

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE ECO-EFICIENCIA DE LA DEMOLICIÓN DE UNA
EDIFICACIÓN EN LIMA**

Tesis para optar por el título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

AGUILAR NUÑEZ, DIEGO ALEXIS LOO SÁNCHEZ, FELIPE ALONSO

ASESOR: Ph.D. IAN VÁZQUEZ ROWE

Lima, Noviembre de 2017

Agradecimientos,

A mi madre Giovana y a mi padre Willy, mis motivos e inspiración, por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante este proceso. A mis hermanos, Harold y Ariana, por todas las energías. A Toño, por siempre estar ahí. Y a Juanita, por siempre cuidarme y guiarme por el mejor camino. Gracias de corazón.

Diego

A mi madre Victoria y a mi padre Felipe por su incondicional apoyo, entendimiento y cariño. A mi abuela Felicitas por la pasión inculcada sobre mi carrera. A mis hermanos Silvana y Christian, por su compañía y ánimos. A Adelina, por ser un gran apoyo desde la infancia y a Daniel, por las risas y su inocencia.

Felipe

Finalmente queremos agradecer a todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo, a los amigos y profesores por sus consejos, al profesor Alexis Dueñas por la motivación y apoyo académico. De manera muy especial dedicamos un agradecimiento a nuestro asesor y amigo PhD. Ian Vazquez, por su paciencia, constancia, disposición y por siempre creer en nosotros.

Los autores

RESUMEN

El sector construcción ha tenido un marcado avance en las últimas décadas, el cual es observable en las estadísticas nacionales e internacionales, atrayendo así la inversión y desarrollo urbano en distintas partes del mundo. Este intenso desarrollo trajo al contexto nuevas variables como el agotamiento de recursos y la generación de desperdicios de construcción. Los desperdicios generados por esta actividad, sea por la necesidad de eliminar la infraestructura existente o por el mismo levantamiento de nuevas estructuras, son llamados Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Dado el estado actual y a las problemáticas presentadas, es necesario realizar un análisis de los impactos ambientales y de las implicancias económicas referentes a esta actividad. En la presente investigación, con el fin de proponer un método de estimación para hallar los indicadores de eco-eficiencia, bajo el marco de la normativa ISO 14045, se lleva a cabo el análisis de la demolición del antiguo pabellón “B” de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Tal cual se especifica en la normativa ISO, se llevó a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para los impactos ambientales y para la valoración del sistema se eligió una valoración económica a través de la herramienta del Life Cycle Costing (LCC). Finalmente, combinando estos análisis en la metodología propuesta, dividiendo el impacto de cada categoría entre el costo por impacto hallado, se obtienen los indicadores de eco-eficiencia del proyecto analizado.

En cuanto a los resultados, se generó la matriz de los indicadores para cada categoría de impacto. Entre las categorías más resaltantes se evidenció que, para este proyecto de demolición, en la categoría de cambio climático, se emitieron 8.79 kg de CO₂ equivalente por cada sol asociado al impacto. Además, en la formación de material particulado, se emitieron 1.34E-03 kg de PM₁₀ equivalente por cada sol asociado a este. Asimismo, se estimó que por cada metro cuadrado demolido se emitieron 38 kg de CO₂ equivalente. Los indicadores hallados con la metodología propuesta podrán servir como precedente de evaluación y herramienta de toma de decisión para futuros proyectos de demolición indistintamente de su dimensión o del método de demolición implementado.

SUMMARY

The construction sector has experienced notable growth in the past few decades. This trend can be observed in national and international statistics through the creation of new investments and urban development in several parts of the world. This remarkable development has generated new variables that must be considered in the sector, such as resource depletion and construction waste generation. Waste generation as the result of this activity, either by the demolition of de existing structures or by the construction of new ones, is referred to as Construction and Demolition Waste (CDW).

Given the present situation and the above mentioned problems, it is necessary to analyze the environmental impacts and the economic implications related to construction and demolition activities. Therefore, in this study, in order to propound an estimation method which can be used to obtain eco-efficiency indicators, under the ISO 14045 guidelines, an analysis of the demolition of the former Pavilion “B” of the Pontificia Universidad Católica del Perú. As specified in the ISO guideline, Life Cycle Assessment (LCA) is used for the environmental analysis, whereas for the valuation of the system, an economic valuation is chosen (i.e., the economic analysis is accomplished by the Life Cycle Assessment (LCC) approach). Finally, once both methodologies are merged in the proposed method, the eco-efficiency indicators are estimated. As specified in the ISO guideline, Life Cycle Assessment (LCA) is used for the environmental analysis, whereas for the valuation of the system, an economic valuation is chosen (i.e., the economic analysis is accomplished by the Life Cycle Assessment (LCC) approach). Finally, once both methodologies are merged in the proposed method, the eco-efficiency indicators are estimated by dividing the impact in each category by the cost.

Regarding the results, the matrix of the indicators for each impact category was elaborated. Among the most outstanding categories, it was evidenced that, for this demolition project, in the climate change category, 8.79 kg of CO₂ equivalent were emitted for each PEN associated with the impact. In addition, in the particulate formation category, 1.34E-03 kg of PM₁₀ were emitted for each PEN associated with it. Likewise, it was estimated that 38 kg of CO₂ equivalent were emitted for each square meter demolished. The indicators obtained with the propound methodology may serve as a

baseline evaluation and also in terms of decision-making for future demolition projects indistinctly of their dimensions or the implemented demolition method.



basado en lineamientos de eco-eficiencia para obtener los impactos ambientales generados por la demolición de una edificación y los costos asociados a estos, para así generar indicadores que sirvan de punto de comparación para futuros estudios.

ANTECEDENTES

El análisis de eco-eficiencia es una herramienta para llevar a cabo la cuantificación de los impactos ambientales en conjunto con una valoración del sistema, usualmente en términos monetarios, teniendo como resultado indicadores de eco-eficiencia los cuales son importantes en la toma de decisiones con un enfoque ambiental-económico. La norma ISO 14045 da los lineamientos para efectuar un análisis de eco-eficiencia. Esta está basada en las normas ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14050 y dicta que la evaluación ambiental debe ser efectuada a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mientras que la valoración del sistema queda a libre elección del evaluador.

Existen diversos estudios de ACV, donde se define la metodología y las formas de evaluación del impacto. Asimismo, es posible encontrar estudios donde se utiliza la herramienta Life Cycle Costing (LCC), la cual aplica los costos a las etapas del ciclo de vida y le permite adecuarse al ACV (Reich, 2005; Sheriff, 1981). Sin embargo, no es común encontrar análisis de eco-eficiencia y en el ámbito peruano no se encuentran estudios centrados en esta a pesar de ser una útil herramienta de decisión al llevar a cabo alguna gestión ambiental.

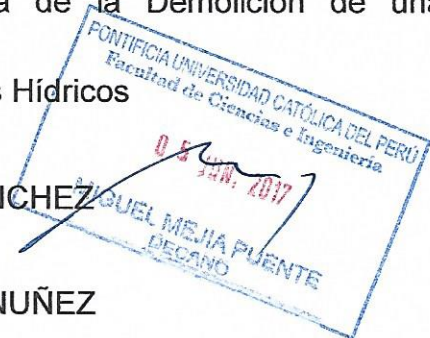
En el sector de la construcción, el tema del control ambiental viene cobrando cada vez más protagonismo. Incluso, la fase de demolición, que comúnmente no es analizada a detalle, se está tomando en consideración para poder conocer sus implicancias ambientales y así ejercer una mejor gestión sobre ella. Existen países que cuentan con Códigos de Buenas prácticas y legislaciones exclusivas orientadas a su ejecución y gestión de los Residuos Sólidos de Construcción y Demolición (RCD), actividad que aporta el mayor impacto ambiental del proceso. El Perú se encuentra en esta línea de desarrollo, ya que existen decretos que regulan el manejo de estos, pero aún son muy básicos. Asimismo, existen diversos estudios de ACV orientados a la evaluación, principalmente, de viviendas, tomando el ejemplo del ámbito internacional, principalmente el europeo, donde el tema está muy desarrollado. Por tal motivo, es importante incursionar en este tipo de estudios, para poder tomarlos de base en futuros estudios y permanecer a la vanguardia del desarrollo global.

OBJETIVO

El objetivo principal del estudio es establecer un método de análisis basado en lineamientos de eco-eficiencia para obtener los impactos ambientales generados por la demolición de una edificación y los costos asociados a estos, para así generar indicadores que sirvan de punto de comparación para futuros estudios.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Análisis de Eco-Eficiencia de la Demolición de una Edificación en Lima"
Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos
Asesor : PhD. Ian Vázquez Rowe
Alumno : FELIPE ALONSO LOO SANCHEZ
Código : 2011.0031.412
Alumno : DIEGO ALEXIS AGUILAR NUÑEZ
Código : 2011.0472.412
Tema N° : # 90
Fecha : Lima, 1 de junio 2017



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El sector de la construcción en Perú ha tenido una evolución cíclica con tendencia al crecimiento en los últimos años. El Banco Central de Reserva del Perú indica que el PBI del sector construcción ha tenido picos de crecimiento de hasta 42% en el año 2008 (BCRP, 2015), acumulando hacia el año 2014 doce años de crecimiento consecutivo impulsado por la construcción de viviendas, centros comerciales, rehabilitación y mejoramiento de la red vial, obras de infraestructura, y edificaciones demandadas por unidades mineras (INEI, 2014).

Si bien el desarrollo de infraestructura es sinónimo de progreso, descentralización, evolución económica y social para un país, también significa consumo de recursos y generación de residuos que causan algún impacto ambiental negativo. En el ámbito internacional diversas entidades se preocupan por recopilar información que brinden un panorama de control acerca de estos temas, y se preocupan por analizar los procesos tanto global como detalladamente, como en el caso de la demolición, que suele ser considerada como la fase final o inicial de una construcción que, al no tener datos precisos sobre su ejecución, se analiza bajo modelos genéricos con muchas asunciones.

En Perú, existen algunos estudios que evalúan el impacto ambiental durante el ciclo de vida de una construcción, sobre todo de edificaciones. Sin embargo, estos son globales y, aunque ofrecen datos útiles de los impactos que las diversas fases de la construcción generan al ambiente, no realizan un análisis exhaustivo del proceso de demolición previo a la construcción. Por tal motivo, en este estudio se busca establecer un método de análisis



Ian



PLAN DE TRABAJO

El desarrollo de la investigación seguirá la siguiente secuencia:

1. Revisión literaria de la herramienta de eco-eficiencia y del estado del arte de las investigaciones relacionadas con su aplicación.
2. Elección del caso de estudio. La demolición de una edificación en la ciudad de Lima.
3. Definición de los objetivos, alcance y límites del estudio.
4. Desarrollo de una evaluación ambiental del sistema según los requerimientos de la eco-eficiencia.
5. Desarrollo de una evaluación económica según los requerimientos de la eco-eficiencia.
6. Cuantificación de la eco-eficiencia a través de la obtención de indicadores.
7. Interpretación y comparación de los datos del modelo con bibliografía relacionada.
8. Conclusiones finales del estudio.
9. Elaboración de la tesis.

Asimismo, se coordinarán reuniones quincenales con el alumno para verificar el avance de investigación, resolver consultas y dar indicaciones para los avances futuros. La revisión de la tesis de investigación tendrá dos etapas: revisión del primer y segundo borrador.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas

M
Jern



B

ÍNDICE

Lista de figuras	vi
Lista de tablas.....	vii
Lista de acrónimos	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. La demolición.....	6
2.1.1 Demoliciones Manuales.....	9
2.1.2 Demolición mediante explosivos.....	10
2.1.3 Masa suspendida (bola y grúa)	12
2.1.4 Lanza térmica.....	12
2.1.5 Hidrodemolición	13
2.1.6 Tipos de demolición usadas mayormente en el Perú.....	14
2.2 Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	18
2.3 Legislación vigente.....	24
2.3.1. Legislación internacional.....	24
2.3.2 Legislación nacional	27
2.4 La Eco-eficiencia.....	28
2.5 Análisis de Ciclo de Vida	29
2.6 Life Cycle Costing.....	35
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE.....	38
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	48
4.1 Descripción del caso de estudio	49
4.2 Análisis de Ciclo de Vida.....	52
4.2.1 Definición de objetivos y alcance.....	52
4.2.2 Inventario de Ciclo de Vida.....	53
4.2.3 Evaluación de Impacto.....	67
4.3 Evaluación económica (<i>Life Cycle Costing</i>)	70
4.3.1 Presentación de la matriz de costos y la clasificación de los mismos.	70

4.3.2 Clasificación de los costos.....	72
4.3.3 Obtención de los costos totales.....	73
4.4 Estimación de la Eco-eficiencia	73
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	78
5.1 Análisis de Ciclo de Vida.....	78
5.2 <i>Life Cycle Costing</i>	83
5.3 Estimación de la Eco-eficiencia	83
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	94



Lista de figuras

Figura 1: PBI del sector construcción entre Enero de 2003 a Diciembre de 2016	1
Figura 2: Demolición parcial del antiguo Pabellón B de la PUCP	6
Figura 3 Categorías de impacto que considera el método <i>ReciPe</i>	32
Figura 4: Fases de la elaboración del ACV.....	33
Figura 6. Esquema Metodológico	48
Figura 7. Plano de ubicación del pabellón B.....	49
Figura 8. Secuencia de trabajos previos.....	50
Figura 9. Etapas del ciclo de vida de la demolición.....	52
Figura 10. Límites finales de la gestión de residuos de la demolición	53
Figura 11. Modelo del transporte de material	57
Figura 12. Clasificación de datos en el SimaPro	69
Figura 13. Procedimiento para la obtención de los índices de eco-eficiencia	75
Figura 14. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida.....	80
Figura 15A. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida por Categoría de Impacto	81
Figura 15B. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida por Categoría de Impacto	82

Lista de tablas

Tabla N° 1: Técnicas de demolición mecánicas empleadas en países europeos.....	17
Tabla N° 2: Composición De RCD Para Periodos De 2001 Al 2016	21
Tabla N° 3: Categorización de los RCD según su origen y uso posterior	23
Tabla N°4: Equipos utilizados en la demolición.....	50
Tabla N°5: Características generales de los equipos empleados.	54
Tabla N°6: Tasas medias de generación de Residuos de Construcción y Demolición en masa (kg/m ²).	55
Tabla N°7: Tasas medias de generación de Residuos de Construcción y Demolición en volumen (m ³ /m ²).	55
Tabla N°8: Área de ambientes en el Pabellón B de la PUCP.	56
Tabla N°9: Cálculo de los viajes cargados.....	58
Tabla N°10: Cálculo del kilometraje y tiempo usado en el traslado de material de la demolición.....	59
Tabla N°11: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias pesadas.	60
Tabla N°12: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias menores o equipos manuales	61
Tabla N°13: Multiplicadores según tamaño de partículas	65
Tabla N°14: Emisiones de material particulado.	66
Tabla N°15: Consumo de combustible de maquinaria pesada.....	66
Tabla N°16: Consumo de energía eléctrica de equipos menores.....	67
Tabla N°17: Consumo de oxígeno, butano y agua.....	67
Tabla N° 18: Matriz de costos horarios de equipo y maquinaria.....	71
Tabla N° 19: Matriz de costos de equipo y maquinaria.....	72
Tabla N°20: Clasificación de costos según las etapas del proceso de demolición	72
Tabla N° 21: Costo por aspecto según participación de cada elemento	76
Según lo desarrollado en la sección de metodología, la Tabla N°22 muestra los costos totales de los elementos relevantes de la demolición.....	83
Tabla N° 22: Costos totales de la demolición.....	83
Tabla N° 23: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B (valores reportados para el conjunto de la demolición).....	84

Tabla N° 24: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según metros cuadrados totales	85
Tabla N° 25: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según metros cúbicos totales	86
Tabla N° 26: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según costo total del proyecto	87
Tabla N° 27. Relación entre las categorías de impacto, los indicadores y los factores de caracterización.....	90



Lista de acrónimos

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

BCRP: Banco Central de Reserva del Perú

CalEEMod: *California Emission Estimator Model*

CAPECO: Cámara Peruana de la Construcción

CFC: Clorofluorocarbonos

EPA: *Environmental Protection Agency*

GEH: Grupo Español del Hormigón

GSA: *U.S. General Services Administration*

IMCC: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO: *International Organization for Standardization*

LCC: *Life Cycle Costing*

MSI: Municipalidad de San Isidro

NTP: Norma Técnica Peruana

PBI: Producto Bruto Interno

PM: Particulate Matter

PNIR: Plan Nacional Integrado de Residuos

PTAR: Planta De Tratamiento De Aguas Residuales

PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

RPCV: Red Peruana de Ciclo de Vida

SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

TSP: *Total Suspended Particulate*

UE: Unión Europea

UTM: *Universal Transverse Mercator*



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción ha evolucionado a pasos agigantados en los últimos años en el Perú. Según estadísticas del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), el Producto Bruto Interno (PBI) del sector evidencia la tendencia al crecimiento. La Figura 1.1 ilustra la evolución del PBI desde el año 2003 hasta el 2016 (con el año 2007 como figura 100%) (BCRP, 2015). Hacia el año 2014, la construcción acumulaba doce años de crecimiento consecutivo impulsado por la construcción de viviendas, centros comerciales, rehabilitación y mejoramiento de la red vial, obras de infraestructura, edificaciones demandadas por unidades mineras (INEI, 2014).

