de esta magnitud.

La cantidad de residuos sólidos generados en esta etapa se constituyó mayoritariamente de residuos inertes (piedras y lastre), residuos de madera y residuos sólidos ordinarios (orgánicos y sanitarios). No se reportó la generación de escombros y residuos de concreto ya que estos se incorporaron a la construcción de obras menores como gaviones y aceras. Una parte de la madera residual se donó a empresas externas para ser utilizados como combustible en hornos, mientras que la otra fue enviada a rellenos sanitarios. Los recipientes con pinturas y sustancias químicas, se devolvieron a sus respectivos proveedores. El papel y cartón se donaron a estudiantes del TEC, y los sacos de cemento fueron reutilizados como relleno en los contrapisos. Los resultados se pueden consultar en el Apéndice 2 Cuadro A.2.1.

5.2.4 Generación de Aguas Residuales Ordinarias

Para la determinación del agua residual ordinaria generada, se estimó el consumo hídrico del personal en el sitio constructivo. Los resultados se muestran en el cuadro 5-2.

Cuadro 5-2 Determinación del Consumo Hídrico por Persona Durante la Fase de Construcción del Edificio.

Aparato de Consumo	Tipo/Modelo	Frecuencia de uso (p ⁻¹ d ⁻¹)	Volumen de descarga (L)	Consumo hídrico (L/p día)
Ducha	Aspersión	0	0	0
Lavamanos	Llave	3	1,7	5
Servicio Sanitario	Tanque, modelo Hábitat American Standard	2	6	12
Orinal	Por goteo	3	2,5	7,5
TOTAL				24,5

El resultado del consumo hídrico total mensual, considerando que la jornada laboral es de seis días por semana, fue de 588 L/p mes.

Para la determinación de la cantidad de personal mensual, se recopiló la información de mayo del 2015 hasta febrero del 2016. Para los meses de marzo a julio 2016 se hizo una estimación en base a las actividades planificadas anteriormente analizadas y el rendimiento

de mano de obra según la actividad. El flujo de personal resultante se muestra a continuación en la figura 5-4.

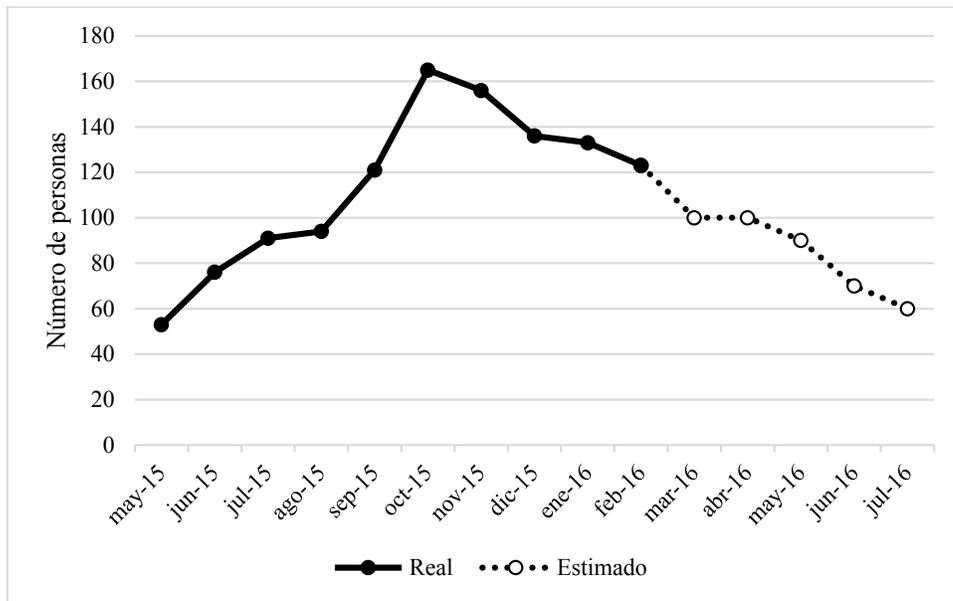


Figura 5-4 Flujo de Personal Durante la Fase de Construcción del Edificio.

La sumatoria de los volúmenes mensuales de agua residual, dio como resultado un total de 890,82 m³ de aguas residuales ordinarias durante la fase de construcción del edificio.

5.2.5 Consumo de Combustibles Fósiles, Transporte de Materias Primas y Transformación del Suelo Urbano.

Como resultado del cálculo del transporte de materias primas al sitio constructivo se obtuvo un total de 562 614,76 tkm. Se asumió un sólo tipo de transporte de carga pesada de 16 a 32 toneladas métricas, con tecnología EURO 3.

El consumo de combustibles fósiles reportado durante la fase constructiva en los informes de la Regencia Ambiental fue de 4008 L de diésel, los cuales fueron transformados a MJ, utilizando una densidad de 840,70 kg/m³ establecida en el Manual de Productos de Recope (2011) y un poder calorífico típico de 43,0 MJ/kg.

El área total del proyecto, utilizada para la estimación de los impactos ambientales portenciales relacionados a la transformación del suelo urbano fue de 6532 m².

5.2.6 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida en la Fase de Construcción

Los resultados del inventario de la fase constructiva se pueden observar en el Apéndice 2. La información recolectada permitió generar la EICV que se muestra en la Figura 5-5.

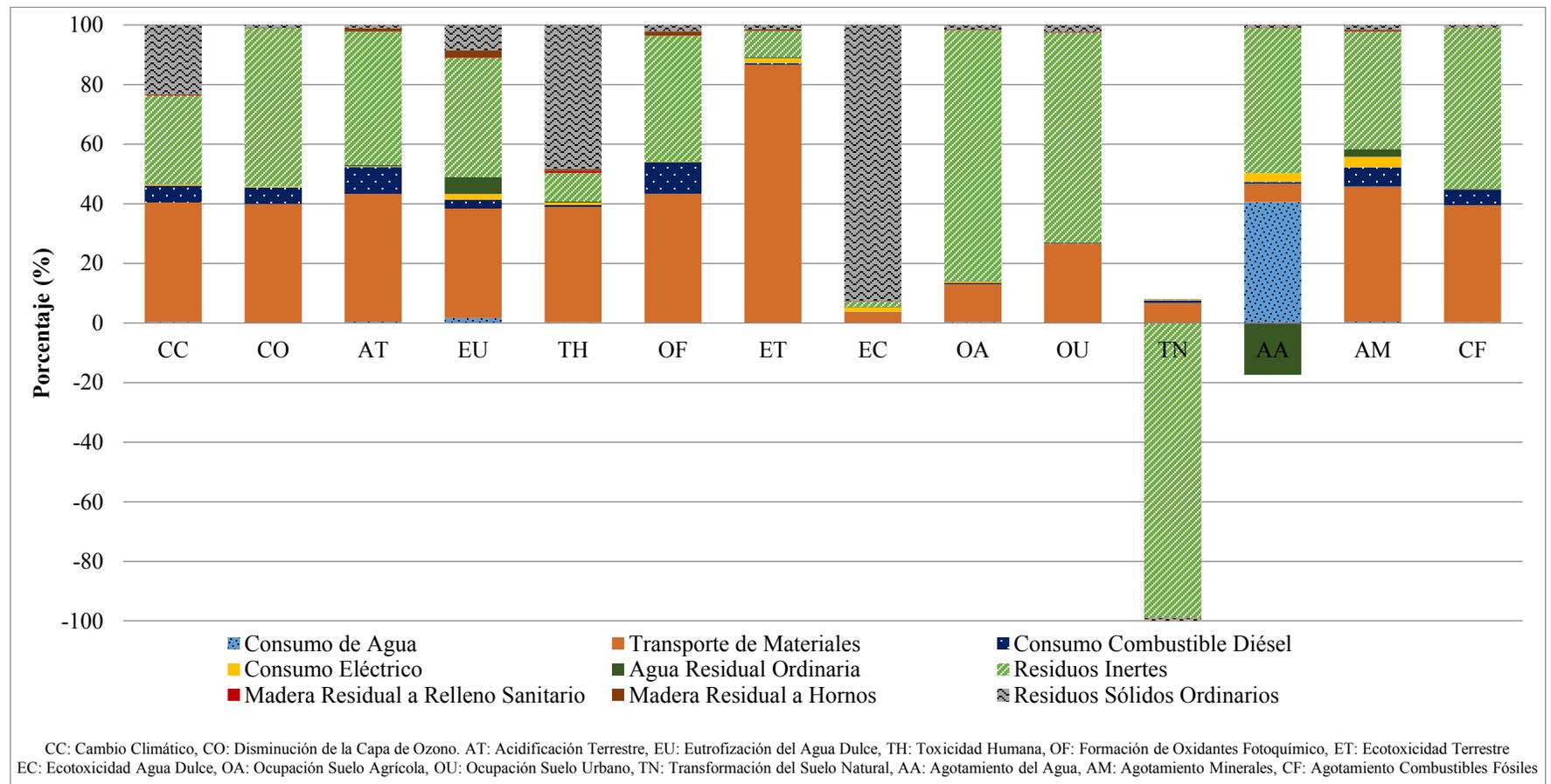


Figura 5-5 EICV de la Fase de Construcción del Edificio.

Como se observa en la Figura 5-5, existen dos actividades que generan los mayores impactos ambientales en la fase constructiva: el transporte de los materiales de la fábrica al sitio y la disposición de los residuos inertes en el relleno sanitario.

Se ha discutido ampliamente sobre las implicaciones ambientales que generan los transportes abastecidos con combustible diésel. Según un estudio del ICTJA (2006), los vehículos diésel causan hasta cuatro veces más contaminación atmosférica que los abastecidos con gasolina. Esto porque emiten niveles muy superiores de dióxido de nitrógeno (NO₂) y partículas en suspensión. Estas últimas son más pesadas que las emitidas por vehículos de gasolina, por lo cual tienden a caer más rápido, impactando el suelo y las fuentes de agua superficiales. Aunado a esto hay otros muchos elementos contaminantes procedentes del sector transporte. En concreto, entre un 15% y un 25% de las partículas en suspensión atribuibles al tráfico proceden del desgaste de frenos, embragues y neumáticos (Cano, 2014).

Por otra parte, los grandes volúmenes de material inerte (tierra, piedras y escombros) removidos durante la construcción del edificio generan impactos ambientales diversos, siendo los más significativos los relacionados a la ocupación del suelo urbano y agrícola. Es claro que se debe destinar espacios alternativos para la disposición de este tipo de residuos, pues al poseer volúmenes tan altos, tal como lo menciona la UICN (2011), reducen la vida útil de los rellenos sanitarios.

La disposición de los residuos sólidos ordinarios en rellenos sanitarios genera impactos significativos en varias categorías de impacto, como ecotoxicidad y toxicidad humana, debido al potencial de generación de gases y lixiviados tóxicos. El tratamiento típico de los lixiviados no elimina sustancias tóxicas con plomo, arsénico, níquel, entre otros metales, contaminando el suelo y las aguas subterráneas y superficiales. Además, numerosos estudios indican que los gases que emanan de los rellenos sanitarios contienen contaminantes tóxicos que pueden provocar cáncer y asma, entre otros efectos graves en la salud (Greenpeace, 2008). Por otra parte, la influencia de la disposición de los residuos sólidos en la categoría de cambio climático se debe al potencial de generación de emisiones

de GEI, en su mayoría metano, producto de la descomposición de la materia orgánica. Después del CO₂, el metano ocupa el segundo lugar en cuanto a GEI causados por las actividades humanas. Además tiene un potencial de calentamiento global 23 veces mayor (Methane Markets Partnership, 2008).

En la categoría de agotamiento del agua, aparecen otros procesos influyentes, como el consumo de agua potable que demanda la construcción del edificio, el cual fue ampliamente explicado en el capítulo 5.2.2. Otro contribuyente a esa huella ambiental es el consumo eléctrico. Esto se debe a que la composición de la matriz eléctrica costarricense, al provenir mayoritariamente de fuentes hidroeléctricas tipo embalse, genera un impacto ambiental significativo en la disponibilidad de este recurso.

Con respecto a cargas ambientales evitadas (representadas con valores negativos en el gráfico), se evidencia que algunas prácticas implementadas generan un impacto positivo durante la fase constructiva del edificio. Una de ellas es la disposición de los residuos inertes en un relleno sanitario, que se ve reflejada con un valor de -99%, en la categoría de impacto de transformación del suelo natural. El relleno sanitario es considerado un buen sitio de disposición final para este tipo de residuos, ya que sirven como material de cobertura, sin experimentar transformaciones, físicas, químicas o biológicas significativas, por lo que su toxicidad residual es mucho menor al de otro tipo de residuos. Como menciona la UICN (2011), de los diferentes destinos clandestinos de los escombros, dos pueden ser bastante problemáticos: la descarga en pendientes y terrenos inseguros donde se generan depósitos inestables que pueden provocar deslizamientos, y la descarga en tierras bajas junto a drenajes o inclusive directamente en el lecho de los ríos, donde se puede provocar cauce e inundaciones.

También la figura 5-5 le otorga un pequeño porcentaje favorable (-1%) al destino de los residuos sólidos ordinarios en el relleno sanitario, en la categoría de transformación del suelo natural. Este método de tratamiento, operado adecuadamente, acelera la biodegradación de los desechos y mantiene el control de la generación de moscas y malos olores que se generarían sin ningún tipo de tratamiento.

Se observa otro resultado favorable en cuanto a cargas ambientales evitadas, debido al tratamiento de las aguas residuales ordinarias mediante el sistema de tratamiento de aguas residuales del TEC. La evaluación le otorga un valor de -17% en la categoría de agotamiento del agua, debido a que esta práctica en una PTAR que opere adecuadamente, logra disminuir las características fisicoquímicas y biológicas de las aguas residuales a valores compatibles con la vida acuática, antes de su vertido en algún cuerpo receptor.

5.3 FASE DE OCUPACIÓN

Los cálculos durante la fase de ocupación se estimaron para 60 años de vida útil. A continuación se enunciarán los resultados de las entradas y salidas para esta etapa.

5.3.1 Consumo Eléctrico

El diseño electromecánico del edificio cuenta con cinco tableros principales, llamadas 1TP, 2TP, 3 TP, 4TP, CM y ASC. En los planos se establecen sus respectivas potencias nominales o de uso. Se utilizó un factor de potencia (Fp) de 0,95 según el criterio del diseñador de proyecto. Los resultados proyectados a 60 años de consumo se muestran en el cuadro a continuación.

Cuadro 5-3 Determinación del Consumo Eléctrico en la Fase de Ocupación del Edificio.

Tableros Principales	1TP	2TP	3TP	4TP	CM	ASC
Potencia Nominal Aparente (kVA)	115	115	115	115	28	10
Potencia Nominal Aparente Total (kVA)	498					
Demanda Eléctrica Total (kW)	473,1					
Consumo Eléctrico Total (kWh)	248 661 360					

Abreviaturas: 1TP: Primer tablero principal, 2TP: Segundo tablero principal, 3TP: Tercer tablero principal, 4TP: Cuarto tablero principal, CM: Cuarto de máquinas, ASC: Ascensor

En base a las proyecciones esperadas por el ICE Y JASEC para el año 2017 en adelante, se procedió a establecer el consumo eléctrico esperado por tipo de generación. Los resultados se muestran en el cuadro 5-4.

Cuadro 5-4 Composición Eléctrica Estimada Durante la Fase de Ocupación del Edificio.

Empresa	Cobertura Esperada	Generación Estimada Futura (MWh)	Tipo de Energía	Composición de la Generación Eléctrica Esperada
ICE	18%	125 539	Hidroeléctrica Filo de Agua	5,40%
			Hidroeléctrica Embalse	7,92%
			Térmica	0,36%
			Geotérmica	2,70%
			Eólica	1,26%
			Solar	0,18%
			Biomásica	0,18%
JASEC	82%	571 900	Hidroeléctrica Filo de Agua	34,34%
			Hidroeléctrica Embalse	47,66
TOTAL	100,00%	697 439		100,00%

Nota: El cálculo de la generación estimada futura se realizó con datos del Plan de Expansión de la Generación Eléctrica, 2014-2035, ICE (2014).

El consumo eléctrico en kWh, por tipo de generación, para la fase de ocupación del edificio se puede consultar en el Apéndice 3, Cuadro A.3.2, donde se especifican además los modelos utilizados en el software.

5.3.2 Consumo de Agua

La encuesta realizada a 100 estudiantes del edificio de residencias actualmente existente, permitió determinar la frecuencia y duración de uso de los aparatos de consumo y con ello calcular el consumo hídrico tal como se muestra en el cuadro 5-5.

Cuadro 5-5 Determinación del Consumo Hídrico por Persona Durante la Fase de Ocupación del Edificio.

Aparato de Consumo	Tipo	Frecuencia de uso (p ⁻¹ d ⁻¹)	Duración (min)	Volumen de descarga (L)	Consumo hídrico (L/p día)
Ducha	Aspersión	1	8	80	80
Lavamanos	Llave	3	0,25	2,5	7,5
Servicio Sanitario	Tanque	3	NA	6	18
Lavadora	Tanque	0,142	NA	60	8,52
Fregadero	Llave	2	6	60	120
TOTAL					234

Nota: El resultado de la frecuencia de uso de la lavadora fue de 1 lavado semanal por persona, la cual se dividió entre 7 para obtener la frecuencia de uso diaria.

El consumo hídrico total se multiplicó por 60 años de vida útil del edificio y por la capacidad máxima de ocupación de 192 personas. Se le añadió un 10% más por concepto de desperdicios, visitas y labores de mantenimiento. Se obtuvo un volumen de agua de

consumo durante la fase de ocupación del edificio de 1 082 408,03 m³, los cuales se convirtieron a kg asumiendo una densidad del agua de 1 kg/L.

5.3.3 Generación de Aguas Residuales Ordinarias

El volumen de agua residual generada, equivalente al 85% del volumen consumido durante la fase de ocupación del edificio, tuvo un valor de 1 532 047,06 m³.