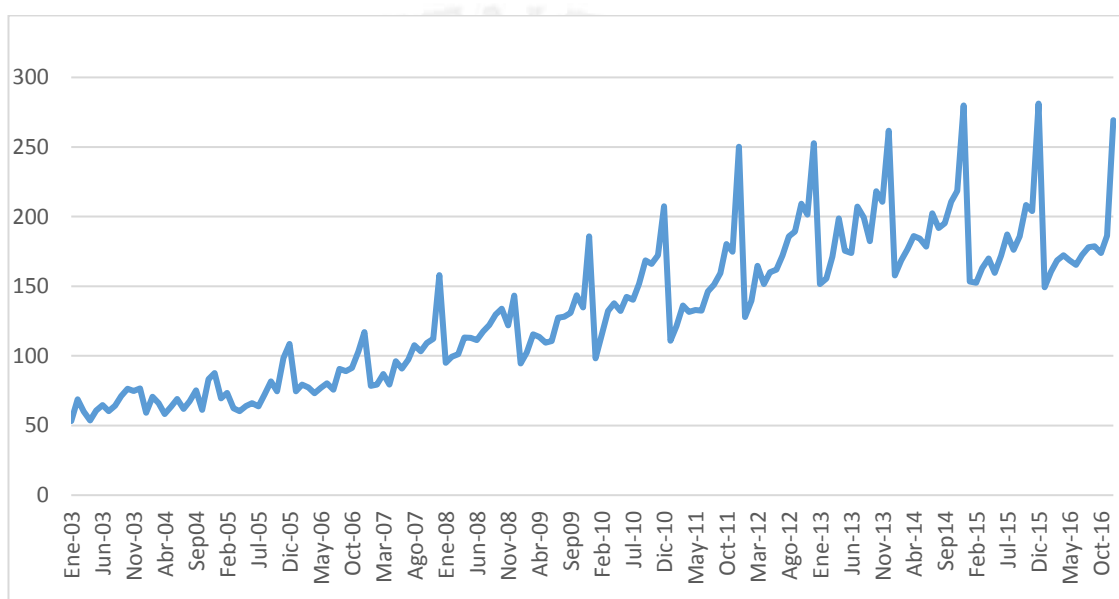


Figura 1: PBI del sector construcción entre Enero de 2003 a Diciembre de 2016
Fuente: adaptado del BCRP

El desarrollo de infraestructura significa progreso, descentralización y evolución de las comunidades en ámbitos sociales y económicos, pero al mismo tiempo es sinónimo de consumo y desecho de recursos e impacto ambiental. Esto se evidencia, principalmente, en países con mayor índice de desarrollo urbano, como Estados Unidos, España, Noruega, entre otros. La agencia censal del primero provee una acertada información actualizada mensualmente acerca de su actividad constructiva (United States Census Bureau, 2015). Solo en Agosto de 2015 especifica que se invirtió un total de 1 086 224 millones de dólares en la actividad, la cual incluye el trabajo de construcción llevado a cabo en el mes sobre nuevas estructuras o renovaciones en edificaciones ya existentes en los sectores públicos y privados. Este valor significa un incremento del 13.7% respecto a agosto del 2014 (United States

Census Bureau, 2015). Asimismo, en el sector de la construcción en Europa se encuentran impresionantes datos de inversión económica. Según el diario El Economista de España (2015), solo en ese país se tuvo una inversión de 5.497 millones de euros en el segundo trimestre de 2015, y en Alemania, a pesar de presentar un crecimiento porcentual no tan elevado, la inversión alcanzó los 12 000 millones de euros.

El Perú no es ajeno a este crecimiento. El sector de la construcción en el país se ha caracterizado por tener un desempeño cíclico en los últimos años con evidente tendencia al crecimiento. Según estadísticas del Banco Central de Reserva (2004-2014) y el Instituto Nacional de Estadística e Información (2015), el desarrollo de la industria de la construcción ha mantenido predominantes períodos de crecimiento frente a las eventuales caídas que ocurren después de estos. El mayor pico de variación de crecimiento en los últimos años se alcanzó en el 2008, con un 42.4%, seguido de un 29.6% en el transcurso del 2009, basados en una variación de doce meses (Banco Central de Reserva, 2004-2014).

La actividad de la construcción posee un potencial de agotamiento de recursos fósiles considerable, en tanto necesita materia prima y energía para llevar a cabo sus labores en general. Estos recursos van desde materiales directamente involucrados con la construcción como agregados y cemento, así como aquellos indirectos propios de actividades secundarias, como combustible para los vehículos empleados en el transporte de materiales. Al mismo tiempo, dicho sector es responsable de la generación de diversos desperdicios debido al propio proceso de construcción como a la necesidad de eliminar infraestructura existente para poder dejar libre el emplazamiento destinado a nuevos proyectos. Estos residuos son conocidos como los Residuos sólidos de Construcción y Demolición (RCD). Sin embargo, estos residuos son comúnmente tratados como uno solo, cuando, de hecho, presentan realidades distintas y sería interesante explorar la posibilidad de hacer más específica su consideración, pues así se lograría un mejor manejo de los impactos que estos y las actividades de demolición causan.

Es una labor difícil poder acceder a las cifras de generación de RCD en los países debido a que las instituciones gubernamentales no están encargadas de su control. Por ello, es necesario consultar instituciones para-gubernamentales para acceder a los datos acerca de la generación de RCD. En el caso de Europa, la agencia de estadística

de la Unión Europea, Eurostat (2015), provee información acerca de las cantidades de RCD generadas a lo largo del año 2012. La alarmante cifra asciende a un total de 821 millones de toneladas, donde encabezan la lista países como Alemania con 197 millones de toneladas, Francia con 246 millones y el Reino Unido con 100 millones. Del mismo modo, en los Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (2009), en su informe más actualizado acerca de la estimación de la cantidad de RCD generados en el 2003, ofrece una cifra de 170 millones de toneladas, de las cuales un 49% está relacionado solo al ámbito de la demolición.

En el Perú, es aún más sombría la situación de obtención de la información acerca de estos procesos, debido a la informalidad del rubro y a su aún reciente impulso. La información más reciente de esta actividad en el Perú se puede encontrar en el Informe anual de residuos sólidos Municipales y no Municipales en el Perú (Gestión, 2009) donde se especifica un total de 18 729 toneladas mensuales de residuos mezclados de construcción y demolición (224 748 toneladas totales en el año).

Sin embargo, es posible encontrar sistemas de clasificación que facilitan la identificación de los subproductos más representativos dentro de la actividad de la construcción. Un ejemplo es el caso de Statistics Norway (2015), el portal oficial de estadística de la sociedad Noruega, el cual ofrece datos precisos y desglosados de las actividades generadoras de desechos en general. Los datos actualizados al 2013 respecto únicamente a la actividad de demolición indican una generación de 569 770 toneladas de RCD, clasificados en madera, papel, plástico, vidrio, yeso, residuos electrónicos, residuos peligrosos, ladrillos, concreto, y materiales pesados; ladrillos y concreto contaminados; asfalto, residuos mezclados y otro tipo de residuos.

Cada edificio posee una determinada vida útil; es decir, que en un determinado momento este ya cumplió sus funciones o la demanda de infraestructura o edificaciones es mayor de la que el edificio puede cubrir. Además, resulta evidente que no siempre se pueden encontrar terrenos disponibles para la construcción de nuevas instalaciones, lo cual sería un crecimiento horizontal de la ciudad, por lo que es necesario construir de manera vertical. Es por esto que cada año se observan mayores cantidades de edificios de cada vez mayor altura en Lima Metropolitana. Ahora que se tiene planteada una solución, el crecimiento vertical, es imprescindible reconocer que para construir hay que destruir; es de carácter inevitable el aumento de las demoliciones en cualquier país, ya que la construcción de nueva infraestructura

significa la demolición de la precedente. Debido a este crecimiento inevitable a lo largo de los años es necesario poner en la balanza el beneficio de la nueva estructura con el impacto ambiental generado por el proceso de demolición y la gestión de los residuos generados. Se requiere cuanto antes un sistema sostenible para obtener los beneficios deseados sin una tasa incontrolable de impacto ambiental. Por esto, es necesario en primera instancia analizar las alternativas de demolición disponibles en el presente para tener una primera idea del impacto ambiental generado y el costo real de cada alternativa.

La gestión de los residuos sólidos de construcción y demolición, así como la búsqueda de una alternativa de demolición más sostenible, es un tema que ha tenido especial importancia en las últimas décadas en el ámbito internacional. Dicha gestión tiene por finalidad contribuir a la disminución del impacto de estos potenciales desechos hacia el medioambiente, a la vez que repercutiendo en otros aspectos tanto sociales como económicos. Existen diversas variables que influyen en el ciclo de vida de los residuos tales como la clasificación in situ de los mismos, el reúso y reciclaje, el transporte generado a partir de estos procesos, el efecto sobre el medioambiente, etc. Si no es llevada a cabo una correcta elección del sistema de demolición ni la gestión de sus residuos o si el gestor desestima alguna de las variables mencionadas, se estarían dejando de lado posibles nuevos flujos de capital repartidos en estos procesos, los cuales incurren positivamente sobre los efectos medioambientales de los residuos generados. (Bertrand, 2009). Para que esto se lleve a cabo, es necesario, en primera instancia, convertir el residuo en un bien común (Hardin, 1968), es decir, poner en evidencia los flujos económicos que se generan a partir de una correcta gestión de los residuos de demolición, lo cual solo se lograría si se formalizan los sistemas de recolección, transporte, reutilización y reciclado de estos.

Debido al estado actual y a las diversas problemáticas generadas alrededor de la demolición y la pobre gestión de los residuos generados a partir de esta actividad es que se vuelve de gran importancia llevar a cabo un análisis de los impactos que estas generan en el ambiente, así como sus implicancias económicas.

El análisis de actividades, productos o servicios a través de la eco-eficiencia se muestra como una alternativa viable para poder conocer los impactos en ambos aspectos. La eco-eficiencia, tal y como se define en la ISO 14045:2012 *Environmental management — Ecoefficiency assessment of product systems — Principles, requirements and*

guidelines (ISO 14045, 2012) es un aspecto de la sostenibilidad que relaciona el desempeño ambiental (resultados cuantificables relacionados a aspectos ambientales) de algún sistema con la valoración del mismo. Esta valoración arbitraria depende de qué deseamos evaluar del sistema y puede abarcar aspectos funcionales, económicos, estéticos, entre otros.

En el proceso de análisis la perspectiva ambiental se aborda a través del Análisis de Ciclo de Vida mientras la elección de la valoración del sistema queda a libre elección del evaluador, ya que las normas ISO no presentan un método estandarizado para proceder a analizar alguna en específico. Entre las alternativas de valoración, la perspectiva económica es una elección interesante. Esta puede evaluarse a través del *Life Cycle Costing* (LCC), el cual pondera impactos económicos, contribuye a tomar decisiones basadas en los resultados con el fin de establecer alternativas de regulación y procedimientos que se basen en estándares internacionales que se adecúen a la viabilidad de ejecución en nuestro entorno con el propósito de generar el mínimo daño ambiental, a través de, por ejemplo, la segregación y reutilización de recursos, que, a su vez, tiene potencial incidencia en los intereses económicos y sociales de los involucrados (por ejemplo, aprovechar el reúso como alternativa ante la compra de nuevos materiales, generación de ingresos económicos por la venta de desechos segregados y clasificados, oportunidad de empleo para este sector y afines).

La investigación, entonces, se basará en el análisis del proceso de demolición y la gestión de los residuos sólidos derivados de la misma en una edificación desde una perspectiva ambiental, como parte de un análisis de eco-eficiencia, antes, durante y después de ejecutarla. El “antes” abarca los procesos involucrados con el tratamiento previo de los componentes potenciales de reutilización y su gestión; el “durante” se refiere al proceso de demolición, donde entran en el análisis la materia y energía usadas para llevarla a cabo; y, finalmente, el “después” considera cómo se aprovechan o no los materiales resultantes de la demolición en sí, cuál es su tratamiento (si existe) y cuál sería su destino final.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. La demolición

La construcción está catalogada como una de las actividades más antiguas ejercidas por el ser humano, y, junto a ella, se puede encontrar a la demolición de las construcciones debido a necesidades de ampliación de espacio, derribar estructuras enemigas u alguna otra situación que la historia ha deparado. Si hacemos referencia a dichos periodos de la historia, la demolición era tomada como una construcción al revés: un planteamiento inverso del proceso, situación que se ajustaba perfectamente a los tipos de sistemas estructurales de la época como construcciones de mampostería. Sin embargo, la evolución de los sistemas constructivos, junto al desarrollo de diversos materiales más resistentes, ha contribuido a que las demoliciones se desarrollen bajo sistemas más complejos (Grupo Español del Hormigón [GEH], 1997).



Figura 2: Demolición parcial del antiguo Pabellón B de la PUCP

Fuente: fotografía brindada por la empresa Edifica (ing. Abner Guzmán)

El raudo crecimiento demográfico de las sociedades ha ocasionado que exista una gran demanda de construcciones. Esto va de la mano de la necesidad de las naciones por permanecer a la vanguardia de las exigencias de la globalización, traducido en una voluntad de progreso. Estas implicancias conllevan a la eliminación de edificios y estructuras que se encuentran al final de su vida útil o son poco llamativos para compradores o inversionistas. Luis Fueyo presenta un estudio llevado a cabo por la

Asociación Europea de Demoliciones en la Unión Europea, cuyo resultado muestra el crecimiento del número de demoliciones efectuadas en décadas pasadas, acompañado de un pronóstico de crecimiento en los años venideros, el cual asocia al comportamiento futuro que tendrán las diversas sociedades del planeta (sociedades en desarrollo) debido a la globalización (2003).