5.3.4 Generación de Residuos Sólidos

El cuadro 5-6 muestra los resultados del cálculo de la generación de residuos sólidos, asumiendo la capacidad máxima del edificio de 192 personas y un índice de generación per cápita de 0,63 kg/persona-día. Se contempló el reciclaje como tratamiento de los residuos valorizables. Los residuos no valorizables tienen como destino el relleno sanitario.

Cuadro 5-6 Generación de Residuos Sólidos y Tratamiento Durante la Fase de Ocupación del Edificio.

Tipo de Residuo	Composición	Generación Diaria (kg/día)	Generación Total (TON)	Tipo de Tratamiento
Vidrio	2,0%	2,42	52,98	Reciclaje
Papel	12,0%	14,52	317,88	Reciclaje
Plástico	9,0%	10,89	238,41	Reciclaje
Tetrabrik	1,0%	1,21	26,49	Reciclaje
Metales	2,0%	2,42	52,98	Reciclaje
Biodegradable	55,0%	66,53	1456,96	Relleno Sanitario
Otros	19,1%	23,10	505,96	Relleno Sanitario
TOTAL	100%	121,08	2651,67	

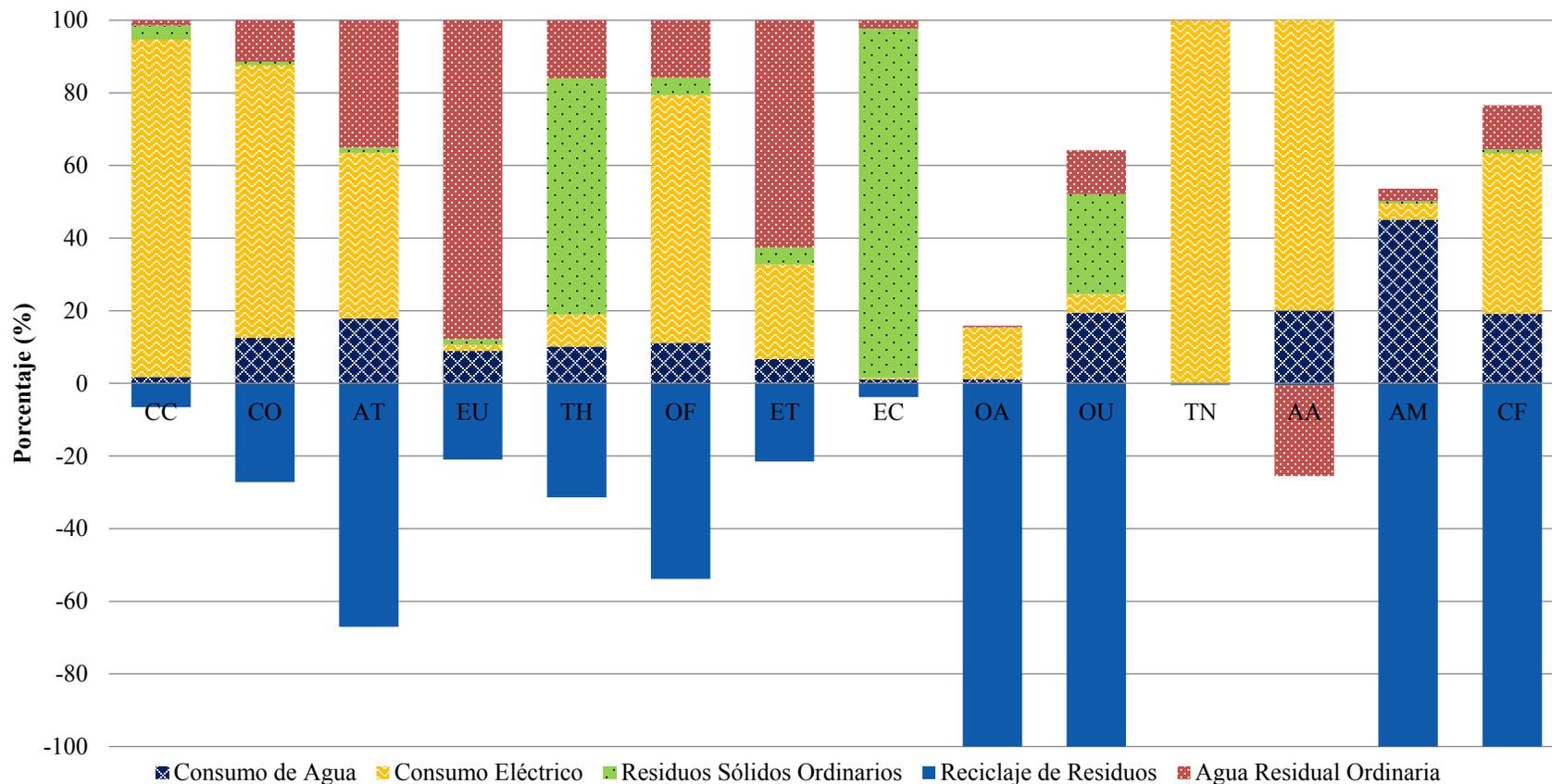
Nota: Dentro de la categoría “Otros” se incluyeron los residuos ordinarios peligrosos, textiles, sanitarios y no valorizables.

La generación total corresponde a la cantidad de residuos generados durante los 60 años de vida útil del edificio. Los modelos utilizados para la caracterización se pueden consultar en el Apéndice 3 Cuadro A.3.1.

Cabe resaltar que los cálculos se basaron en fuentes de datos a nivel nacional. Para obtener una mejor aproximación de la generación y composición es necesario realizar un estudio de composición de los residuos sólidos del edificio de residencias estudiantiles en su etapa de ocupación. Además habría que considerar los periodos de vacaciones y verano donde, al trasladarse los estudiantes, disminuye notablemente la generación de residuos.

5.3.5 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida en la Fase de Ocupación

La Figura 5-6 muestra los resultados de la EICV en la fase de ocupación del edificio. Los resultados del inventario utilizados para el gráfico se encuentran en el Apéndice 3.



CC: Cambio Climático, CO: Disminución de la Capa de Ozono, AT: Acidificación Terrestre, EU: Eutrofización del Agua Dulce, TH: Toxicidad Humana, OF: Formación de Oxidantes Fotoquímico, ET: Ecotoxicidad Terrestre, EC: Ecotoxicidad Agua Dulce, OA: Ocupación Suelo Agrícola, OU: Ocupación Suelo Urbano, TN: Transformación Suelo Natural, AA: Agotamiento Agua, AM: Agotamiento de Minerales, CF: Agotamiento Combustibles Fósiles

Figura 5-6 EICV de la Fase de Ocupación del Edificio.

Como se observa en la Figura 5-6, el consumo eléctrico es uno de los procesos que genera la mayor contribución a los impactos ambientales aquí analizados. La generación eléctrica con cualquier fuente energética o tecnología produce impactos, ya que el ciclo de vida contempla el uso de combustibles, la construcción de la planta, la producción propiamente de la electricidad, la disposición de desechos a lo largo de su vida útil y la desinstalación. Es por eso que aun matrices energéticas mayoritariamente renovables, como es el caso de Costa Rica se generan altos impactos ambientales (ICE, 2014).

Las huellas ambientales más significativas del proceso consumo eléctrico se encuentran en las categorías de transformación del suelo natural y afectación al cambio climático. Se le atribuyen mayoritariamente a la generación de energía hidroeléctrica, ya que como se explicó en la sección 3.4.2, este tipo de energía se proyecta como la más utilizada durante este periodo. Es de esperarse un impacto ambiental alto con respecto al cambio del uso del suelo, debido al área necesaria para la producción de energía hidroeléctrica tipo embalse.

Otras categorías donde el consumo eléctrico tiene una carga ambiental significativa es la disminución de la capa de ozono y la formación de oxidantes fotoquímicos. Estas dos categorías se le atribuyen mayoritariamente a la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. En términos de generación de emisiones, el ICE le atribuye 17 ton CO₂equiv/GWh a la energía hidroeléctrica, 600 ton CO₂equiv/GWh a la energía térmica (motores a media velocidad con bunker), y 90 ton CO₂equiv/GWh correspondiente a la energía geotérmica (ICE, 2014).

El siguiente proceso con mayor impacto ambiental potencial es la generación de aguas residuales ordinarias. Las principales categorías influenciadas son la eutrofización del agua dulce (85%), ecotoxicidad terrestre (63%) y acidificación terrestre (31%). No obstante se observa una carga ambiental evitada de -25%, en la categoría de agotamiento del agua, gracias a la planificación de su tratamiento, mediante sistema de tratamiento de aguas residuales del TEC.

Los residuos sólidos ordinarios (biodegradables y otros), generaron un impacto significativo en las categorías de toxicidad humana (65%), ecotoxicidad del agua dulce

(96%) y ocupación del suelo urbano (27%), debido a que al no ser tratados su destino final es el relleno sanitario. Como se explicó anteriormente esta tecnología de tratamiento genera compuestos líquidos y gaseosos tóxicos que ponen en peligro la salud y los recursos naturales.

La Figura 5-6 también indica que el consumo de agua potable durante la fase de ocupación influye en varios impactos ambientales. Esto se debe a que la evaluación toma en cuenta las fases de extracción y producción y consumo de este recurso. Durante la producción se utilizan grandes cantidades de compuestos minerales como el sulfato de aluminio, generando un impacto significativo en el agotamiento de minerales. Para darle tratamiento a las aguas se debe destinar áreas urbanas, por lo que se da un impacto potencial en la categoría ocupación del suelo urbano. El consumo del agua compromete la disponibilidad del mismo por lo cual también influye en la categoría de agotamiento del agua.

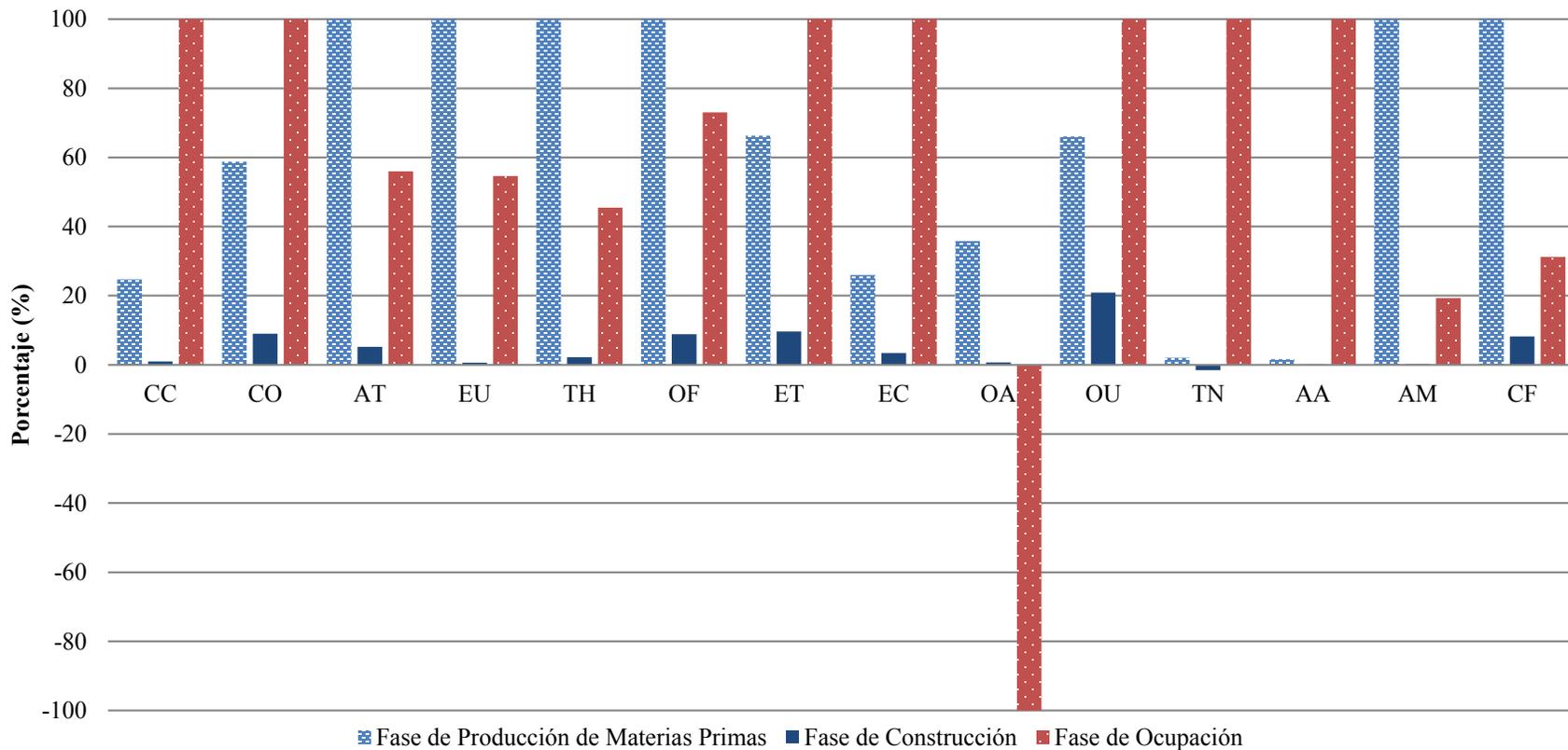
Por otra parte, las prácticas de reciclaje que se prevén para la fase de ocupación del edificio generarán un impacto positivo considerable en la mayoría de las categorías analizadas. Esto se refleja en los porcentajes negativos de la Figura 5-6.

El reciclaje de plástico influye significativamente en la categoría de agotamiento de combustibles fósiles y en la formación de oxidantes fotoquímicos. El reciclaje de papel impacta favorablemente las categorías de ocupación del suelo agrícola y urbano. El reciclaje de metales como el aluminio, brinda beneficios a las categorías de acidificación terrestre, agotamiento de minerales y de combustibles fósiles. Mientras que el reciclaje de vidrio, aunque en menor cantidad contribuye a disminuir la carga ambiental en las categorías de eco toxicidad y acidificación terrestre.

Es evidente que los procesos de reciclaje, al generar una reducción en la necesidad de materias primas, ayudan a disminuir los impactos ambientales durante los procesos de producción de los productos.

5.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

El análisis comparativo permitió determinar la influencia global de los impactos ambientales de las fases evaluadas del ciclo de vida del edificio. Los resultados se muestran en la figura 5-7.



CC: Cambio Climático, CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre, EU: Eutrofización del Agua Dulce, TH: Toxicidad Humana, OF: Formación de Oxidantes Fotoquímico, ET: Ecotoxicidad Terrestre, EC: Ecotoxicidad Agua Dulce, OA: Ocupación Suelo Agrícola, OU: Ocupación Suelo Urbano, TN: Transformación Suelo Natural, AA: Agotamiento Agua, AM: Agotamiento Minerales, CF: Agotamiento de Combustibles Fósiles

Figura 5-7 Análisis Comparativo de las Fases de Producción de Materia Primas, Construcción y Ocupación del Edificio.

Típicamente la fase de ocupación es la que genera los mayores impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un edificio. Esto por su extensa duración, donde se consume una gran cantidad de recursos energéticos y de agua, además de la amplia generación de residuos (Abd Rashid & Yusoff, 2015). Sin embargo, tal como se muestra en la figura 5-7, en el edificio en estudio algunas categorías de impacto presentan una huella ambiental incluso menor que la generada durante la fase de producción de materias primas.

Esto se debe en gran parte a consideraciones de diseño como el bajo mantenimiento que ocupa el edificio, las tecnologías de ahorro y consumo implementadas, el sistema de ventilación natural, las prácticas de reciclaje planeadas y el tratamiento de las aguas residuales ordinarias.

Otro factor no menos importante es el consumo de energía. Muchos estudios de ACV a nivel internacional coinciden en que las emisiones que se producen durante la fase de uso se relaciona con la quema de combustibles fósiles para la generación eléctrica y para la calefacción (Scheuer *et al*, 2003). No obstante, la composición de la matriz energética costarricense esperada para la fase de ocupación se compone mayoritariamente de fuentes renovables por lo que disminuye significativamente la huella ambiental del consumo eléctrico.

Los procesos de producción de materias primas representan la huella ambiental más alta para las categorías de acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, oxidación fotoquímica, agotamiento de minerales y agotamiento de combustibles fósiles, debido a los procesos de extracción y producción de materias primas ampliamente explicados en la sección 5.1.

Las cargas evitadas representadas en la figura 5-7 reflejan el impacto de las buenas prácticas ambientales implementadas en las respectivas fases en estudio. En la categoría de ocupación del suelo agrícola, se observa una alta carga evitada durante la fase de ocupación del edificio, en gran parte por el reciclaje del papel. La carga evitada en la categoría de transformación del suelo natural, corresponde al envío de los residuos inertes al relleno sanitario durante la fase de construcción. La fase de construcción refleja un impacto prácticamente nulo en el agotamiento del agua, en comparación con las otras fases analizadas.

5.5 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ACV

Se muestran a continuación los resultados del análisis de contribución y el análisis de Montecarlo, efectuados en los resultados obtenidos en la EICV.

5.5.1 Análisis de Contribución

En el cuadro 5-7 se enlistan los procesos con las mayores contribuciones de la EICV, para cada fase del ciclo de vida en estudio.

Cuadro 5-7 Análisis de Contribución de las Fases de Ciclo de Vida del Edificio.