El término demoler se encuentra en el Diccionario de la Real Academia Española como deshacer, derribar, arruinar. Luis Fueyo (2003) amplía un poco más el concepto al denominarlo como el *“troceo de una estructura, en todo o en parte, para su eliminación o reformado”*, concepto que engloba la ejecución de la demolición de la estructura en su ubicación original destinada a ser eliminada y el transporte de los fragmentos provenientes de esta hacia una planta de reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, o algún vertedero de residuos inertes. Asimismo, contempla la posibilidad de llamar demolición a un troceo parcial destinado a, por ejemplo, la rehabilitación de la estructura.

Por otro lado, el Grupo Español del Hormigón (1997), define a la demolición como *“todas aquellas actuaciones realizadas en una estructura que se encaminan hacia la desaparición parciales o total de la misma en la ubicación donde se sitúa y el traslado posterior de los productos restantes”* y considera esta definición como la más acertada, diferenciándola de conceptos que comúnmente son parte de ella como derribo, que hace referencia a la destrucción total de la construcción, con métodos masivos y poco especializados, donde se presenta poca posibilidad de obtener residuos en forma clasificada; o desmontaje, que refiere a la demolición de la estructura siguiendo un proceso inverso al de su construcción, fragmentando los elementos y obteniendo residuos clasificados debido a la naturaleza del proceso. Realizando una sinergia de ambas definiciones podemos considerar a la demolición como la eliminación de una estructura en forma total o parcial, según el método más adecuado, considerando la disposición final de los residuos que esta genere.

En líneas anteriores se mencionaron algunas generalidades de por qué las demoliciones han ido aumentando en número en los últimos años. Adicionalmente, el Grupo Español del Hormigón señala razones más específicas de por qué se suscita la demolición de alguna estructura. En primer lugar, señala el riesgo de colapso de la estructura, el cual atribuye a malas prácticas en la ejecución de la construcción de la misma, baja calidad de materiales, uso inadecuado de la misma o sufrimiento de algún siniestro como un

incendio o sismo severo, disminuyendo la seguridad que puede ofrecer a los usuarios, por lo que se opta por la eliminación de la estructura.

En segundo lugar, enuncia la funcionalidad de la estructura, caso que responde a la necesidad de que la estructura pase por un proceso de adecuación con el fin de satisfacer las exigencias del entorno como seguridad, fluidez de tráfico o renovación de equipos que, en algunas ocasiones, pueden representar un costo mayor la remodelación, propiciando la demolición parcial o total de la edificación, la llamada obsolescencia funcional.

A continuación señala las exigencias sociales de servicio, catalogándolas como aquellas situaciones en las cuales, por más que la estructura se encuentre en un estado aceptable y sin observaciones, se prioricen las motivaciones de equidad social. En seguida, resalta la reivindicación de valores históricos, donde prima la recuperación, conservación o embellecimiento de lugares con este título, a través de demoliciones parciales para su restauración o demoliciones totales de estructuras contiguas que no poseen dicha denominación para agregar valor a las que sí.

Luego menciona a la estética, que se basa en el mal aspecto que pueda tener una estructura debido al mal mantenimiento o a las exigencias modernas de sensibilidad estética vigentes que no necesariamente comprometen la estabilidad de la estructura. Por otro lado, menciona el cumplimiento de sentencias judiciales, que, comúnmente se podrían dar por transgredir mandatos municipales o parámetros urbanísticos de la zona. Por último, señala la finalización de la vida útil de la estructura, que aplica al término del periodo de uso recomendado por el diseñador o también a la necesidad de renovar el espacio ocupado por esta, optando por opciones más modernas.

Luis Fueyo (2003) señala que cualquiera que sea la motivación que nos lleva a efectuar la demolición de alguna estructura, esta deja abierta la posibilidad de emplear cualquier método de demolición existente, donde resalta que es muy poco probable, además, que se emplee solo uno de estos procedimientos, siendo común la aplicación de una combinación de los métodos más convenientes tomando en cuenta variables como el tipo de estructura a tratar y su emplazamiento.

Sin embargo, se puede reconocer que existen aspectos en común en cualquier proyecto de demolición que se deben conocer antes de llevarse a cabo. Estos son: causas de la demolición, datos de emplazamiento, conocimiento y evaluación de la estructura,

definición de los límites de la demolición, conocimiento de las técnicas de demolición, destino y reutilización de los materiales secundarios, previsión de tareas de investigación, aspectos relativos a la seguridad (GEH, 1997).

Asimismo, Arham Abdullah (2003) y Fueyo (2003) consideran que en toda demolición, por muy particular que sea, se pueden distinguir cuatro tareas fundamentales:

- i) trabajos previos, que comprenden las etapas desde la toma de decisión de la demolición de la estructura hasta que esta se ejecuta realmente, lo cual incluye el estudio de la edificación, proyecto, trámite de autorizaciones, señalización y clasificación de materiales peligrosos, reutilizables o reciclables;
- ii) demolición primaria o pre-demolición, derribo de la estructura hasta dejar sus elementos hasta el nivel del terreno a través de la fragmentación de los mismos;
- iii) demolición secundaria, considerada una etapa transitoria entre la demolición y la gestión de residuos, que comprende una fragmentación más exquisita de los elementos constructivos, donde, en caso se requiera, se adecúen los escombros para ser cargados sobre camiones o contenedores, u optar por utilizar plantas de reciclaje in situ o simplemente la separación del material obtenido;
- iv) post-demolición o gestión de residuos, manipulación, tratamiento y transporte de los materiales generados por la demolición que puede comprender desde la carga y transporte a vertedero hasta el reciclaje in situ o en plantas de reciclado.

Una vez conocidos los datos esenciales de la estructura a demoler, es de suma importancia conocer cuáles son las alternativas presentes para poder abordarla, para así poder decidir cuál es la más conveniente para el proyecto. A continuación se presentarán de manera general los métodos más conocidos para efectuar la demolición de una estructura.

2.1.1 Demoliciones Manuales

La demolición manual es aquella que se lleva a cabo con herramientas de mano, tanto en la demolición propiamente dicha, como en el traslado de los residuos que se generan. Es habitual encontrar herramientas comunes tales como picos, rastrillos, carretillas, combas, martillos o aquellas de funcionamiento eléctrico, hidráulico o mecánico que serán aplicadas por un operador directamente hacia el objeto a ser demolido.

Muchas veces es la única opción a elegir debido al espacio reducido que pudiera ocupar la estructura a demoler o la capacidad portante de la misma, que no permite el empleo de algún equipo de gran envergadura. Debido a la mecanización de estos procesos, la demolición manual resulta, a veces, más caro que emplear un método que involucre maquinaria pesada. Sin embargo, es común ver este tipo de demolición como parte principal de aquellas destinadas a la remodelación de la estructura, o como complemento de algún sistema de demolición más complejo (Fueyo, 2003).

2.1.2 Demolición mediante explosivos

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCC) (1984) considera el método de demolición mediante explosivos como una fuerza controlada con alta liberación de energía que debe ser llevada a cabo por personal competente y autorizado con experiencia en el rubro. La ejecución de la demolición es llevada a cabo mediante la colocación de elementos de manera oblicua en posiciones previamente estudiadas, donde los factores de posición, ángulo y profundidad del agujero barrenado donde se introduce la carga se basan en cálculos preestablecidos y no en la experiencia del ejecutor, como se realizaba en épocas pasadas. Este método de demolición es aplicable tanto a demoliciones totales como parciales de una estructura, donde los explosivos usados mayormente son la nitroglicerina, el trinitrotolueno y la pólvora negra. Asimismo, considera que la demolición mediante explosivos es un método versátil, de gran rendimiento, silencioso y de ejecución rápida frente a otros sistemas, cuyas principales desventajas serían la vibración excesiva del suelo, la expulsión de fragmentos residuales y el hecho de que los explosivos tienen limitado impacto frente al corte del acero de refuerzo (IMCC,1984).

Por otro lado, el Grupo Español del Hormigón (1997) considera que el uso de explosivos es una técnica que ejerce presión sobre los elementos, debido a la rotura que se suscita en el concreto por el gas caliente generado durante la explosión, llegando a alcanzar presiones del orden de 10 000 atmósferas, donde se generan ondas de presión con velocidades de 7 000 metros por segundo. Las cargas explosivas son colocadas de manera estratégica de tal manera que se crea un escenario de demolición controlado donde se usan tipos de explosivos que fracturen localmente elementos de sostenimiento de la estructura, como columnas o muros, a manera de herramienta de corte para dichos elementos. Estos elementos, a base de nitroglicerinas y

nitrocelulosas, permiten generar una onda cuyo efecto es nulo a más de dos o tres metros.

Según Luis Fueyo (2003), se pretende con este tipo de demoliciones generar un desequilibrio en la estructura, mas no esperar que el explosivo genere la destrucción total de la estructura. Coinciden con el autor anterior en que es un sistema rápido y económico, sobretudo en grandes estructuras de elevada esbeltez, pues propicia una mejor secuencia de caída; sin embargo, no es adecuado para sistemas con elementos pretensados o gran cuantía de acero.

El Grupo Español del Hormigón sugiere que se tomen en consideración tres aspectos fundamentales para este tipo de demoliciones: en primer lugar, considerar un perímetro adecuado para la caída de escombros, que, contrariamente a lo que se pueda pensar, es normalmente pequeña. Da un ejemplo para un edificio de cuarenta y cinco metros de alto y base de lados de dieciocho y veinte metros cuyos escombros producto de la caída del edificio no pasaron los 5 metros de alcance. En segundo lugar, sugiere considerar una zona de 50 m de radio donde se deben cubrir los edificios para evitar el daño debido a escombros eyectados productos de la caída, más no de la explosión, pues estos, como se mencionó antes, no producen efectos si se encuentran bien posicionados. Por último, se menciona que se debería restringir el acceso a peatones en un radio de entre ciento cincuenta y doscientos metros, por medidas de seguridad (Grupo Español del Hormigón, 1997). Cabe mencionar que esta medida de seguridad no tomará mucho tiempo, debido a la naturaleza del sistema. Coincide con el autor anterior en las desventajas que presenta en términos de vibraciones generadas y material expulsado por la caída de la estructura, a lo que añade la generación de polvo al momento del derribo, el cual estima en una duración entre tres a cinco minutos, dependiendo solo de la presencia de viento en la zona.

Luis Fueyo, en su libro *Manual de demoliciones, reciclaje y manipulación de materiales* (2003), ofrece una guía detallada con las consideraciones necesarias para la ejecución de la demolición con explosivos de estructuras de concreto armado, mampostería e incluso metálicas, donde da a conocer las leyes aplicadas en España, empresas autorizadas, tipos de explosivos y detonadores, así como el proceso de ejecución.

2.1.3 Masa suspendida (bola y grúa)

El método de masa suspendida es uno de los métodos más comunes de demolición. Se basa en el impacto a través del balanceo o en caída libre de una masa suspendida de entre cinco a diez toneladas de forma esférica y metálica, sostenida por una grúa con dos cabrestantes donde uno de ellos sirve para elevar o hacer descender el peso y el otro para acercarlo hacia sí misma para poder generar un ángulo de inclinación suficiente para que impacte a la estructura. Este método es sumamente conveniente si se desea efectuar el derribo de estructuras de gran tamaño a bajo coste; sin embargo, al ser un proceso tosco y que depende de la experiencia del operador y el estado de la maquinaria, presenta muchas limitantes en cuanto al poco control del proceso debido a colapsos inesperados que pueden ocasionar un enganche de la masa durante la caída de la estructura, lo que podría generar el vuelco de toda la maquinaria. Asimismo, se requiere un espacio libre considerado alrededor de una y media veces la altura de la edificación. Por lo tanto, no es aconsejable llevarla a cabo en zonas densamente pobladas. Este tipo de demolición no suele romper el acero de refuerzo y genera polvo y vibración en exceso (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

2.1.4 Lanza térmica

Se trata de un proceso exotérmico donde se forma una lava incandescente de silicatos de calcio y hierro. El equipo usado consiste en una boquilla a la que se le adapta por un lado un equipo que alimenta oxígeno y por otro un tubo de acero dulce no soldado de aproximadamente tres metros de longitud y 9.50 a 19 milímetros de diámetro, en cuyo interior se introducen varillas de acero de bajo o alto carbono o aluminio, las cuales servirán de combustible para el proceso. Se debe calentar la punta del tubo con un soplete y accionar el suministro de oxígeno a una presión aproximada de 7.14 kg/cm², cuya reacción con el propio tubo y las varillas genera temperaturas que van desde los dos mil doscientos grados Celsius a los cuatro mil, dependiendo del tipo de varilla que se utilice, permitiendo fundir el concreto de tal manera que se pueda cortar o perforar (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

La velocidad con la que se funde el concreto es reducida y dependerá del drenaje de la lava y escoria formadas. Se ha observado que los cortes horizontales presentan una mayor velocidad de corte, ofreciendo un rendimiento de 0.50 metros cuadrados por hora. Debido a la naturaleza del proceso, este requiere que los operarios utilicen equipo

de protección personal especial para soportar altas temperaturas como batas, pantalones, guantes aluminizados, zapatos herméticos, cascos contra polvo y una malla metálica entre el operador y la zona de trabajo (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

El proceso general de la demolición dependerá de si existe algún sistema secundario a utilizar, pues este determinará el espaciamiento de los agujeros adyacentes de la línea de corte en el concreto (se puede usar la presión expansiva o herramientas mecánicas manuales). Las ventajas de este proceso radican en que no causa vibración, es rápido e ideal para evitar el ruido, no tiene problemas a la hora de efectuarse en estructuras metálicas o muy reforzadas, pues el acero presente acelera la combustión (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

2.1.5 Hidrodemolición

La hidrodemolición consta de un método poco destructivo y preciso que originalmente era usado para el corte de chapas, retazos de tela y planchas de aluminio, y que se viene usando desde hace más de veinte años en España como un método adecuado para la demolición de estructuras. Se basa en el principio de agua a alta presión a través de un fino chorro a través de un orificio de tres a cinco milímetros de diámetro. Estas presiones oscilan entre los mil y dos mil kilogramos por centímetro cuadrado, utilizando un caudal medio de 240 litros de agua por minuto. Se utiliza un equipo compuesto por un carro sobre orugas donde se le puede montar una torre para permitirle un movimiento vertical (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

Este método tiene como ventajas el no producir ningún tipo de vibración, ser rápido, sin generar polvo, es muy preciso y con rendimientos parecidos a otros sistemas de demolición (entre 0.30 y 0.50 metros cúbicos de concreto fragmentado por hora). Es posible aumentar dicho rendimiento y reducir la cantidad de agua utilizada, que es el recurso que más utiliza, a través de la adición de materiales abrasivos como limaduras de cobre o arena de cuarzo. Es ideal para demoliciones parciales, pues la precisión que ofrece no genera micro fisuras en el concreto ni daña la armadura de acero. Es por eso que en caso se desee emplear para una demolición de mayor envergadura es necesario un método complementario de corte del acero de refuerzo (IMCC, 1984; GEH, 1997; Fueyo, 2003).