Impacto Ambiental	Fase de Producción de Materias Primas	Fase de Construcción	Fase de Ocupación
Cambio Climático	Producción de arrabio	Transporte de carga pesada	Producción de energía hidroeléctrica tipo embalse
Disminución de la Capa de Ozono	Producción de petróleo para hornos cementeros	Producción de combustibles fósiles para el transporte	Producción de combustibles fósiles para la generación eléctrica
Acidificación Terrestre	Generación de energía a partir de carbón, para la producción de acero	Combustión del diésel en maquinaria de construcción	Producción de energía con fuentes térmicas
Eutrofización del Agua Dulce	Tratamiento del efluente producto de la extracción de minerales sulfurados, para la producción de acero	Tratamiento de derrames de la extracción de carbón	Tratamiento del agua residual
Toxicidad Humana	Tratamiento del efluente producto de la extracción de minerales sulfurados, para la producción de acero	Tratamiento de residuos sólidos ordinarios en relleno sanitario	Tratamiento de residuos sólidos ordinarios en relleno sanitario
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	Cocción del coque para la producción de acero	Combustión del diésel en maquinaria de construcción	Producción de energía con fuentes térmicas
Ecotoxicidad Terrestre	Producción de acero de baja aleación	Tratamiento de las emisiones por desgaste de frenos del transporte	Tratamiento del agua residual
Ecotoxicidad del Agua Dulce	Tratamiento del efluente producto de la extracción de minerales sulfurados, para la producción de acero	Tratamiento de residuos sólidos ordinarios en relleno sanitario	Tratamiento de residuos sólidos ordinarios en relleno sanitario

Continuación del Cuadro 5-7

Impacto Ambiental	Fase de Producción de Materias Primas	Fase de Construcción	Fase de Ocupación
Ocupación del Suelo Agrícola	Producción de monocultivo de zacate	Transformación de suelo agrícola a relleno sanitario, para el depósito de los materiales inertes	Utilización de bosques maderables sostenibles para la producción de papel
Ocupación del Suelo Urbano	Construcción de carreteras para la producción de acero	Transformación de suelo agrícola a relleno sanitario, para el depósito de los materiales inertes	Procesos del relleno sanitario
Transformación del Suelo Natural	Producción terrestre de aceite/gas para la producción de acero y cemento	Transformación de suelo natural a relleno sanitario, para el depósito de los materiales inertes	Producción de energía hidroeléctrica tipo embalse
Agotamiento del Agua	Separación del oxígeno del aire por métodos criogénicos, para la producción de acero	Producción de agua potable	Producción de energía hidroeléctrica tipo embalse
Agotamiento de Minerales	Producción de manganeso concentrado, para industria del acero	Extracción de coque para la producción de acero, para la flotilla vehicular	Reducción en la extracción de bauxita, para la producción de aluminio
Agotamiento de Combustibles Fósiles	Extracción de carbón, para la producción de acero	Producción de combustibles fósiles para el transporte	Reducción en la producción de polietileno de alta densidad

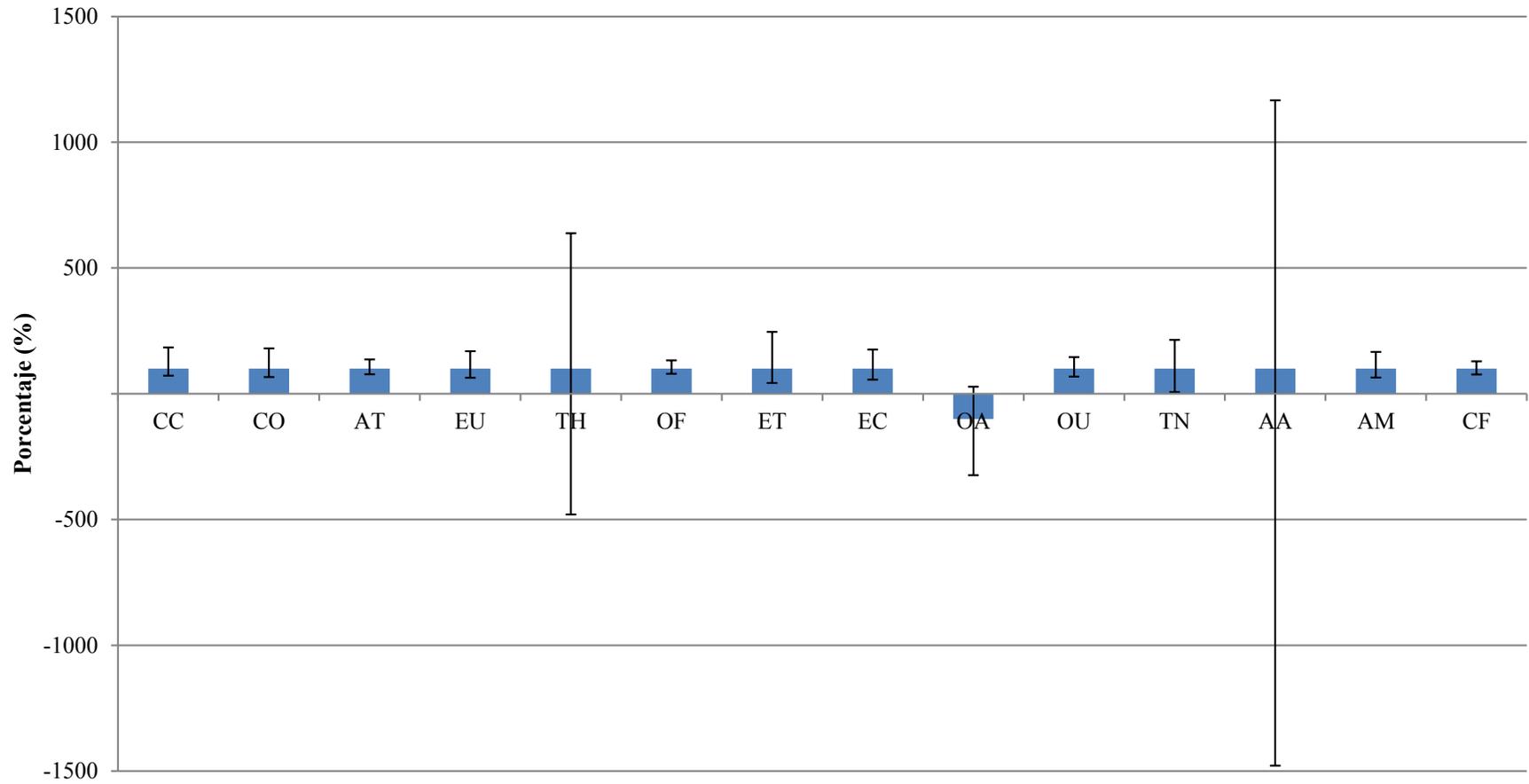
A partir del cuadro 5-7 se concluye que en la fase de producción de materias primas los procesos más influyentes se relacionan a la fabricación de acero y cemento. Para la fase de construcción la mayor influencia se debe a los procesos relacionados a la producción de combustibles y la generación de emisiones del sector de transporte. En esta misma fase también influye la transformación en el uso del suelo y el consecuente tratamiento de residuos sólidos ordinarios e inertes en un relleno sanitario. Para la fase de ocupación del edificio los procesos que generan la mayor influencia en los resultados son los relacionados a la producción de energía para el consumo eléctrico, el tratamiento de las aguas residuales y la reducción de materia prima, por el reciclaje de residuos sólidos valorizables.

5.5.2 Análisis de Monte Carlo

Monte Carlo determina el rango de incertidumbre de los resultados, mediante una gráfica ordenada de acuerdo a cada categoría de impacto. Las barras de error en forma de T expresan el intervalo del 95% de confianza de los resultados acumulados, por lo que se puede asegurar que el 95% de los resultados generados mediante el método Monte Carlo se encuentran dentro de este rango.

La longitud de estas barras indica el nivel de incertidumbre de los valores del inventario. Al utilizar las bases de datos internacionales, es de esperarse que las extrapolaciones generen incertidumbres altas en los resultados. Además, la cantidad tan grande de datos que se manejan en cada fase analizada, aumentan el porcentaje de incertidumbre.

A continuación se muestran los resultados del análisis de incertidumbre por medio del Método Monte Carlo para los datos del inventario de las fases de producción de materias primas, construcción y ocupación del edificio.



CC: Cambio Climático, CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre, EU: Eutrofización del Agua Dulce, TH: Toxicidad Humana, OF: Formación de Oxidantes Fotoquímico, ET: Ecotoxicidad Terrestre
 EC: Ecotoxicidad Agua Dulce, OA: Ocupación Suelo Agrícola, OU: Ocupación Suelo Urbano, TN: Transformación del Suelo Natural, AA: Agotamiento del Agua, AM: Agotamiento de Minerales, CF: Agotamiento Combustibles Fósiles

Figura 5-8 Resultados del Análisis de Monte Carlo para las Fases del Ciclo de Vida Analizadas.

6 CONCLUSIONES

En términos generales, el edificio de Residencias Estudiantiles presenta un desempeño ambiental atípico con respecto a otros estudios similares realizados a nivel internacional, ya que la fase de ocupación no es la que genera el mayor impacto ambiental en todas las categorías, sino que en algunas el impacto es inclusive menor que el generado durante la fase de producción de materias primas. Esto se debe a las consideraciones de diseño del edificio, así como la influencia de la matriz energética costarricense renovable.

En la fase de producción de materias primas, los materiales de las categorías “Metales” y “Minerales” generan la mayor carga ambiental del edificio, al presentar valores de hasta 98% y 48% respectivamente, en los impactos ambientales analizados. Esto se debe principalmente al impacto ambiental de los procesos de producción del acero y cemento.