2.1.6 Tipos de demolición usadas mayormente en el Perú

Hasta ahora se han presentado los sistemas de demolición más usados en países desarrollados con gran auge y diversidad de estructuras. Sin embargo, el caso de nuestro país es ligeramente más simple pues, a la fecha, la mayoría de estas técnicas no han sido implementadas. Jooler Obando, gerente de operaciones de la empresa Almasa (especializada en movimiento de tierras, pavimentaciones y demoliciones), menciona que generalmente, en el Perú, en años anteriores las demoliciones eran manuales o “semimanuales”. Sin embargo, al día de hoy ya se emplean equipos pesados con una menor participación de personal. Asimismo, otros tipos de demolición, por ejemplo aquella con uso de explosivos, no se llevan a cabo en el país pues, según Walter Cáceda, gerente general de Democame (especialista en demoliciones, excavaciones y movimiento de tierras), la mayoría de demoliciones se realizan en zonas urbanas y no se trata de enormes infraestructuras que lo justifiquen (Constructivo, 2016).

Evaluando a empresas representativas del medio en el sector peruano de demoliciones como Flesan, Volquete Maquinarias, Maesc, Almasa, Ciaperdemo, Demolsac, Eivisac, Democame, encontramos que el procedimiento que siguen para efectuar la demolición de alguna estructura es aquel que combina un sistema manual con uno mecánico, el cual consiste en el uso de maquinaria pesada, donde se suele demoler el edificio nivel a nivel. Con respecto a sistemas alternativos a este solo se pudo apreciar que se utilizan explosivos para llevar a cabo la fragmentación de elementos de manera puntual, como zapatas y otro tipo de cimentaciones. De las compañías antes mencionadas, Ciaperdemo fue la única que contaba con este servicio. Debido a que el caso a evaluar se asemeja a este tipo de demoliciones, se procederá a dar un alcance de lo que comprende:

2.1.6.1 Demoliciones mecánicas

La demolición mecánica puede ser considerada como la evolución de la demolición manual gracias a la mecanización de los procesos. Las herramientas antes accionadas directamente por los operarios pasan a ser controladas por los mismos pero ahora a través de unos mandos destinados a posicionar la herramienta de demolición mediante brazos mecánicos y otros destinados a accionar la herramienta de demolición. Esta innovación tecnológica implica un aumento en la productividad de las labores,

reducción de costos y plazos, acompañados de un notable incremento en la seguridad de los trabajadores que operan las máquinas. Debido a las características de los equipos empleados en la misma, estas demoliciones pueden ser clasificadas como llevadas a cabo con equipo ligero (hasta tres toneladas), mediano (de tres a diez toneladas) o pesado (de diez a más toneladas) (Fueyo 2003).

Este tipo de demolición puede ser encontrado en la literatura como un sistema de martillos picadores sobre vehículos (Grupo Español del Hormigón, 1997) donde se ofrece una clasificación de los martillos por rendimiento en metros cúbicos por hora según su tamaño: pequeños (de 1 a 3 m³/h), medianos (de 10 a 20 m³/h) o grandes (de 25 a 40 m³/h). También se encuentra como un sistema compuesto por rompedores hidráulicos y neumáticos montados en máquinas (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto [IMCC], 1984), donde se reconoce, para la época, la innovación de esta tecnología y se le reconoce también como la evolución de la demolición manual. Ofrece una clasificación de las maquinarias empleadas en esa época como rompedores neumáticos, hidráulicos, plumas telescópicas de demolición y bulldozer con cucharón de demolición.

Luis Fueyo (2003) cataloga a este método como aquel básico para cualquier tipo de demolición y señala que siempre estará presente en una pues es el método más conveniente para la fase de gestión de residuos, reestructurando las fases de demolición enunciadas anteriormente y agrupando la demolición primaria y secundaria en una sola. Asimismo, señala que si bien las demoliciones pueden clasificarse por los métodos empleados para efectuarlas, las demoliciones mecánicas por la naturaleza de la acción que desarrolla sobre la estructura y por el tipo de máquina y accesorios que emplea tanto para la demolición mecánica como para las labores auxiliares.

2.1.6.1.1 Demolición por empuje o tracción

Se basan en la desestabilización de la estructura a través de la aplicación de fuerzas de empuje o tracción donde se emplea maquinaria que genera grandes esfuerzos en la construcción, cuyos limitantes radican en el tamaño de la máquina, la eficacia de aplicación, la altura de la estructura y su robustez. Esta técnica es considerada muy económica ya que la maquinaria empleada es de uso común; sin embargo, presenta serias dificultades en la separación de residuos luego de la demolición pues es muy

común que estos se mezclen con los escombros. Es por eso que es normal que antes de efectuar la demolición se lleve a cabo una fase previa de desmontaje de materiales reutilizables y posteriormente, según los alcances especificados, una separación paulatina de los residuos obtenidos.

Es común ver que este tipo de demolición se lleve a cabo con equipos sin implementos especiales, cuyo rendimiento estará basado solo en la versatilidad de la máquina y la habilidad del operador, donde se deberá identificar los puntos más débiles de la estructura para poder efectuarla con la mayor rapidez y seguridad posible. Las consideraciones generales que se deben tener en cuenta con la maquinaria empleada radican en el alcance vertical de esta, sugiriendo un límite en que la altura de la estructura a demoler no sea mayor a dos tercios del alcance máximo de la máquina, caso contrario el espacio entre el equipo y la construcción será mínimo, disminuyendo la seguridad del proceso.

Los equipos más comunes empleados en este tipo de demoliciones son las retroexcavadoras, cargadores frontales y *bulldozers*. Las retroexcavadoras son las máquinas más empleadas en demoliciones debido a su gran versatilidad para desplazarse y realizar giros sobre sí mismas. El brazo de una retroexcavadora se compone de monobloc, balancín y cuchara, cuyo alcance dependerá del tamaño de la máquina. La cuchara de la retroexcavadora se emplea para efectuar la desestabilización de la estructura y acomodo de escombros en una primera fase. El éxito de este tipo de demolición se basa en la poca resistencia a tracción que presentan los elementos de concreto armado, sobre todo actuando en los elementos estructurales más importantes de tal manera que se desliguen de la estructura progresivamente y se proceda a debilitarla.

Del mismo modo puede usarse para estructuras metálicas a través de la concentración en las uniones de los elementos. Se recomienda emplear retroexcavadoras sobre orugas debido a su mayor estabilidad, sin embargo, aquellas sobre ruedas son muy útiles en ámbitos urbanos. Los cargadores frontales no son recomendables para efectuar una demolición en sí misma de una construcción de más de un piso debido a su baja efectividad y poca versatilidad de movimiento. Sin embargo, son muy consideradas en labores auxiliares de demolición como son carguío de residuos y limpieza del terreno debido a que tiene una cuchara de mucho mayor tamaño que la retroexcavadora, con un movimiento cercano al suelo que facilita sus maniobras y, en caso esté montada

sobre orugas, tendrá un buen desplazamiento sobre escombros. Los *bulldozers* son máquinas recomendadas para labores auxiliares de demoliciones de gran envergadura, pues su única labor sería apilar grandes cantidades de residuos debido a su gran capacidad de empuje, superior a las de las anteriores.

Otras técnicas menos empleadas en el medio pero de gran difusión en países Europeos se resumen en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1: Técnicas de demolición mecánicas empleadas en países europeos

Técnica de demolición	Descripción
Por prolongadores o arietes	A través de la sustitución de la cuchara de una retroexcavadora por un ariete, se dota a la máquina de mayor empuje, donde la demolición se realiza de arriba a abajo a través de golpes repetitivos en la estructura que generan fuerzas de tracción que debilitan la estructura.
Por grapas o manipuladores hidráulicos y mecánicos	Se opta por la sustitución del cucharón de la retroexcavadora por una grapa que funciona como una “mano” la cual puede abrir y cerrar libremente así como realizar giros completos sobre sí misma. Es muy útil para la fase de manipulación de residuos.
Por cables	Se basa en la desestabilización de la estructura a través del desplazamiento de la misma a través de la tracción ejercida con cables amarrados en elementos importantes de la estructura en la parte superior.
Por empujadores hidráulicos	Se basa en un proceso inverso al anterior, se trata de desestabilizar a la estructura desde la parte inferior de tal manera que caiga sobre sí misma a través de la acción de cilindros hidráulicos sobre las columnas de la misma.

Nota: Fuente: Adaptado de Fueyo, L. (2003). Manual de demoliciones, reciclaje y manipulación de materiales. Fueyo editores. Grupo Español del Hormigón (1997). Demolición y reutilización de estructuras de hormigón. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (1984). Demolición de Estructuras de Concreto Reforzado y Presforzado. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

2.2 Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son productos del crecimiento en la construcción; sin embargo, inclusive en un país con más desarrollo en los ámbitos de gestión de RCD como España existen deficiencias en los planes de reutilización y reúso de estos. Según informes españoles para el año 2010, a pesar de ser el quinto país europeo en la generación de RCD, solo se reciclaba el 5% del total (Del Río, Izquierdo, Salto, & Cruz, 2010). Asimismo, en este mismo país, la media de producción de RCD por habitante/día ascendió a los 2kg en los últimos años (Del Pozo, Valdés, Aguado, Guerra, & Medina, 2011).

El 15 de septiembre de 2006 se presentó el borrador del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) a las comunidades autónomas y a fines del año 2008 fue consensuado por estas comunidades (Ministerio de Medio Ambiente, 2007). En este plan se incluyen 13 planes de residuos según el tipo de actividad que los genera y entre estos está el Plan Nacional de Residuos de construcción y demolición (Bustillo, 2010). El principio más básico del PNIR es el principio de jerarquía, el cual, según Bustillo (2010), "...consiste en establecer una secuencia ordenada y lógica de modalidades de gestión, de mayor a menor calidad ecológica, que se acepta como directriz general a la hora de decidir o escoger la mejor gestión para los residuos."

Asimismo, el autor señala que la condición para que se lleve a cabo este principio es la existencia, y la viabilidad técnica y económica de más de una alternativa de gestión. Esto permite tener un criterio para priorizar cierta actividad relacionada a la gestión de los residuos o prevención de la producción de estos respecto de otra. En la Ley de Residuos del año 1998 en España, previa a la creación del PNIR, se adopta una jerarquización de 5 niveles tal como lo indica Bustillo, la cual sigue la siguiente secuencia de prioridad: prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y vertimiento (eliminación en botaderos o mediante incineración con nula o baja recuperación energética) (Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, 1998). Los niveles de jerarquización en el proceso de que se dan en la Ley 10/1998 son los siguientes:

Prevención: La primera prioridad evidentemente antes de gestionar o tratar con los mismos residuos es evitar su generación. A pesar de ser una medida con un alto impacto sobre el proceso de gestión, la prevención constituye una alta inversión económica en tecnología, nuevos procesos con menor cantidad de producción de

residuos y además un proceso de concienciación de los agentes productores de ellos. El grado de prevención depende tanto del crecimiento económico como de la cultura del agente productor de estos frente al impacto que generan sobre el medio ambiente (Bustillo, 2010).

Reutilización: Tal como lo dice el nombre, el proceso implica el uso posterior del residuo para lo mismo que fue usado anteriormente. Esto implica que no se usarán nuevas materias primas y se reduce la cantidad de residuos generados, siendo las actividades para su revaloración los procesos de comprobación, limpieza y reparación en caso de ser necesario, todo esto sin llevar a cabo mayores transformaciones. La reutilización implica un máximo aprovechamiento de los recursos y al tener mínimos procesos para su revaloración también significa una reducción significativa en el uso de energía y un ahorro importante en la fabricación (Bustillo, 2010).

Reciclaje: A diferencia de la reutilización en este nivel se llevan a cabo procesos de transformación más complejos donde el residuo termina con un uso distinto al que tenía antes de ser un residuo. Se pueden encontrar 2 niveles de reciclado según Gaiker (2007), el mecánico y el químico. En el primero se busca recuperar el material para su uso en la misma aplicación con ciertas exigencias técnicas, y en el segundo se busca recuperar la materia prima que se usó para la fabricación (Bustillo, 2010).

Existen dos tipos de reciclados: manuales, donde hay una clasificación primaria de los residuos, luego un desmantelamiento y finalmente una clasificación de las partes; y mecánicos, donde se suponen operaciones con maquinaria, por ejemplo, fragmentación, pulverización, entre otras operaciones. Estos procesos a veces son descartados ya que la incineración y el vertimiento suelen ser más económicos, por lo cual para analizar el costo del reciclado y su viabilidad en términos monetarios Gaiker (2007) propone 6 factores que afectan al costo total: costo de separación, transporte, almacenamiento y acondicionamiento; material disponible y el estado de este; distancia de la fuente al lugar de valorización; costo del proceso de transformación; características finales y utilidad del producto final; y la demanda del mercado del producto obtenido.

Valorización: “... un residuo es, en realidad, una materia prima producida en un lugar inadecuado y un momento inoportuno.”, con esta frase Bustillo (2010) empieza el párrafo que describe la valorización del residuo. Esta frase suscita el pensamiento de

que casi cualquier residuo puede ser transformado en material para elaborar nuevos elementos o energía. Valorizar es el proceso mediante el cual el residuo se convierte en un material útil al reemplazar a otro en función, aplicación o energéticamente. Debido a que los materiales que se encuentran en este nivel de prioridad la valorización no son en materia, sino en la energía que estos contienen. Esta energía es generada mediante la incineración del material usando el potencial calorífico de cada material; sin embargo, a pesar de que se lleve a cabo una eliminación parcial, un menor consumo de energía y la generación de energía, este proceso produce dioxinas y furanos en sus etapas, razón por la cual en diversos países industrializados esta opción tiene muchas críticas. Para controlar la emisión de estos compuestos organoclorados, la norma española la limita con un tope de 0.10 nanogramos/m³ (Bustillo, 2010).

Eliminación: este es el último nivel de prioridad, el último recurso a usarse. Consiste en la eliminación del residuo mediante el vertimiento en un botadero, o en su defecto a través de la incineración. Esta última forma de eliminación puede ser de baja recuperación de energía o de nula, siendo la segunda para específicos materiales que constituyen residuos peligrosos. A pesar de ser la última prioridad en varios países (como el Perú) resulta la opción más fácil debido a la facilidad logística del proceso y esto se debería tratar de erradicar (Bustillo, 2010).

En primera instancia, es necesario saber aproximadamente la composición de los RCD. Aunque los porcentajes de cada material por unidad de RCD son cifras a grandes rasgos debido a que hay mucha variabilidad en un proceso de demolición, dan una idea de cómo están compuestos los RCD y del tipo de material que abunda en este. Bustillos (2010) muestra una tabla perteneciente al Plan Nacional de residuos de Construcción y demolición 2001-2006 que, a pesar de dejar de estar en vigencia, muestra una composición de los RCD; asimismo, muestra otra composición de los residuos según la Estrategia de Residuos de la Comunidad de Madrid 2006-2016, donde se observan algunas diferencias pero se mantiene un promedio en la constitución de los RCD. La Tabla N° 2 muestra una comparativa de la composición de los RCD para ambos periodos.