En la fase de construcción del edificio, los procesos con mayores impactos ambientales son el transporte de los materiales de la fábrica al sitio y la disposición de los residuos inertes en el relleno sanitario, al presentar valores de hasta un 87% y 84% respectivamente en las categorías de impacto analizadas. Se atribuye estos valores a la generación de emisiones y la transformación en el uso del suelo.

Durante la fase de ocupación del edificio, el consumo eléctrico y la generación de aguas residuales ordinarias son los procesos que generan las mayores huellas ambientales, al presentar valores de hasta un 99% y un 87% respectivamente en las categorías de impacto evaluadas. El primero se atribuye a los impactos ambientales relacionados a la producción de la energía eléctrica, mientras el segundo al potencial de contaminación de fuentes de agua.

Se obtuvo cargas ambientales evitadas en las fases de construcción y ocupación del edificio gracias al tratamiento de los residuos sólidos ordinarios e inertes en relleno sanitario, el tratamiento de las aguas residuales ordinarias mediante el sistema del TEC y el

reciclaje de residuos valorizables. De esta forma se demostró la influencia positiva de las buenas prácticas ambientales aplicadas en ambas fases del edificio.

7 RECOMENDACIONES

Para realizar un estudio de ACV en el sector constructivo, se le debe indicar al desarrollador la necesidad de cuantificar los datos de los procesos que generen impactos ambientales desde las fases tempranas del proyecto. De esta forma se facilita la recolección de la información, al mismo tiempo que se obtienen resultados mucho más precisos.

Se recomienda utilizar bases de datos adaptadas al contexto nacional para lograr obtener resultados más ajustados a la realidad del país. Para ello es necesario lograr una apertura de información entre productores e investigadores, respetando la confidencialidad en la realización de un ACV.

Debido al auge que el ACV ha tenido a nivel mundial para determinar los impactos ambientales de sus procesos, productos y servicios; es necesario que en el país se dediquen mayores recursos en capacitación e investigación a nivel académico y profesional en este tema.

8 REFERENCIAS

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A Review of Life Cycle Assessment Method for Building Industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(45), 244-248.
- ALCALA. (2013). *ALCALA*. Recuperado el 1 de marzo de 2016, de <http://www.alcalacr.org/>
- Arce, R., & Sánchez, J. (2015). *Plan de Manejo Ambiental Proyecto Residencias Estudiantiles, Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.
- ARESEP. (2015). *Boletín Informativo: Mercado Eléctrico Regional y Sistema Eléctrico Nacional*. San José, Costa Rica.
- Arias, J. (18 de diciembre de 2015). *Costa Rica cierra 2015 con 99% de energía renovable*. Obtenido de CRHoy: <http://www.crhoy.com/costa-rica-cierra-2015-con-99-de-energia-renovable/>
- Benavides, D. (2013). *Plan de Gestión Ambiental, Proyecto: Residencias Estudiantiles*. Cartago, Costa Rica.
- Bermúdez, M. (Febrero de 2014). Volver a Levantar la Construcción. *El Financiero*(960), pág. 2.
- Blengini, A., & Di Carlo, T. (2010). “The Changing Role of Life Cycle Phases, Subsystems and Materials in the LCA of Low Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869-880.
- Boesch, M., & Hellweg, S. (2010). Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. *Environmental Science Technology*, 9143-9149.
- Campos, I., Méndez, H., & Salas, M. (Abril de 2013). Calculador Huella de Carbono para Edificaciones o Viviendas. *ICCYC*(50).
- Cano, E. (2014). ¿Contamina más un diésel o un coche de gasolina? *ABC*. Recuperado el 5 de febrero de 2016, de <http://www.abc.es/motor-reportajes/20140917/abc-contaminan-diesel-gasolina-201409161153.html>
- Carranza, M. (2012). *Memoria de Cálculo Descriptiva del Edificio de Residencias del Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Cartago.

- Cesano, D., & Russell, J. (2013). *Green Building in Latinoamérica*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de Evidence and Lessons from Latin America (ELLA): http://ella.practicalaction.org/wp-content/uploads/files/131106_ENV_TheGreEco_BRIEF1.pdf
- CFIA. (2015). Construcción crece un 8% en el 2014. *Revista CFIA*(260). Recuperado el 27 de Agosto de 2015, de <http://revistamarzo.cfia.or.cr/estadiacutesticas.html>
- Chargoy, A. J. (2011). *Descripción del Perfil Ambiental de Viviendas de Interés Social en México Mediante el Análisis de Ciclo de Vida*. San Andrés Cholula, México.
- Cisneros, M. (26 de abril de 2015). Baja en precio de insumos de construcción aun no motiva a la industria. *El Financiero*. Obtenido de http://www.elfinancierocr.com/finanzas/precios-construccion-IPC-IMAE_0_725327485.html
- Comité Técnico CEN/TC 350. (2011). *UNE-EN 15643-1: 2012 "Sostenibilidad en la Construcción. Evaluación de la Sostenibilidad de los Edificios. Parte 1: Marco General"*. España.
- Comité Técnico ISO/TC 207. (2007). *INTE/ISO 14040: Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia*. San José, Costa Rica: INTECO.
- Comité Técnico ISO/TC 207. (2007). *INTE/ISO14044: Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Requisitos y directrices*. San José, Costa Rica: INTECO.
- Ecoraee. (31 de diciembre de 2013). *Ecoraee*. Recuperado el 14 de diciembre de 2015, de <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf>
- Fava, J., Smerek, A., Heinrich, A., & Morrison, L. (2014). The Role of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) in Life Cycle Assessment (LCA) Development and Application. En W. Kloppfer, *Background and Future Prospects in LCA* (págs. 39-83). Alemania.
- Fernandez, S., & Orozco, M. (2013). *Proyecto Residencias Estudiantiles, Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Oficina de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Ford, N. (2013). *Políticas de Salvaguardia Socio Ambiental y Enfoque Común del FCPF*.
- Fornaguera, I. (17 de abril de 2015). Nuevo embalse llevará luz a 73.500 hogares cartagineses. *La Nación*.

- Gazulla, C. (6 de Junio de 2013). *Introducción al Análisis de Ciclo de Vida*. Recuperado el 3 de Agosto de 2015, de Construcción 21: <http://www.construction21.org/espana/community/pg/pages/view/549/>
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., & Ponsioen, T. (Noviembre de 2013). *Introduction to LCA with SimaPro*. Recuperado el 12 de Agosto de 2015, de Pré: Putting the metrics behind sustainability: <http://www.pre-sustainability.com/introduction-to-lca>
- Greenpeace. (2008). *Resumen de los Impactos Ambientales y Sobre la Salud de los Rellenos Sanitarios*. Argentina.
- Hammond, G., & Jones, C. (2008). Embodied Energy and Carbon in Construction Materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 161(2), 87-98.
- Hauschild, M., & Huijbregts, M. (2015). *Life Cycle Impact Assessment*. Londres: Springer.
- Hernández, J. (2012). *Metodología Basada en ACV para la Evaluación de la Sostenibilidad en Edificios*. España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hernández, S., & Orozco, D. (2013). *Proyecto Mejoramiento de la Educación Superior Financiado por el Banco Mundial: Residencias Estudiantiles*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Herrmann, I., Jorgensen, A., Bruun, S., & Hauschild, M. (2013). Potential for Optimized Production and Use of Rapeseed Biodiesel. Based on a Comprehensive Real-time LCA Case Study in Denmark. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(2), 418-430.
- Huntzinger, D., & Eatmon, T. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 668-675.
- ICE. (2014). *Plan de Expansión de la Generación Eléctrica Periodo 2014-2035*. San José, Costa Rica.
- ICE, Dirección de Comunicación e Identidad Corporativa. (2015). *Costa Rica: Matriz Energética, un Modelo Sostenible Único en el Mundo*. San José, Costa Rica.
- IEA. (2010). *World Energy Outlook*. Francia: International Energy Agency.
- IHOBE. (2009). *Análisis de Ciclo de Vida de y Huella de Carbono. Dos Maneras de Medir el Impacto Ambiental de un Producto*. Obtenido de IHOBE: <http://www.ihobe.eus/Publicaciones/Ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da->

840c-0590b91bc032&Cod=bc53a7db-3edb-4b96-ac9a-1f163ed0d76b&Idioma=es-ES

Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (ICTJA). (2006). *Calidad del Aire Urbano, Salud y Tráfico Rodado*. España.

International Energy Agency. (2015). *World Energy Outlook Special Report: Energy and Climate Change*. Francia: IEA.

Joint Research Centre. European Commission. (2010). *ILCD Handbook. Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment*. European Union.

Kopffler, W. (2014). Introducing Life Cycle Assessment and its Presentation in LCA Compendium. En W. Kopffler, *Background and Future Prospects in LCA* (págs. 1-37). Alemania.

Loaiza Montoya, M., Rodríguez Zúniga, G., Valverde Mora, Y., Gurdían López, R., & Chaves Jiménez, C. (2015). *Manual de Productos de RECOPE*. San José, Costa Rica.