Tabla N° 2: Composición De RCD Para Periodos De 2001 Al 2016

Material	% (2001-2006)	% (2006-2016)
Ladrillos y cerámicos	54	54
Hormigón	12	12
Piedra	5	5
Agregados gruesos y finos	4	9
Madera	4	9 ⁽¹⁾
Vidrio	0.5	.5
Plástico	1.5	4 ⁽²⁾
Metales	2.5	5
Asfalto	5	-
Yeso	0.2	-
Papel	0.3	.5
Basura	7	-
Otros	4	1

Nota Fuente: Manual de RCD y áridos reciclados, Bustillo (2010).

1: Suma de la madera obtenida de las fracciones no minerales y de los voluminosos de obra.

2: Suma del plástico obtenido de las fracciones no minerales y de los voluminosos de obra como plástico industrial.

En el Perú también se experimentó un aumento sustancial en la construcción en los últimos años. Según la Municipalidad de San Isidro, en su Plan Urbano Distrital 2012-2022, la demolición para el reemplazo de antiguas edificaciones es inherente a la evolución de las ciudades (MSI, 2012) y, consecuentemente, también de la producción

de residuos. A pesar de que las cifras de las cantidades de RCD generadas según los informes municipales no son significativas, debido a que dependen de las empresas que declaran las cantidades, no se incluyen los residuos de la construcción informal que constituyen un gran porcentaje de los residuos totales del país debido a la masificación de esta informalidad.

Debido a la falta de información en el contexto peruano, como se describió anteriormente, no es posible obtener indicadores estadísticos de mayor precisión (por ejemplo, un ratio de cantidad de residuos por habitante o un ratio de cantidad de residuos por metro cuadrado construido). Sin embargo, a partir de los datos proporcionados y las estadísticas de crecimiento en el sector construcción se hace evidente el aumento en la generación de RCD. Por ello, es necesario tomar medidas de mitigación y de una normativa que controle la situación. El Perú cuenta, para ello, con una Norma Técnica Peruana NTP 400.050 2014, la cual fue elaborada en el año 1999 y recientemente, en el 2014, fue revisada y aprobada. El título de esta norma es Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción y su objetivo primario es presentar lineamientos para un correcto manejo de los residuos de la actividad antes mencionada y tiene como antecedentes la norma técnica suiza y la hoja técnica alemana. Por más que esta norma no muestre un claro plan de gestión de los residuos, sí realiza una importante caracterización de los residuos y da una serie de opciones de reaprovechamiento de estos.

Según la NTP descrita anteriormente, los RCD se clasifican en 4 categorías: excedentes de remoción, excedentes de obra, escombros y otros residuos. Además, en la NTP se clasifica a los escombros según el origen, los cuales pueden ser concreto de demolición, mezcla asfáltica de demolición, material no bituminoso de demolición de carreteras y material de demolición no clasificado. Asimismo, se identifican tres tipos de residuos: reutilizables, reciclables y materiales para disposición final; estos tipos se presentan en cada categoría y la norma los presenta en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Categorización de los RCD según su origen y uso posterior

Excedentes de Remoción	Excedentes de Obra	Escombros
Reutilizables		
Agregados, piedras, tierras con contenido orgánico.	Cementos y aglomerantes, retazos de fierro, alambres, piedras, productos cerámicos.	Productos cerámicos, piedras.
Reciclables		
Bolonería.	Concreto sobrante, cascotes de ladrillo.	Mezcla asfáltica de demolición, concreto de demolición, material no bituminoso de demolición de carreteras, material de demolición no clasificado, mezcla de ladrillo con mortero.
Para disposición final		
Materiales contaminados.	Materiales contaminados.	Escombros contaminados.

Nota Fuente: NTP 400.050 2014

La NTP 400.050 también muestra las opciones de aprovechamiento de los recursos en la Tabla 1 de la misma norma, la cual se adjunta en el Anexo 1. En esta tabla se tienen los residuos según la composición y/u origen, los cuales se ordenan por procedencia. Posteriormente se muestra el tipo de proceso para la obtención del material secundario, y luego, se muestra el nombre del producto de este proceso. Finalmente, se presentan tres tipos de uso: I, II y III, donde el primero es el que tiene mayores requerimientos de aglomerante, y los otros dos no presentan necesidad de aglomerante siendo el tipo II el de mayor exigencia técnica. Asimismo, se asignan cuatro niveles de recomendación para los distintos usos, donde 1 es recomendable y el último nivel es no recomendable.

2.3 Legislación vigente

2.3.1. Legislación internacional

Es preciso comenzar la revisión de la bibliografía con aquellas medidas que se han intentado adoptar con la finalidad de establecer un control en cuanto a las actividades relacionadas con la demolición. Las aproximaciones más significativas se dan en la elaboración de *Códigos de Buenas Prácticas* orientados específicamente a demoliciones por parte de instituciones gubernamentales especializadas, en la mayoría de casos el departamento de edificaciones del país.

En dichos códigos se dictan pautas para efectuar las tareas de demolición de manera que no afecten la tranquilidad de las actividades aledañas, donde se da un alcance de los métodos generales de demolición y hacen gran énfasis en las precauciones que se deben tomar para salvaguardar la seguridad de los trabajadores, transeúntes y construcciones aledañas. Sin embargo, se ha encontrado un mayor número de documentos relacionados con el manejo de los residuos que estas actividades generan.

Las conclusiones de la Presidencia del Consejo Europeo en Gotemburgo (2001) señalan que debe efectuarse un cambio en la relación entre el crecimiento económico, consumo de recursos naturales y la generación de residuos. Esto significa que el desarrollo económico debe estar estrechamente relacionado con el uso sostenible de los recursos naturales, estableciendo niveles de residuos adecuados con la finalidad de mitigar el consumo de estos y el impacto ambiental generado, a través de un trabajo colaborativo con las empresas públicas y privadas en la Política Integrada de Productos de la Unión Europea (UE).

Bajo estos parámetros, la Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2006) estableció una serie de medidas para alcanzar este propósito: en primer lugar, prevenir y reducir la producción de los residuos y su nocividad a través del desarrollo de tecnologías limpias que permitan un mayor ahorro de recursos naturales, el desarrollo técnico y comercialización de productos que minimicen la cantidad o nocividad de los residuos y los riesgos de contaminación, el desarrollo de técnicas adecuadas de eliminación de sustancias peligrosas contenidas en los residuos destinados a ser valorizados; y en segundo lugar, impulsar la reutilización de los recursos a través de su revalorización por medio del reciclado, nuevo uso, recuperación u otra actividad destinada a la obtención de materias primas de segundo grado, y la

utilización de residuos como fuente de energía. Asimismo, establece directrices que obligan a los Estados a adoptar medidas prohibitivas que eviten el abandono, vertido y eliminación arbitraria de residuos.

Estos objetivos principales se lograrán a través de la implementación de uno o varios planes de gestión de residuos cuyos aspectos básicos hacen referencia a los tipos, cantidades y origen de los residuos; prescripciones técnicas, disposiciones de residuos particulares y lugares o instalaciones apropiados para la eliminación. Diversos países de la Unión Europea han acatado estas directrices y presentan en su legislación planes claros de gestión de RCD. España, por ejemplo, muestra un programa que tiene un plan a largo plazo, en el cual se espera que para el 2020 se invierta la jerarquía europea en la gestión de residuos; de tal manera que la prevención sea la mayor prioridad debido a la alta sostenibilidad de esta alternativa (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

En los Estados Unidos, la EPA (2014) cuenta con metas definidas respecto a la reducción y reutilización de RCD, que incluyen la caracterización de los mismos, la promoción de innovadoras prácticas de reducción y recuperación, impulsar mercados para materiales reciclados en nuevas edificaciones, trabajar junto a agentes clave en la industria de la construcción, remodelación y demolición con el fin de implementar métodos que utilicen los recursos eficientemente. Estos objetivos van acompañados de programas federales como la base de datos de administración de desechos de construcción de la Administración de Servicios Generales (GSA), que provee información sobre compañías que colectan, transportan y procesan escombros de los proyectos de construcción. La ciudad de Nueva York cuenta con un manual de gestión de RCD, cuyo fin principal es sentar las bases de prácticas que eviten la generación de residuos y desvíen la acumulación de estos a vertederos, impulsando su reutilización selectiva (Samton, 2003). Asimismo, el gobierno de California posee una guía digital que procura difundir el reúso y reciclaje de este tipo de residuos, los cuales representan el 29% del total del su flujo, con la finalidad de prolongar el suministros de recursos naturales y obtener un ahorro económico en el proceso (CalRecycle, 2014).

En Latinoamérica, diversos países se preocupan por una gestión planificada de RCD. Chile, desde 1998, pertenece al grupo internacional Green Building Challenge, donde promueven las buenas prácticas de construcción sustentable y buscan alternativas para mejorar la calidad de construcción en el país. Chile cuenta con el Acuerdo de

Producción Limpia, que involucra a empresas de diversos sectores y busca mejorar las condiciones de producción, ambientales y de higiene de sus actividades, que junto al Comité de Medio Ambiente de la Cámara Chilena de la Construcción y la corporación de Fomento de la Producción crearon la empresa Regeneradora de Materiales de la Construcción S.A., con la finalidad de externalizar el servicio de recojo y disposición de escombros, el cual generó el primer botadero autorizado para residuos inertes de construcción. Desde el 2012, luego de analizar las deficiencias de gestión presentes en el sismo de 2010, el gobierno chileno viene implantando medidas en relación al manejo de RCD. Se realizan encuestas para obtener índices de generación de estos y emplearlos en la elaboración de normativas para los mismos. Se suma a la normativa vigente chilena del sistema de evaluación de impactos ambientales y las regulaciones de las condiciones sanitarias de lugares de trabajos, un anteproyecto que dispone que, durante cinco años, los entes generadores y gestores de RCD deberán mantener un registro electrónico de carácter público con información relacionada a la cantidad, origen, naturaleza, manejo y disposición de RCD (García, 2016).

Por otro lado, en Colombia, se presenta una realidad similar a la del Perú. Es un país cuyo sector de la construcción crece de forma constante. Particularmente, la ciudad de Bogotá concentra alrededor del 25% del PBI de la construcción del país, y sus actividades constructivas producen aproximadamente quince millones de toneladas por año de RCD, que significa dos toneladas per cápita, igualando a países como Dinamarca, Finlandia, Alemania, Irlanda y Luxemburgo, los cuales presentan políticas de reutilización definidas y logran superar el 50% de reutilización de RCD, a diferencia de Bogotá. Sin embargo, en los últimos años, en Colombia, se vienen trabajando normas legales que regulen la situación de los RCD, las cuales propician reducir la producción de residuos, reutilizar aquellos que por su naturaleza lo permitan, el reciclado de aquellos no susceptibles a reutilización y la disposición adecuada de lo que no pueda valorizarse.

La práctica más común es la disposición descontrolada de los residuos a vertederos no autorizados, la cual es alimentada por la escasez de centros autorizados de disposición. Existen también lugares llamados “Molineros” ubicados en la zona sur de la ciudad que ofrecen servicios de recuperación artesanal de recursos. Sin embargo, estos no cumplen condiciones laborales ni de salud ocupacional, y tampoco cuentan con programas de manejo ambiental. Por tal motivo, aún son considerados

establecimientos informales. La medida más importante en relación a los RCD en Colombia fue tomada por la Secretaria de Ambiente Distrital de Bogotá (resolución 2397), que obliga a las constructoras a aprovechar los residuos de tal manera que no lleguen a disponerse en espacios públicos. La resolución tiene carácter gradual, ya que inicialmente se exige la reutilización del 5% de los residuos, cifra que anualmente incrementará en cinco puntos porcentuales hasta alcanzar el 25%. Además, la disposición sanciona económicamente con 5000 salarios mínimos vitales y cierre temporal o definitivo a quienes no la cumplan (Castaño, J. O., Rodríguez, R. M., Lasso, L. A., Cabrera, A. G., & Ocampo, M. S., 2013).

2.3.2 Legislación nacional

La preocupación no es ajena a los intereses del Perú. La reciente aprobación del Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las actividades de la Construcción y Demolición en el año 2013 (El Peruano), junto a la Ley N° 27314 – Ley General de Residuos Sólidos-, ha servido de base para que los gobiernos locales establezcan procedimientos y directivas de cómo manejar los RCD.

El Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las actividades de la Construcción presenta aspectos generales pero claros de qué tipo de tratamiento se debe efectuar a los RCD. Este incluye demandas acerca de las infraestructuras necesarias para el manejo de residuos, la estructura de cómo elaborar un Plan de Manejo de RCD, requerimientos acerca de las empresas que se dedican al tratamiento de estos, lineamientos en base al almacenamiento y disposición en lugares no autorizados bajo pena de sanción, recojo, reaprovechamiento, comercialización y transporte de RCD, así como su disposición final, tratamiento de material peligroso, medidas de fiscalización y sanciones involucradas con las infracciones que violen las responsabilidades del manejo de residuos. Municipalidades como las de Bellavista, Jesús María, Villa El Salvador, San Miguel, Trujillo y Arequipa son ejemplo de entidades con legislaciones que cumplen con la elaboración de un Plan de Gestión RCD según las disposiciones del Decreto Supremo (Municipalidad Distrital De Bellavista, 2013; Municipalidad Distrital De Jesus Maria, 2013; Municipalidad Distrital De Villa El Salvador, 2014; Municipalidad Distrital De San Miguel, 2013; Municipalidad Provincial De Trujillo, 2013; Municipalidad Provincial De Arequipa, 2013).

Si bien esta iniciativa se considera como un gran avance en la gestión de RCD, aún se muestra un poco arbitraria, ya que los residuos de construcción y demolición son tratados como un conjunto y no como sistemas separados. También carecen de un sustento ambiental claro, al no contar con ejemplos de cómo impactaría la actividad de gestión de RCD al entorno, además de la falta total de consideración de los procesos de demolición en sí mismos. Para solucionar esta problemática sería necesario realizar un estudio de eco-eficiencia desde la perspectiva ambiental.

2.4 La Eco-eficiencia

La eco-eficiencia fue definida de manera formal en 1991 por el *World Business Council of Sustainable Development* como la completa satisfacción de las necesidades humanas, bienes y servicios orientados a brindar calidad de vida, y, paulatinamente, minimizando los impactos ecológicos a lo largo del ciclo de vida de los mismos, de manera que se obtengan niveles por debajo de la capacidad de carga de la Tierra. Asimismo, otras instituciones han elaborado definiciones propias de eco-eficiencia que convergen con la premisa de “producir más con menos”. (Côté, et. al, 2006).

Para llevar a cabo el análisis de eco-eficiencia de un sistema, la norma ISO 14045(2012) se presenta como una alternativa basada en las normas ISO 14040 (2006), ISO 14044 (2006) e ISO 14050 (2009), que ofrece el marco metodológico para poder cuantificar los impactos ambientales de un sistema en conjunto con el valor del sistema del producto o servicio. En líneas generales, este análisis busca evaluar de manera cuantitativa los impactos ambientales del producto o servicio a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y la valoración otorgada por quien lleva a cabo la evaluación. La valoración del sistema en esta norma no está sujeta a un procedimiento específico, sin embargo se sugiere expresarla en términos monetarios que engloben todo el ciclo de vida. Por esta razón se ha elegido el *Life Cycle Costing* (LCC) como metodología complementaria al ACV, las cuales, bajo los lineamientos de la normativa ISO 14045, permitirán efectuar el análisis de eco-eficiencia .

Una vez definido el caso de estudio y evaluado los procesos que intervienen en él, se procede a efectuar el marco de trabajo que se respetará para el proyecto. En primer lugar, se debe definir el alcance, que contempla la determinación del sistema a ser evaluado de acuerdo a la escala, ubicación, tiempo y los principales involucrados en la evaluación: Posteriormente, se deben establecer los límites del sistema, tanto para

la evaluación ambiental como para el sistema de valoración, según se describe en la norma ISO 14044: los límites del sistema determinarán los procesos a ser considerados en el ACV y, en este proyecto en particular, el LCC. Estos deben contemplar el nivel de detalle al que se desea llegar con el estudio, así como las entradas y salidas respectivas a dicho nivel. Los procesos omitidos en el sistema deben ser especificados y sustentados como aquellos que no generen un cambio significativo acorde con los objetivos del estudio.

La normativa ISO 14044 sugiere representar los límites del sistema como un diagrama de flujo que muestre la relación de los procesos y que delimite el comienzo (recepción de materias primas o productos intermedios), las transformaciones y operaciones que se suscitan como parte del proceso y dónde termina el proceso (ligado a la disposición de los productos intermedios o finales). Este debe ser modelado de tal manera que las entradas y salidas del sistema sean consideradas como flujos elementales y derivados. Las entradas y salidas pueden ser materiales, las cuales estarán basadas en los datos recolectados o tomados a partir de referencias publicadas; como también energéticas, que serán tratadas como cualquier otra entrada o salida del ACV y serán aquellas relevantes en la producción y entrega de combustibles, contenido energético de materias primas y la energía consumida por los procesos dentro de los límites del sistema.

Asimismo, la norma sugiere tres tipos de criterios de decisión de manera que será posible prescindir o considerar datos de entrada al sistema en función a su contribución al total de su clasificación. Los tres criterios son: masa, energía e importancia ambiental. La contribución al sistema estará dado por un valor prefijado de contribución (porcentaje) que, al mismo tiempo, permitirá definir cuáles son aquellas entradas que formarán parte del sistema definido.

2.5 Análisis de Ciclo de Vida

Según los lineamiento de la eco-eficiencia, la evaluación ambiental debe ser llevada a cabo a través de un ACV del sistema definido, bajo la directiva de las normas ISO 14040 e ISO 14044. El ACV es una metodología cuya intención radica en identificar, cuantificar y caracterizar los impactos ambientales asociados a las etapas de ciclo de vida de un producto o servicio. El beneficio que conlleva conocer los efectos que podrían causar en el ambiente estos productos o servicios (sobre todo aquellos más

significativos) permitirá atender diversas responsabilidades legales, sociales y políticas, así como implicancias económicas que afecten al desarrollo empresarial (Rodríguez, 2003).

El ACV funciona como una herramienta para la gestión medioambiental que permite identificar el foco de un problema que permitirá optimizar recursos y gestionar residuos a pesar de que no siempre sea posible llevar a cabo un análisis completo de un producto o sistema (Wrisberg et al., 1997). Así, también permite comparar productos o sistemas orientados a una misma función, y sirve como herramienta de ecodiseño. El ecodiseño consiste en reducir el impacto negativo de un producto a lo largo de su ciclo de vida a través de la incorporación sistemática de aspectos medioambientales en su diseño (Garraín, 2009). En el caso de un sistema, el ecodiseño consistiría en considerar estos aspectos en la planificación y gestión del mismo.

Un ACV nos permite valorar los contaminantes generados y los recursos consumidos de un producto o sistema en términos de sus impactos potenciales hacia el ambiente, agrupando estos en categorías de impacto ambientales. Una categoría de impacto representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de un producto (Garraín, 2009). De acuerdo a la SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) (SETAC, 1993), las categorías de impacto que se consideran en un ACV se agrupan en tres grupos principales: consumo de recursos naturales, impactos al ecosistema y daño a la salud, las cuales pueden originar efectos de alcance global, regional o local.

Las categorías de impacto son variadas y su inclusión o exclusión al análisis de un sistema dependerá de la utilidad de las mismas para poder explicar el comportamiento del sistema evaluado (PRé, 2016). También se pueden escoger las categorías de impacto según la metodología de análisis de impactos ambientales que se desee seguir. Por ejemplo, en la metodología ReCiPe se consideran 18 indicadores *midpoint*, y 3 indicadores *endpoint*. El objetivo principal de *ReciPe* consta en transformar los datos del inventario del análisis de ciclo de vida en una cantidad manejable de impactos ambientales asociados. La metodología *midpoint*, o del punto medio en español, se centra en problemas ambientales puntuales como la acidificación y el cambio climático y se considera de baja incertidumbre, al ser categorías de impacto bien definidas con resultados cuantitativos. Por otra parte la metodología *endpoint* presenta el impacto ambiental en tres niveles más altos: los efectos sobre la salud humana, la biodiversidad

y la escasez de recursos y se le considera de alta incertidumbre (ReCiPe, 2011). Las categorías de impacto que computa el método se muestran en la Figura 3.

Otro método de evaluación de impactos ambientales es el desarrollado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), IPCC por sus siglas en inglés, que está enfocado particularmente al análisis de cambio climático a través de la caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan por las diversas actividades humanas. Las consideraciones que el IPCC toma para analizar el cambio climático se basan en observaciones de los efectos de los diversos gases emitidos a la atmósfera en relación con cómo han contribuido estos al cambio de temperatura del planeta (Stocker, T. F. (Ed.), 2014). Este, por ejemplo, tiene aún más certeza en la evaluación de cambio climático que el método *ReCiPe* en dicha categoría.

La norma ISO 14040 enuncia cuatro fases principales en la elaboración del ACV: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación de impacto e interpretación de datos. La definición de objetivos y el alcance se trabajarán bajo los enunciados para el análisis global de eco-eficiencia, considerando que si existe alguna peculiaridad para un sistema en particular se debe especificar, procurando no desviarse del alcance general (ISO, 2012) En la figura 4 se muestran las fases de elaboración del ACV y los procesos dentro de cada una de ellas.

Categorías de impacto	Cambio climático	kilogramos de CO ₂ equivalente
	Agotamiento de la capa de ozono	kilogramos de CFC-11 equivalente
	Acidificación terrestre	kilogramos de SO ₂ equivalente
	Eutrofización de agua limpia	kilogramos de P equivalente
	Eutrofización de agua marina	kilogramos de N equivalente
	Toxicidad humana	kilogramos de 1,4-DB ⁽¹⁾ equivalente
	Formación de óxidos fotoquímicos	kilogramos de NMVOC ⁽²⁾ equivalente
	Formación de material particulado	kilogramos de PM ₁₀ equivalente
	Ecotoxicidad terrestre	kilogramos de 1,4-DB ⁽¹⁾ equivalente
	Ecotoxicidad de agua limpia	kilogramos de 1,4-DB ⁽¹⁾ equivalente
	Ecotoxicidad de agua marina	kilogramos de 1,4-DB ⁽¹⁾ equivalente
	Radiación ionizante	kBq U ₂₃₅ ⁽³⁾ equivalente
	Ocupación de terreno agrícola	metro cuadrado
	Ocupación de terreno urbano	metro cuadrado
	Transformación de suelo natural	metro cuadrado
	Agotamiento de agua	metro cúbico
	Agotamiento de metales	kilogramos de Fe equivalente
	Agotamiento de fósiles	kilogramos de petróleo equivalente

Figura 3 Categorías de impacto que considera el método *ReciPe*
Fuente: Elaboración propia

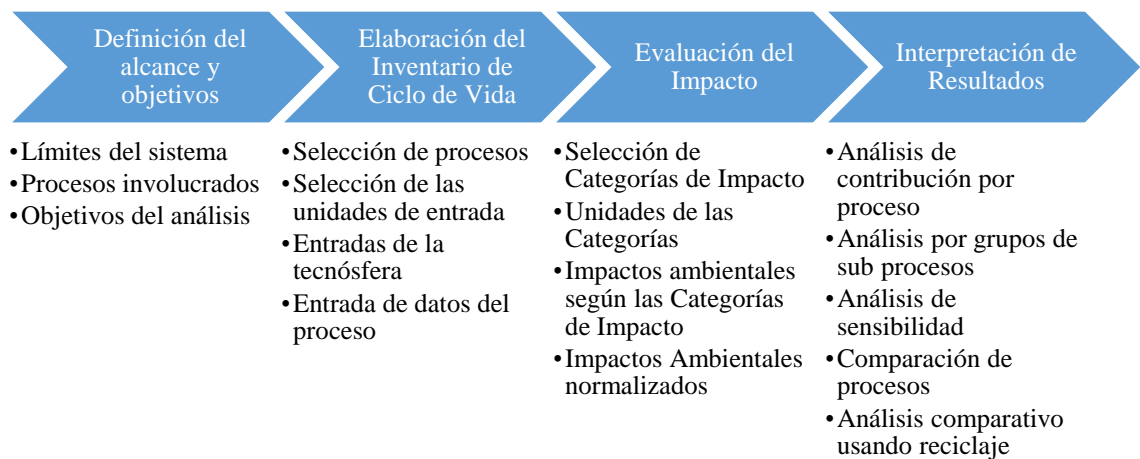


Figura 4: Fases de la elaboración del ACV.
Fuente: Adaptado de SimaPro Tutorial (PRé, 2016).

Debido a que un ACV tiene una naturaleza global, es necesario establecer los límites del sistema en esta etapa, pues realizar un análisis completo de un sistema puede resultar extenso y laborioso. Los límites determinarán qué procesos se incluirán en el ACV. Asimismo, el alcance debe especificar precisamente las funciones del sistema evaluado, que dependerán de los objetivos del estudio (Garraín, 2009). En esta etapa es donde se establece la unidad funcional del sistema. La unidad funcional se puede definir, según Matthews, H. S., Hendrickson y Matthews, D. H. (2013), como una medida cuantitativa que relaciona las características del caso de estudio con las entradas y salidas del sistema.

El análisis de inventario consiste en la recolección de datos y los cálculos necesarios para cuantificar las entradas y salidas del sistema definido. Cabe resaltar que este es un proceso iterativo que dependerá de los datos que se vayan obteniendo, pues estos vislumbrarán nuevos requisitos y limitaciones, con la posibilidad de que se necesite revisar los objetivos o alcance del estudio. La recolección de datos incluye las entradas de energía, materia prima, entradas auxiliares, productos, sub-productos, desperdicios, emisiones al aire, descargas en agua o suelos y otros aspectos ambientales relacionados (ISO, 2006). Para efectuar el cálculo de los datos y uniformizar el análisis de resultados se necesitará validar los datos en cuanto deben relacionarse con la unidad funcional definida y los procesos especificados.

La evaluación del impacto se centra en evaluar la importancia del potencial de impactos ambientales empleando los resultados del análisis de inventario. Es necesario

asociar los datos del inventario con categorías de impacto ambiental específicas e indicadores, para así poder entenderlos mejor. Los elementos que conforman una evaluación ambiental son: selección de las categorías de impacto, indicadores y modelos característicos, clasificación de los resultados del inventario a las categorías escogidas y cálculo de los resultados de los indicadores de las categorías (caracterización) (ISO, 2006) En esta fase se evaluará únicamente los asuntos ambientales especificados en los objetivos y alcance del estudio, por lo que esta etapa no es una evaluación global de todos los asuntos ambientales del producto o sistema bajo estudio (Garraín, 2009).

La evaluación debe apoyarse en herramientas de modelamiento para poder obtener los resultados de impacto ambiental del sistema. Existen herramientas como BEES, LCExplorer, TEAM, SimaPro, ATHENA, EcoQuantum, BREEAM, GBTool, EcoEffect, entre otras cuya elección dependerá del tipo de análisis que se requiera y las características específicas del proyecto (Trusty, W., 2000).

El software SimaPro es usado para realizar evaluaciones de impacto ambiental, permitiendo modelar las etapas de un proceso según el alcance y objetivo del análisis de ciclo de vida. Dentro del modelado de estas etapas también es posible modelar los subprocesos contemplando el consumo energético y el consumo de recursos. Para el modelo de los procesos se usan bases de datos que contienen información de diversas áreas de estudio. SimaPro se apoya en diversas bases de datos como Agri-footprint, ELCD, USLCID y Ecoinvent, siendo esta última la más exhaustiva al considerar datos de diversos países y áreas de conocimiento (PRé, 2016). Ecoinvent es una base de datos resultado de la recopilación de información hecha por distintas instituciones suizas, las cuales integran diversos inventarios de ciclo de vida y los mantienen actualizados (PRé, 2016).

Asimismo, para cada para cada insumo o material utilizado existe una matriz de impactos asociados a la producción del insumo y a su consumo, por ejemplo kilogramos de carbono equivalente por kilogramo de diésel. El software finalmente recopila la información y la procesa de manera que se obtienen los impactos ambientales repartidos en las categorías de impacto tomadas en cuenta en el análisis (PRé, 2016).

La interpretación del ACV consiste en la combinación de los resultados obtenidos del inventario de ciclo de vida y la evaluación de impacto (ISO, 2006). En esta fase se busca determinar en qué etapa del proceso se generan los principales impactos negativos al ambiente, y por tanto qué puntos deben mejorarse (Garraín, 2009). La interpretación de los datos puede conllevar a conclusiones de acciones a tomar en términos de minimización de impactos ambientales, los cuales pueden combinarse con otras perspectivas de valoración de sistemas para poder determinar, bajo el concepto de eco-eficiencia, cuál es el comportamiento de este (ISO, 2012).

2.6 Life Cycle Costing

La normativa señala, como se enunció anteriormente, que se prefiere una valoración en términos monetarios que englobe todo el ciclo de vida, lo cual se convierte en una razón por la cual utilizar un LCC. Además de adecuarse al análisis de ciclo de vida, el LCC, al ser un análisis basado en el costo, le otorga al método la cualidad de ser una herramienta de decisión para identificar la estrategia de gestión de los RCD más eficiente (Standford University, 2005).

Específicamente, el LCC, provee una serie de pasos que permiten delimitar, identificar flujos económicos y clasificar el tipo de costo de un proceso ya sea de carácter ingenieril, de implementación o de operación, convirtiéndose en un procedimiento que se adecúa óptimamente a los objetivos de la investigación (Reich, 2005). El resultado del trabajo en conjunto de estos análisis, ambiental y económico, es una solución centrada en generar sostenibilidad en el proceso de demolición y la disposición de los residuos, todo esto bajo lineamientos internacionales aplicados a la realidad local. Esta solución podría, a la vez, ser utilizada como guía o como una serie de pautas y recomendaciones a seguir para lograr el objetivo principal el cual es llevar a cabo una correcta gestión de los residuos de demolición, así como la elección de un proceso de demolición que tenga el menor impacto posible. Es importante resaltar que los nuevos flujos económicos generados a partir del nuevo plan de gestión afectan también al ámbito socioeconómico, que podría generar nuevas oportunidades laborales y acrecentando la calidad de vida de las personas, siempre y cuando se lleven a cabo dentro de un marco formal y controlado.

El LCC es una técnica de análisis que considera todos los costos relevantes de los procesos involucrados en el ciclo de vida (Sheriff, 1981). También se conoce por

estándares internacionales como una técnica que permite que en una ventana de tiempo definida sean realizadas evaluaciones económicas, las cuales toman en cuenta los costos iniciales y los costos de operación futuros (Gluch, 2004).