Methane to Markets Partnership. (Marzo de 2008). *La Importancia del Metano y las Actividades de Reducción de sus Emisiones*. Recuperado el 2 de marzo de 2016, de Global Methane Initiative: https://www.globalmethane.org/documents/methane_fs_spa.pdf

MINAE. (2013). *Costa Rica, Market Readiness Proposal, Final Report*. San José, Costa Rica. Obtenido de http://www.thepmr.org/pmr/documents?title=&field_co_organization_value%5B%5D=22

Ministerio de Medio Ambiente. (2007). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España para el Sector de la Fabricación del Vidrio*. España: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente.

Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). (2010). *Plan Nacional de Desarrollo 2011-2014 "María Teresa Obregón Zamora"*. San José, Costa Rica.

Mora Poveda, I. (19 de febrero de 2016). Generación Eléctrica de JASEC, 2015.

- Mora, G. (2015). Florida Bebidas, primera empresa en certificarse “Huella de Agua”. *Revista ProAgro*.
- Niembro, J., & Gonzales, M. (2010). Categorías de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida Vinculadas con Energía: Revisión y Prospectiva. *12th International Conference on Project Engineering* , 1180-1190. Recuperado el 30 de agosto de 2015, de UPCommons. Portal del conocimiento abierto de la UPC: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7767/Niembro_1180_1190\[1\].pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7767/Niembro_1180_1190[1].pdf?sequence=1)
- OECD. (Febrero de 2012). Recuperado el 13 de agosto de 2015, de Green Growth and Developing Countries. Consultation Draft: <http://www.oecd.org/greengrowth/green-development/50559116.pdf>
- PNUMA. (2004). *¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?* Obtenido de <http://www.unep.fr/scp/publications/details.asp?id=WEB/0069/PA>
- PNUMA. (2014). *Situación de la Edificación Sostenible en América Latina*. México.
- Programa Estado de la Nación. (2012). *Decimotavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica.
- Programa Estado de la Nación. (2014). *Vigésimo Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica.
- Rodríguez, R. (4 de Febrero de 2015). Construcción sostenible ahorraría 40% en energía. *La República*.
- Salas, M. (2013). *Elementos para la definición de línea base CO2 para el sector construcción*. Recuperado el 20 de agosto de 2015, de Facilitating Implementation and Readiness for Mitigation: http://www.lowcarbondev-support.org/~media/Sites/FIRM_Facilitating_Implementation_and_Readiness_for_Mitigation/Workshop%20Presentations/Workshop%20in%20Costa%20Rica,%20Oct-Nov%202013/31%20Oct%202013/7-Escenarios%20de%20Linea%20base_Manuel%20Salas.ashx?la
- Sartori, I., & Hestnes, A. (2007). Energy Use in the Life Cycle of Conventional and Low-Energy Buildings: a Review. *Energy and Buildings*, 39, 249-257.

- Scheuer, C., Keoleian, G., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35, 1049–1064.
- Srebric, J., & Guiyuan, H. (2011). *Life-Cycle Assessment Tools for Building Analysis*. The Pennsylvania Housing Research Center, Pennsylvania. Recuperado el 2 de agosto de 2015, de <http://www.phrc.psu.edu/assets/docs/Publications/RB0511.pdf>
- TEC. (2012). *Proyecto Mejoramiento de la Educación Superior, Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.
- UICN. (2011). *Guía de Manejo de Escombros y Otros Residuos de la Construcción*. San José, Costa Rica.
- UNEP. (2004). *Life Cycle Assessment: A product-oriented method for sustainability analysis*. Training Manual.
- UNEP. (2009). *Buildings and Climate Change for Decision Makers*. Francia.
- UNEP/SETAC. (2015). *The Life Cycle Initiative*. Recuperado el 3 de Agosto de 2015, de Life Cycle Initiative: <http://www.lifecycleinitiative.org/about/about-lci/>
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. (2014). *Life Cycle Thinking in Latin America*. Obtenido de Life Cycle Initiative: <http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/01/LCA-LCM-company-case-studies-in-Latin-America.pdf>
- Zambalza, I., Díaz, S., Aranda, A., & Scarpellini, S. (13 de Enero de 2014). Impacto de los Materiales de Construcción, Análisis de Ciclo de Vida. *ECOHABITAR*. Obtenido de <http://www.ecohabitar.org/impacto-de-los-materiales-de-construccion-analisis-de-ciclo-de-vida/>

APÉNDICES

APÉNDICE 1: ICV DE LA FASE DE PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS DEL EDIFICIO

Cuadro A.1.1 Inventario de ciclo de vida para la fase de producción de materias primas del edificio.

Entradas/Salidas				
Categoría	Material	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Minerales	Lastre	999,97	ton	Gravel, crushed production {RoW}
	Arena	8,91	ton	Sand, gravel and quarry operation {RoW}
	Material granular (38mm)	147,52	ton	Gravel, crushed production {RoW}
	Bloques de mampostería de 12x20x40	32,43	ton	Concrete block production {RoW}
	Bloques de mampostería de 15x20x40	316,42	ton	Concrete block production {RoW}
	Bloques de mampostería de arcilla	200,1	ton	Brick production {RoW}
	Repello	2,53	ton	Base plaster production {RoW}
	Mortero adhesivo para cerámica	930	kg	Adhesive mortar production {RoW}
	Concreto de 105 kg/cm ²	121,35	m ³	Modelo creado ¹
	Concreto de 175 kg/cm ²	212,20	m ³	Modelo creado ¹
	Concreto 280 kg/cm ²	1980,49	m ³	Modelo creado ¹
	Entrepisos	2427	m ²	Modelo creado ¹
	Cemento	100	ton	Portland Cement production {RoW}
	Lámina de cemento Durock	6433,17	m ²	Modelo creado ¹
	Lámina de cemento con permabase	6892,70	m ²	Modelo creado ¹
Fibrocemento 6mm,	87,20	kg	Fibre cement facing tile production {RoW}	

¹ Ver Cuadro A.1.2

Continuación del Cuadro A.1.1

Categoría	Entradas/ Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Metales	Malla electrosoldada #1 (6m)	200	piezas	Modelo creado ¹
	Malla electrosoldada #2 (6m)	80,6	piezas	Modelo creado ¹
	Lámina de Hierro Negro	13,77	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Tubería Estructural de Hierro Negro	35,24	kg	Modelo creado ¹
	Lámina de cubierta	1048,16	m ²	Modelo creado ¹
	Puertas de Metal Tipo Swingerdoor	162	piezas	Modelo creado ¹
	Puertas de Aluminio	2,21	ton	Modelo creado ¹
	Varilla #2	17,75	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #3	397,34	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #4	294,74	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #5	227,76	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #6	280,24	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #7	9,02	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Varilla #8	296,23	ton	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
	Alambre de Acero	37,91	kg	Modelo creado ¹
	Clavos	26	kg	Modelo creado ¹
Orgánico	Enzacatado	21800	kg	Straw, stand alone production {RoW}
Plástico	PVC	12,74	ton	Modelo creado ¹
	Divisiones de Baños Públicos	600	kg	Polyethylene, high density production {RoW}
	Plástico Negro	48,98	kg	Polyethylene low density production {RoW}

¹ Ver Cuadro A.1.2

Continuación del Cuadro A.1.1

Entradas/Salidas		Flujo de	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Categoría	Material	Referencia		
Madera	Puertas de madera	187,2	m ²	Door, inner wood production
	Regla de 25mm x 75mm x 320mm	54	m ³	Sawnwood, softwood, raw, kiln dried
Pinturas y Revestimientos	Pintura para exteriores	28	kg	Acrylic varnish production, product in 87,5% solution state {RoW}
	Esmalte anticorrosivo	26	kg	Alkyd paint production , product in 60% solution state {RoW}
Cerámicos	Porcelanato de 45 x 45	10,39	ton	Refractory, basic, packed production {RoW}
	Inodoros de cerámica	2734	kg	Sanitary ceramics production {RoW}
	Lavatorios de Cerámica Vitrificada	647	kg	Sanitary ceramics production {RoW}
	Mingitorio seco con sistema de diafragma.	144	kg	Sanitary ceramics production {RoW}
	Bebedero de fuente de agua	36	kg	Sanitary ceramics production {RoW}
Vidrio	Ventanas	12,31	ton	Flat glass, uncoated production {RoW}
	Espejo 0.45mx0.75m, 5mm de espesor	214,98	kg	Flat glass, coated production {RoW}
	Espejo 1.50mx1.00m, 5mm de espesor	152	kg	Flat glass, coated production {RoW}
Sistema Solar Térmico	Sistema solar tipo forzado	8	piezas	Solar collector system with evacuated tube collector {RoW}

Cuadro A.1.2. Modelos creados para el Inventario de ciclo de vida de la fase de producción de materias primas del edificio

Material	Cantidad	Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Concreto de 105 kg/cm ²	1 m ³	Grava	1 263,6	kg	Gravel, crushed production {RoW}
		Arena	534,6	kg	Sand, gravel and quarry operation {RoW}
		Cemento	218,5	kg	Portland cement production {RoW}
		Agua	205	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
		Mezclado del concreto	2 221,7	kg	Plaster mixing processing {RoW}
Concreto de 175 kg/cm ²	1 m ³	Grava	1 185,6	kg	Gravel, crushed production {RoW}
		Arena	501,6	kg	Sand, gravel and quarry operation {RoW}
		Cemento	306	kg	Portland cement production {RoW}
		Agua	205	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
		Mezclado del concreto	1993,2	kg	Plaster mixing processing {RoW}
Concreto de 280 kg/cm ²	1 m ³	Grava	1 077	kg	Gravel, crushed production {RoW}
		Arena	895	kg	Sand, gravel and quarry operation
		Cemento	600	kg	Portland cement production {RoW}
		Agua	288	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
		Mezclado del concreto	2860	kg	Plaster mixing processing {RoW}
Entrepisos	1 m ²	Grava	122,79	kg	Gravel, crushed production {RoW}
		Arena	63,59	kg	Sand, gravel and quarry operation {RoW}
		Cemento	39,28	kg	Portland cement production {RoW}
		Agua	200	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
		Mezclado del concreto	225,66	kg	Plaster mixing processing {RoW}
		Transporte de grava a la planta	1,55	tkm	Transport freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 {RoW}
		Transporte de arena a la planta	0,81	tkm	Transport freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 {RoW}
		Transporte de cemento a la planta	0,50	tkm	Transport freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 {RoW}

Continuación del Cuadro A.1.2.

Material	Cantidad	Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Lámina de cemento Durock	1 m ²	Gypsum	0,15	kg	Gypsum
		Piedra pómez	5,86	kg	Pumice, quarry operation {RoW}
		Arcilla expandida	2,19	kg	Expanded clay production {RoW}
		Cemento Portland	2,92	kg	Portland cement production {RoW}
		Cemento	0,59	kg	Unspecified cement production {RoW}
		Fibra de Vidrio	0,15	kg	Glass fiber production {RoW}
		Ceniza de soda	0,15	kg	Soda ash, soda production {RoW}
		Sílica cristalina	0,29	kg	Silica sand {RoW}
		Mezclado del concreto	14,65	kg	Plaster mixing processing {RoW}
Lámina de cemento con permabase	1 m ²	Cemento Portland	2,93	kg	Portland cement production {RoW}
		Cemento	0,73	kg	Unspecified cement production {RoW}
		Arena	6,59	kg	Sand, gravel and quarry operation {RoW}
		Fibra de Vidrio	0,59	kg	Glass fiber production {RoW}
		Sílica cristalina	0,59	kg	Silica sand {RoW}
Malla electrosoldada #1 6m	1 pieza	Alambre de acero	14,73	kg	Alambre de Acero
		Proceso de soldadura	202	m	Welding arc, Steel processing {RoW}
Malla electrosoldada #2 6m	1 pieza	Alambre de acero	24,99	kg	Alambre de Acero
		Proceso de soldadura	202	m	Welding arc, Steel processing {RoW}
Tubería Estructural de Hierro Negro	1 kg	Producción de acero enrolado	1	kg	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
		Manufactura del tubo de acero	1	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW}
Lámina de cubierta	1 m ²	Producción de acero enrolado	4,8	kg	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
		Galvanizado de zinc	1	m ²	Zinc coat, coils {RoW}
		Producción de tubos de plástico por extrusión	1	kg	Extrusion, plastic pipes, production

Continuación del Cuadro A.1.2.

Material	Cantidad	Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Puertas de Metal Tipo Swingerdoor	1 pieza	Producción de acero enrolado	40	kg	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
		Manufactura de la puerta	40	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW}
		Producción de relleno de poliestireno reciclado	7,5	kg	Polystyrene foam slab production, 100% recycled {RoW}
Puertas de Aluminio	1 kg	Producción de lingotes de aluminio	1	kg	Aluminium, primary, ingot {RoW}
		Manufactura de la puerta	1	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing {RoW}
Alambre de Acero	1 kg	Producción del acero	1	kg	Steel, low alloyed, hot rolled production {RoW}
		Trefilado del acero	1	kg	Wire drawing, steel {RoW}
Clavos	1 kg	Alambre de acero	1	kg	Modelo creado ¹
		Extrusión del acero	1	kg	Impact extrusion of steel, cold, 1 strokes {RoW}
		Torneado del acero	1	kg	Steel removed by turning, primarily dressing, conventional {RoW}
		Galvanizado de zinc	0,06	m ²	Zinc coat, pieces {RoW}
PVC	1 kg	Producción de cloruro de polivinilo	1	kg	Polyvinylchloride production, suspension polymerization {RoW}
		Producción de tubos de plástico por extrusión	1	kg	Extrusion, plastic pipes, production

APÉNDICE 2: ICV DE LA FASE DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO

Cuadro A.2.1. Inventario de ciclo de vida de la fase de construcción del edificio.

Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Transformación del suelo urbano	6532	m ²	Transformation, to urban, continuously built
Consumo eléctrico	16 449,80	kWh	Modelo creado ¹
Consumo de agua	1 826 080	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
Transporte de materiales	562 614,76	tkm	Transport freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 {RoW}
Consumo de combustible diésel	1 258,65	MJ	Diesel, burned in building machine, processing {RoW}
Agua residual ordinaria	890,82	m ³	Wastewater, average treatment, capacity 1,68E8 L/year {RoW}
Residuos inertes (piedra, tierra, lastre)	13 053,1	ton	Inert waste, for final disposal, inert material landfill {RoW}
Madera residual a relleno sanitario	12,125	ton	Waste wood, untreated, treatment of sanitary landfill {RoW}
Madera residual a hornos	6,0	ton	Waste wood, untreated, heat production at furnace 1000-5000 kW {RoW}
Residuos sólidos ordinarios	110,698	ton	Municipal solid waste, sanitary landfill treatment {RoW}

¹ Ver Cuadro A.2.2.

Cuadro A.2.2. Modelo creado para el inventario de ciclo de vida de la fase de construcción del edificio.

Proceso	Cantidad	Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Consumo Eléctrico	1 kWh	Energía hidroeléctrica tipo embalse	0,215	kWh	Electricity, high voltage production, hydro reservoir, tropical region {RoW}
		Energía hidroeléctrica tipo filo de agua	0,6345	kWh	Electricity, high voltage production, hydro run-of-river {RoW}
		Energía térmica	0,0065	kWh	Electricity, high voltage production, oil {RoW}
		Energía geotérmica	0,0792	kWh	Electricity, high voltage production, geothermal {RoW}
		Energía eólica	0,0603	kWh	Electricity, high voltage production, wind, <1MW turbine, onshore {RoW}
		Energía biomásica	0,0044	kWh	Electricity, high voltage production, treatment of bagasse from sugarcane, power co-generation unit 6400, thermal {GLO}

APÉNDICE 3: ICV DE LA FASE DE OCUPACIÓN DEL EDIFICIO

Cuadro A.3.1. Inventario de ciclo de vida de la fase de ocupación del edificio.

Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Consumo eléctrico	248 661 390	kWh	Modelo Creado ¹
Consumo de agua	1 082 408 026	kg	Tap water production, conventional treatment {RoW}
Agua residual ordinaria	1 532 047,055	m ³	Wastewater, average treatment, capacity 1,68E8 L/year {RoW}
Residuos sólidos ordinarios	1 962,92	ton	Municipal solid waste, sanitary landfill treatment {RoW}
Reciclaje de residuos	1	pieza	Modelo Creado ¹

¹ Ver Cuadro A.3.2.

Cuadro A.3.2. Modelos creados para el inventario de ciclo de vida de la fase de ocupación del edificio.

Proceso	Cantidad	Entradas/Salidas	Flujo de Referencia	Unidad	Modelo Utilizado en SimaPro
Consumo Eléctrico	1 kWh	Energía hidroeléctrica tipo embalse	0,5558	kWh	Electricity, high voltage production, hydro reservoir, tropical region {RoW}
		Energía hidroeléctrica tipo filo de agua	0,3974	kWh	Electricity, high voltage production, hydro run-of-river {RoW}
		Energía térmica	0,0036	kWh	Electricity, high voltage production, oil {RoW}
		Energía geotérmica	0,0270	kWh	Electricity, high voltage production, geothermal {RoW}
		Energía eólica	0,0126	kWh	Electricity, high voltage production, wind, <1MW turbine, onshore {RoW}
		Energía biomásica	0,0018	kWh	Electricity, high voltage production, treatment of bagasse from sugarcane, power co-generation unit 6400, thermal {GLO}
Reciclaje de Residuos	1 pieza	Reciclaje de vidrio	52,98	ton	Recycling of packaging glass (waste treatment) {RoW}
		Reciclaje de papel	317,88	ton	Recycling of paper (waste treatment) {RoW}
		Reciclaje de plásticos	238,41	ton	Recycling of mixed plastics (waste treatment) {RoW}
		Reciclaje de metales	52,98	ton	Recycling of aluminium (waste treatment) {RoW}