Para llevar a cabo un LCC es esencial reconocer las asunciones y limitaciones inherentes a este proceso de análisis. Cabe resaltar que LCC como tal no es una técnica desarrollada para lograr sostenibilidad o disminución del impacto ambiental; lo que hace que esta técnica sea adaptable al desarrollo sostenible son las variables tomadas en cuenta así como las herramientas usadas para realizar el LCC y, principalmente, la realización en paralelo de un ACV. El objetivo del LCC es, así como el de otras teorías de contabilidad neoclásicas, el de maximizar la ganancia o la producción siempre en un contexto de total conocimiento. En este contexto de conocimiento se asume que el gestor, el encargado de dirigir el proyecto por una u otra alternativa, conoce sus preferencias y además está completamente informado acerca de las consecuencias de todas las alternativas de entre las cuales él escoge. Con esta información es que se compara y se descartan posibles ganancias o pérdidas según su ocurrencia (Gluch, 2000).

Este contexto es en realidad una idealización debido a que se asume que se toman decisiones basadas en lo racional; Sin embargo, como se espera del comportamiento humano no siempre se toman decisiones racionales (decisiones subóptimas), sobre todo cuando se trabaja en un contexto de tanta incertidumbre como lo es el de esta investigación (Carroll, 1990). La incertidumbre es grande ya que por lo general los efectos del impacto ambiental se perciben en largos periodos de tiempo y no necesariamente ocurren sobre la misma ubicación del análisis; lo mismo se puede afirmar a nivel social (English, 1999). Gluch y Baumann (2000) mencionan cuatro principales limitaciones inherentes al LCC:

- No otorga un criterio de decisión en un ambiente real ya que los gestores no siempre basan sus decisiones en la racionalidad.
- Se asume que todas las alternativas son viables. No son tomados en cuenta los cambios irreversibles.
- Ignora a los parámetros sin dueño.
- Simplifica los problemas complejos medioambientales en un sistema unidimensional monetario.

Existe la posibilidad de que los números que se obtengan al final del LCC sean de pobre nivel de estimación ya que se basan en conocimientos actuales y no se conoce el estado real futuro. Teniendo definidas las limitaciones del LCC se procederá a enlistar sus etapas. Para esto se tomará el proceso que utiliza Harvey (1976):

- El primer paso consiste en la definición de los elementos de coste de interés, esto es identificar los flujos monetarios involucrados en el ciclo de vida.
- El segundo paso es la estructuración de los costos; en este paso se categorizan los costos, donde el criterio de categorización dependerá de la profundidad del estudio que se quiere llevar a cabo. Aquí no se tienen distintas formas de categorización, como es la tomada por White y Oswald, la cual divide a los costos en tres grandes categorías: de ingeniería y desarrollo, de producción e implementación y de operación (1976). Cual sea la estructura tomada lo más importante es que se tome de tal manera que se permita realizar un análisis que sea compatible y se adecúe óptimamente con los objetivos del mismo (Woodward, 1997).
- El tercer paso es la relación de estimación de costos, en pocas palabras es la parte matemático-estadística del proceso del LCC. Se colocan los costos en función de una o más variables de manera que puedan ser estimados a lo largo del ciclo de vida.
- El cuarto paso, establecer el método de formulación del LCC, involucra escoger un método que sea el que más se adecúe a la evaluación de los costos de los activos. Kauffman (1970) desarrolló una serie de ocho pasos:
 1. Establecer el perfil operacional
 2. Establecer los factores de utilización.
 3. Identificar el costo de los elementos.
 4. Determinar los parámetros críticos de costos.
 5. Calcular todos los costos a precios corrientes.
 6. Aumentar los costos actuales de las tasas de inflación asumidas.
 7. Descontar todos los costos al período base.
 8. Sumar los costos descontados para establecer el valor presente neto.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

Como se mencionó anteriormente, la preocupación por la forma en cómo se llevan a cabo las demoliciones ha tomado gran importancia en las sociedades más desarrolladas. Esto se evidencia en la elaboración de guías donde se ofrecen recomendaciones muy generales para hacer frente a las implicancias ambientales que traen los trabajos de demolición.

Por ejemplo, el código de prácticas para la demolición de estructuras de Hong Kong, del Departamento de Edificaciones de la ciudad (2004) hace hincapié en las consideraciones que se deben tomar respecto a la contaminación del aire, uso de agua, emisión de ruido y manipulación de materiales peligrosos, mas no sustenta sus recomendaciones con valores de emisión o evaluaciones ambientales correspondientes.

Sin embargo, existen gran variedad de exitosos estudios en el ámbito del manejo de RCD a nivel internacional que pueden servir como base para realizar este estudio. Dentro del sector específico de la evaluación ambiental en cuanto al manejo de RCD se puede presentar el caso del perfil ambiental de la gestión de los RCD: Elaboración de inventarios de ciclo de vida, presentado en el tercer Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, donde se muestra la elaboración de un Análisis de Ciclo de Vida de los procesos y materiales que intervienen en la gestión de RCD, tomando como un sistema de análisis las etapas de recogida, transporte, clasificación, tratamiento y disposición final de RCD (Mercante et al, 2010).

Este estudio se llevó a cabo en la provincia de Mendoza, Argentina, combinando datos de primera mano con datos de procesos y producción de plantas de reciclaje y tratado de RCD de plantas españolas, al no contar en el ámbito local con este tipo de infraestructura. Para la elaboración del Inventario de Ciclo de Vida se asignó a cada etapa los involucrados en el proceso: para la pre-recogida se dispuso considerar el almacenamiento en obra de los residuos a través de contenedores especiales, cuyos datos de proceso de fabricación se tomaron de la base de datos EcoInvent (2008). Para el transporte se incluyeron los consumos de combustibles de acuerdo al tipo de vehículo y la capacidad de cada uno junto a la densidad del residuo destinado a su traslado. Para la etapa de clasificación y mantenimiento se tomó en cuenta el combustible utilizado, la energía generada y el consumo de agua en los procesos de clasificación y trituración de residuos. En el reciclaje de fracciones recuperadas se optó

por incluir el impacto debido a cada una de las fracciones recuperadas y la carga evitada debido al reciclaje. La etapa de vertido incluye los impactos debido al transporte de aquellos RCD que no pueden ser procesados y el consumo de combustible.

Para el análisis se consideraron dos escenarios: en el primero se consideró que el residuo se recoge mezclado en obra, e ingresa mezclado a la planta de clasificación y tratamiento de RCD. Tras su clasificación, todas las fracciones de materiales recuperados se reciclan en su totalidad. En el segundo escenario se consideró la recogida del residuo mezclado en obra, pero en su clasificación, solo se dispuso a reciclar las fracciones de áridos y metales, mientras que las fracciones de papel y cartón, plásticos y madera, se depositan en vertedero. Los resultados se evaluaron bajo indicadores de impacto de calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización, agotamiento del recurso abiótico.

Los resultados de dicho estudio arrojaron cifras en los que impactos ambientales más relevantes son ocasionados por la fase de pre-recogida y transporte desde obra civil a planta de clasificación y tratamiento, en casi todas las categorías, a excepción del calentamiento global que se encuentra fuertemente marcado por el reciclado de madera y papel. Asimismo, se identificó que en el primer escenario existen ventajas para los indicadores de potencial de eutrofización y acidificación, resultando menos beneficioso en el caso de calentamiento global, disminución de la capa de ozono, oxidación fotoquímica y agotamiento del recurso abiótico. Los resultados del estudio sirvieron, según conclusiones de los autores, para identificar la alta contribución del reciclaje de madera y papel al calentamiento global y agotamiento de recursos abióticos, donde se plantea alternativas de tratamiento como la recuperación energética.

En España, país con alto índice de generación de RCD, se llevó a cabo un análisis ambiental de la gestión de estos (Álvarez, 2010). En este estudio se planteó el análisis de 4 escenarios distintos. El primero a ser analizado es el escenario actual, con datos de la gestión de cada instalación referente a los años de 2009 y 2010. Luego, se simuló nuevos escenarios en los años 2012 y 2020 con 3 variaciones de gestión basadas en: la normativa catalana, española y europea. Los límites del sistema incluyen impactos ambientales generados por 4 plantas gestoras de RCD en los años 2009 y 2010. La metodología de análisis se basó en la simulación de los escenarios a través

del programa de simulación de gestión de residuos SIMUR (Sistema de Información y Modelización Urbana de Residuos) creado por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

Este software simula la gestión de residuos a lo largo de todo su ciclo (desde que se generan hasta su deposición final) en donde se obtienen datos de balance de masa e indicadores relacionados, balance energético e indicadores relacionados, balance de emisiones y potenciales de impacto junto a sus indicadores relacionados. Las etapas consideradas en el análisis fueron las de tratamiento en planta o plantas de destino de los residuos (selección y valorización), transporte de los residuos entre plantas o al vertedero, y destino final: productos resultantes de la gestión (materiales valorizados) o rechazo final a vertedero. Los indicadores de impactos ecológicos fueron los siguientes: potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, potencial de eutrofización, potencial de formación de ozono fotoquímico, potencial de ecotoxicidad agua dulce, potencial de ecotoxicidad agua marina, potencial de ecotoxicidad terrestre.

A través de los resultados obtenidos por el autor luego del análisis y comparación de cada escenario pudo destacar como conclusión el hecho de que la gestión del reciclaje de residuos (a priori una opción viable frente al descarte de los residuos) en materia de generación de impactos energéticos no es tan viable en su entorno en algunas plantas de manejo de residuos como se esperaba. Esto permite al autor dar opciones de mejora de los procesos de reciclado o, en su defecto, optar por cambiar el destino de la planta de reciclaje hacia una más viable, sin descartar la opción de reciclado, puesto que continúa siendo, según sus estudios, la alternativa más viable en otros escenarios.

En el año 1999 se llevó a cabo un estudio de Análisis de Ciclo de Vida en el Reino Unido (Craighill & Powell, 1999) que tuvo como objetivo principal medir el impacto social, económico y ambiental de las alternativas de gestión de los residuos de construcción y demolición. Los límites del estudio se centran en evaluar los impactos del reuso, reciclaje o vertido de residuos enfocándose en los residuos inertes, y los datos están relacionados con una tonelada de este material como la unidad funcional. Los escenarios base utilizados para el análisis de los residuos de demolición son cinco: disposición en vertedero; disposición en vertedero y reciclaje fuera de sitio; reciclaje fuera de sitio y reutilización in-situ; solo reutilización in-situ; y por último una combinación de los tres procesos.

Un aspecto interesante de este estudio es la inclusión de una evaluación económica adjunta (hecho que predice un análisis de eco-eficiencia al combinar impactos monetarios y ambientales), donde se asignan costos estimados de financiamiento de las fases involucradas en el proceso del ciclo de vida: demolición, reprocesamiento in-situ, reprocesamiento fuera de sitio, extracción de materiales, vertido y transporte. Es así que el proceso de evaluación de los resultados se basó en un sistema de evaluación multi-criterio, en donde se incluían 4 grupos de indicadores de evaluación: costos (costo interno), recursos (materias primas, agua, energía primaria, uso de suelo, volumen de vertedero), contaminación (local: partículas, formación de óxidos, toxicología humana; regional/global: acidificación, calentamiento global, agotamiento de ozono) e impacto social (visual, ruido, trabajo, congestión vehicular, aire maloliente).

Los resultados obtenidos en este análisis, en general, otorgan un mayor impacto ambiental al escenario donde solo se considera disposición a vertedero, pero en realidad lo interesante es apreciar cómo a través del análisis multi-criterio pueden establecer la viabilidad y conveniencia así como definir qué escenario propone una correcta gestión integral de los residuos. A través del empleo del software HIVIEW y basándose en los resultados del ACV, se crearon 4 nuevos escenarios de asignación de pesos en cuanto a importancia: igual importancia para todos, solo considerando aspectos económicos, estableciendo 70% de importancia a impactos sociales y 10% para cada uno de los restantes y por último 40% de importancia a factores ambientales y de contaminación y 10% para los impactos sociales y económicos respectivamente.

Los resultados conllevaron a una decisión unánime en la calificación de que el mejor escenario era aquel donde solo se involucra la fase de reutilización, seguido de las opciones de reutilización y reciclaje combinadas y por último como la menos viable la de disposición en vertederos. Es apreciable cómo una combinación de datos que van más allá de encapsular los impactos en un solo rubro ofrecen una visión más amplia de las consecuencias que pueda tener determinado proceso de gestión. Es preciso acotar, como recalcan los autores, que este tipo de estudios no es una máxima universal, sino que dependerán de las circunstancias locales, es por eso que no es tan factible adoptar procesos fuera del entorno con una certeza total, pues los requisitos particulares pueden variar los resultados.

Como ejemplo de aplicación conjunta del *LCC* con el *ACV* existe un estudio realizado por Amienyo y Azapagic (2015) cuyo objetivo principal es estimar el impacto ambiental y los costos de la producción y consumo de cerveza para ciertos tipos de envasado en el Reino Unido. En este estudio se definen unas unidades funcionales las cuales son las aptas para caracterizar tanto el impacto ambiental como el costo por litro de cerveza; asimismo, se constataron las categorías de impacto que afecta cada alternativa. Aquí se consideró que el costo del ciclo de vida está conformado por el costo de la materia prima, el costo de producción de una botella o lata, el costo del transporte y el costo de su disposición póstuma al consumo de la cerveza.

Se aprecia claramente, del estudio descrito en el anterior párrafo, que es una labor ardua llevar a cabo la decisión de qué variables influenciarán en el costo total del ciclo de vida ya que es imposible tomar en cuenta todas debido a la alta variabilidad de algunas, a la cantidad de datos disponibles y a la gran cantidad de variables adicionales; por esto, es necesario identificar las principales y trabajar en torno a estas. Luego de realizar un análisis conjunto usando el análisis de ciclo de vida y el análisis de costos se obtiene la información de coste e impacto para cada opción de envasado de cerveza. La botella de vidrio se posiciona como la peor opción desde el punto de vista del impacto ya que afecta a 9 de las 12 categorías de impacto ambiental, sin embargo es la menos tóxica para el ser humano, mientras que la de latón es la que tiene menor impacto ambiental pero mayor toxicidad para el humano.

Debido a que a la fecha aún no se ha estandarizado o normado el proceso para llevar a cabo un *LCC*, varios autores han propuesto estrategias o pasos para llevar a cabo este análisis de costos. Uno de los autores, el cual se centra principalmente en los proyectos de construcción, esquematiza el proceso del *LCC* en su artículo “*Life Cycle Costing for Construction Projects*” (1986). Wübbenhorst, el autor, habla sobre la influencia de los costos a lo largo el proceso típico de cualquier proyecto (iniciación, planeamiento, realización, operación, disposición), el cual va descendiendo a medida que se van avanzando en las fases. Como se conoce, el *LCC* considera sus límites como los límites definidos en el *ACV*, es por esto que se le considera una herramienta óptima para usar en conjunto.

Asimismo, en el artículo, se listan las ventajas del *LCC*; entre las ventajas esta la habilidad del *LCC* para mostrar un enfoque dinámico del sistema, considera la interdependencia de las decisiones tomadas durante el ciclo de vida, se reduce el riesgo

de error en la toma de decisiones y se incrementa la flexibilidad, considera el ciclo de vida como un proceso de aprendizaje en el cual mientras se avanza en el ciclo se conocen más variables y se reduce la incertidumbre, y por último, enfatiza la necesidad de una correcta comunicación y cooperación entre los distintos personajes involucrados en el ciclo de vida de un edificio (diseñador, constructor, usuario). Todas estas ventajas se dirigen a un cierto punto: reducir los costos del edificio a lo largo del ciclo de vida, dando criterios confiables en la toma de decisiones. Por esto es que si esta herramienta de análisis de costos funciona en conjunto con un Análisis de Ciclo de Vida se obtienen nuevos parámetros los cuales no solo buscan el bajo costo sino también el menor impacto ambiental; este análisis en conjunto da como resultado el nivel de eficiencia ecológica del proyecto y permitirá tomar entre distintas alternativas la cual tenga el menor impacto ambiental al menor costo posible.

De la misma manera como se pretende abordar el problema de la demolición en esta tesis, en una publicación en la revista *ScienceDirect* sobre un análisis comparativo de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) bajo la perspectiva de la eco-eficiencia, también se lleva a cabo este análisis usando los procedimientos de la ISO 14045 (Lorenzo-Toja et al., 2016). En esta publicación la eco-eficiencia se lleva a cabo nuevamente bajo dos valoraciones: una ambiental, guiada bajo los lineamientos del ACV; y una valoración, que para este caso fue económica bajo la teoría del LCC.

Específicamente, es necesario resaltar diversos aspectos presentes en la valoración económica del caso mencionado en el anterior párrafo. Primero, se escoge una unidad funcional que permite definir el costo final del proceso; de esta manera, se toma como criterio la proveniencia del costo aplicado, en otras palabras, se selecciona la etapa donde los costos están concentrados. Según lo anterior, en el caso de una PTAR, la etapa donde se aplican los mayores costos es la operación (Termes-Rifé et al., 2013) y son despreciados los costos de construcción. Es así que se define la unidad funcional para una PTAR, la cual fue el costo del tratamiento de un metro cúbico de agua residual (Lorenzo-Toja et al., 2016), es interesante observar cómo las unidades funcionales tanto del ACV (impacto ambiental por metro cúbico de agua tratada) como las del LCC son compatibles, es decir, están bajo unidades iguales de volumen.

Del lado de los resultados del estudio se consideraron los costos de los químicos, energía, mantenimiento, impuestos, personal y análisis de laboratorio. Todas estas variables en conjunto toman un ratio del costo de tratamiento por metro cúbico de agua

siendo parámetros que influyen en el costo del agua los tipos y cantidades de tratamientos dados, tecnologías adjuntas a los procesos y las características del agua a tratar (Lorenzo-Toja et al., 2016). Por último, los autores explican que es necesario ver las consecuencias de un mejor tratamiento ya que también se podría tener una mejora económica pero a un distinto nivel gracias a un mejor tratamiento del agua, a pesar de que los costos de operación aplicados directamente a la PTAR resulten mayores.

En el ámbito local, podemos encontrar aproximaciones muy buenas en cuanto al uso de herramientas de gestión ambiental en la construcción. Sonia Valdivia (2002), en su libro, identifica diversas alternativas para el manejo de RCD. En él se incluye la clasificación y descripción del ciclo de producción de la construcción, considerando las entradas y salidas del sistema, factores económicos y de viabilidad involucrados en cada etapa del ciclo de vida, herramientas para su gestión, y formas de tratamiento. Por otro lado, la Red Peruana de Ciclo de Vida (RPCV) lleva a cabo desde el año 2005 investigaciones orientadas a elaborar propuestas para conseguir un desarrollo sostenible del país. Entre los proyectos desarrollados relacionados al tema se puede tomar como ejemplo “El estudio de análisis de ciclo de vida comparativo entre ladrillos artesanales y ladrillos mecanizados”, el cual tenía como objetivo principal evaluar y cuantificar los impactos ambientales de los ladrillos producidos de manera artesanal y mecanizada en la localidad de San Jerónimo – Cusco, utilizando el Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de gestión (RPCV, 2012). En el estudio se evaluaron los dos sistemas a través del uso de metodologías como SIMAPRO 7.1 para el ACV, ECOINVENT como base de datos para modelación de procesos de transporte y generación de energía, y la metodología del IPCC 2007 para caracterizar los efectos de cualquier gas de efecto invernadero y convertirlo a su equivalente a kilogramos de dióxido de carbono emitidos.

El inventario del estudio se basó en el desglose de etapas tales como la obtención de materia prima, producción (preparación de la mezcla, moldeado, secado, cocción, mantenimiento), distribución y uso en construcción para ambos tipos de ladrillo. En cuanto a la asignación de impactos se consideraron las emisiones al aire de compuestos como el dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, óxido de carbón, compuestos orgánicos volátiles y partículas en suspensión de hasta 10 micrómetros. Estas, traducidas posteriormente a valores de kilogramos de dióxido de carbono equivalente emitido arrojaron los siguientes resultados: 1 m² de pared construido con ladrillos artesanales

tiene un impacto hacia el ambiente un 26% mayor que hacerlo con ladrillos mecanizados, debido a que se requieren 3.3 veces más ladrillos artesanales mecanizados para la elaboración de la pared. Mientras que en las etapas de producción de los ladrillos, un ladrillo mecanizado impactaría al ambiente un 36% más que un artesanal debido a los transportes involucrados y los insumos de producción. Asimismo en la etapa de construcción se observa un 50% más de impacto asignado a los ladrillos mecanizados debido al uso de cemento. Es importante mencionar que en este estudio no se toma en cuenta el fin de vida (*end-of-life*) de los productos bajo estudio. Este ejemplo es clara muestra de cómo se pueden obtener resultados orientados a la toma de decisiones en cuanto a mitigación de impactos. Los autores señalan recomendaciones tales como emplear hornos de cocción con mayor efectividad energética e identificar la posibilidad de uso de combustibles alternativos para aminorar la cantidad de gases emitidos debido al transporte de materiales.

Así también se encuentra un desarrollo de trabajo de tesis orientado a la evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar (García, 2014). El estudio está orientado a la obtención de índices ambientales debido a las fases del ciclo de vida de una vivienda, estableciendo estas etapas como el pre-uso, uso y fin de vida del proyecto. Si bien se toma en cuenta el fin de vida, este se hace a través del *software* estimador que se emplea en la investigación, sin la introducción específica de datos pertenecientes a la demolición y disposición de residuos. Los indicadores empleados en la evaluación fueron consumo de energía primaria, emisiones o desechos al suelo, uso de recursos, consumo de combustibles fósiles, potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, criterios de salud humana, potencial de eutrofización y potencial de formación de smog. Los resultados permitieron identificar las etapas que más incidencia tiene para cada indicador planteado, donde la etapa de uso fue aquella con mayor cantidad de energía consumida debido al consumo de combustibles fósiles. Es, básicamente, este tipo de estudios un claro ejemplo de la importancia que tiene llevar a cabo un análisis de impactos ambientales de las realidades locales, para poder así implementar medidas de gestión y mejorar procesos en favor de la mitigación de impactos ambientales.

En otro trabajo de tesis, desarrollado Ana Cáceres (2016) se lleva a cabo un estudio con el fin de cuantificar y evaluar el impacto ambiental durante el ciclo de vida de dos edificaciones. Su metodología sigue la siguiente secuencia: obtención de información

acerca de los proyectos tratar, definición de los límites del sistema y elaboración del diagrama de procesos del sistema, desarrollo del inventario de ciclo de vida mediante el uso de la base de datos Ecoinvent y para el procesamiento de la data el software SimaPro, y por último la evaluación del impacto ambiental empleando la metodología TRACI 2.1. Específicamente, en la definición de los límites del sistema, se mencionan las etapas del ciclo de vida de las edificaciones de acuerdo a diversos modelos de ACV mencionados en la misma investigación, estas etapas son el pre-uso, uso y el fin de vida (Cáceres, A, 2016). En la definición de las etapas, la autora consideró al fin de vida de la edificación como el transporte de los residuos de demolición, sin contemplar el gasto energético ni el tratamiento de los residuos al llegar a su destino. Estos datos, también, se presentan como genéricos, al tomar un promedio único válido para las distancias de transporte. Con esto es posible definir como inicio del sistema a analizar al fin de vida de la edificación, con la diferencia que en este caso sí se considerarán los gastos energéticos de la demolición misma y para el transporte se modelará el trayecto recorrido por el volquete y sus emisiones.

Por otro lado, es interesante resaltar dos trabajos de tesis pioneros en su ámbito de aplicación, el Análisis de Ciclo de Vida para las etapas de construcción, uso y mantenimiento de una carretera. Gustavo Larrea (2016) analiza 45 kilómetros de carretera en una zona sensible ubicada entre el Parque Nacional del Manu y la Reserva Comunal Amarakaeri, mientras que Daniel Verán (2017) evalúa un tramo de 22 kilómetros de la carretera Panamericana Sur PS4. En ambos trabajos se obtuvieron indicadores ambientales relacionados al cambio climático y la emisión de material particulado, y dejan en evidencia la necesidad de continuar realizando investigaciones de este tipo.

En cuanto a la obtención de indicadores y formas de evaluar la eco-eficiencia, esto es, ya definidos los impactos ambientales, se tiene la investigación llevada a cabo por Dueñas et al. (2007) en la cual se habla acerca de la expansión del agro costeño con énfasis en el sector azucarero y de cómo esta expansión se lleva a cabo con un bajo rendimiento en el uso de recursos y provocando diversos impactos ambientales en el medio, agua y aire principalmente. El enfoque dado a la eco-eficiencia en esta investigación tiene cierto carácter probabilístico, el cual tiene ventajas notables ya que al normalizar los datos en un rango de cero a uno es posible comparar los aspectos económicos y medio ambientales de distintos proyectos a pesar de que la unidad

funcional sea distinta, esto se debe que al normalizar se eliminan las unidades que se obtienen al hallar los indicadores de eco-eficiencia en función de una unidad funcional.

Por otro lado, en esta misma investigación se menciona al método “Patrón de Curvas” el cual consiste en la evaluación del patrón de las curvas de consumo respecto de la de producción (Dueñas, A., Defilippi, M. & García V., 2006; Dueñas, A., et al., 2007). Aquí se evidencian las pérdidas o los excesos de consumo ya que si la curva “consumo/producción” se encuentra por encima del índice de producción. Esto quiere decir que se usaron más recursos de los necesarios para la producción, lo cual implica un índice de eco-eficiencia deficiente debido a que la eco-eficiencia apunta a producir más usando menor cantidad de recursos (Dueñas, A., et al, 2007).

Los casos mencionados hasta ahora incluyen análisis independientes bajo perspectivas ambientales, la mayoría de ellas bajo la estructura del Análisis de Ciclo de Vida, y económicas en el mundo, incluyendo casos en Perú. Sin embargo, a la fecha, no se ha encontrado registro de estudios específicos que combinen estas dos metodologías en el rubro de las demoliciones, y menos aún con la finalidad de realizar posteriormente correspondientes a la construcción se basan en un análisis integral enfocado en el desarrollo de un nuevo proyecto de carácter inmobiliario o en la producción de elementos empleados en la construcción. Será de vital importancia tener referentes de trabajos que hagan un uso conjunto de ACV y LCC para poder tomar las estrategias presentadas en los mismos y extrapolarlas según requiera el caso de estudio a evaluar.

Los casos de estudio citados ofrecen un panorama de aplicación de las metodologías que se emplearán en esta investigación en contextos distintos al que se evaluará posteriormente. No obstante, las estrategias y procesos empleados en aquellos servirán de punto de partida para desarrollar estas metodologías en un caso de estudio sin precedentes en el Perú.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

El objetivo de la presente tesis es establecer un método de análisis basado en lineamientos de eco-eficiencia para obtener los impactos ambientales generados por la demolición de una edificación y los costos asociados a estos, para así generar indicadores que sirvan de punto de comparación para futuros estudios. Para llevar a cabo dicha tarea se tendrán en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Generar un inventario en el que se vean reflejados los flujos de materia y energía relacionados al caso bajo estudio.
- Realizar un estudio de Análisis de Ciclo de Vida de con el fin de obtener resultados de impacto ambiental en diferentes rubros, como cambio climático, uso de recursos, huella hídrica o emisión de partículas.
- Llevar a cabo un análisis de costos usando la técnica del *Life Cycle Costing* del caso de estudio, de manera que queden definidos todos los flujos económicos generados en estos.
- Relacionar ambas estrategias, ambiental y económica, para obtener indicadores de eco-eficiencia del proceso global.

Asimismo, el proyecto se regirá bajo la siguiente hipótesis: el procedimiento de la demolición y la gestión actual de los residuos de generados en la edificación escogida presenta altos índices de impacto ambiental negativo debido a que en su proceso no se contemplan medidas de mitigación de residuos y uso de energía.

Para desarrollar el trabajo de investigación se siguió el esquema de la Figura 5.

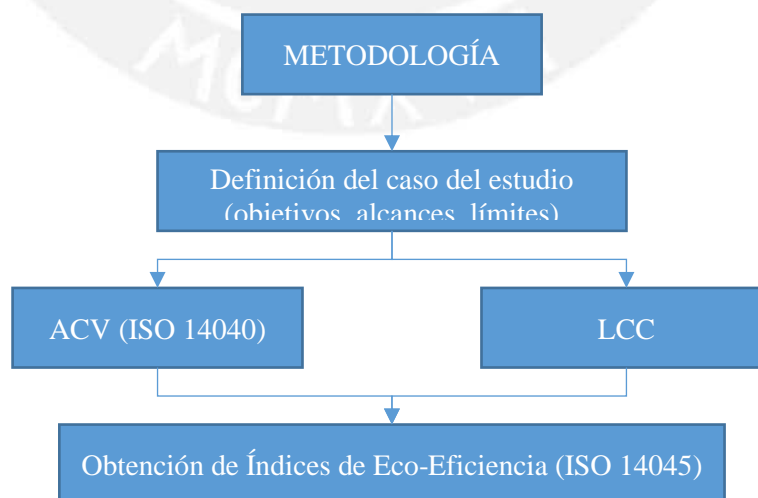


Figura 6. Esquema Metodológico
Fuente: elaboración propia

4.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio seleccionado es la demolición del antiguo pabellón B de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ubicada en avenida Universitaria 1801, en el distrito de San Miguel, Lima, Perú. El pabellón B se encontraba ubicado, aproximadamente en las siguientes coordenadas UTM: 18L 273639 8664547. El proyecto se llevó a cabo bajo el cargo de la empresa Edifica que a su vez subcontrató a la empresa Volquetes Maquinarias para llevar a cabo la demolición. Se fijó un plazo de ejecución de la demolición de 55 días, con una duración estimada de 40 días laborales, pero se logró llevar a cabo en 30 días, finalizando así el 28 de mayo de 2014. Los trabajos generales que se incluían en la programación, según el presupuesto entregado por la empresa Volquete Maquinarias, eran los de demolición, eliminación de escombros y nivelación de la zona del pabellón B. La etapa de la disposición final de los RCD se llevó a cabo de manera continua durante la obra por la misma empresa demoledora y no hubo recuperación del material demolido.

El pabellón B se ubica dentro de la facultad de Ingeniería de la PUCP, al frente de los laboratorios de suelos e hidráulica de la universidad ocupando un área de 656 m². A continuación, la Figura 7 muestra un plano de ubicación del área de demolición.

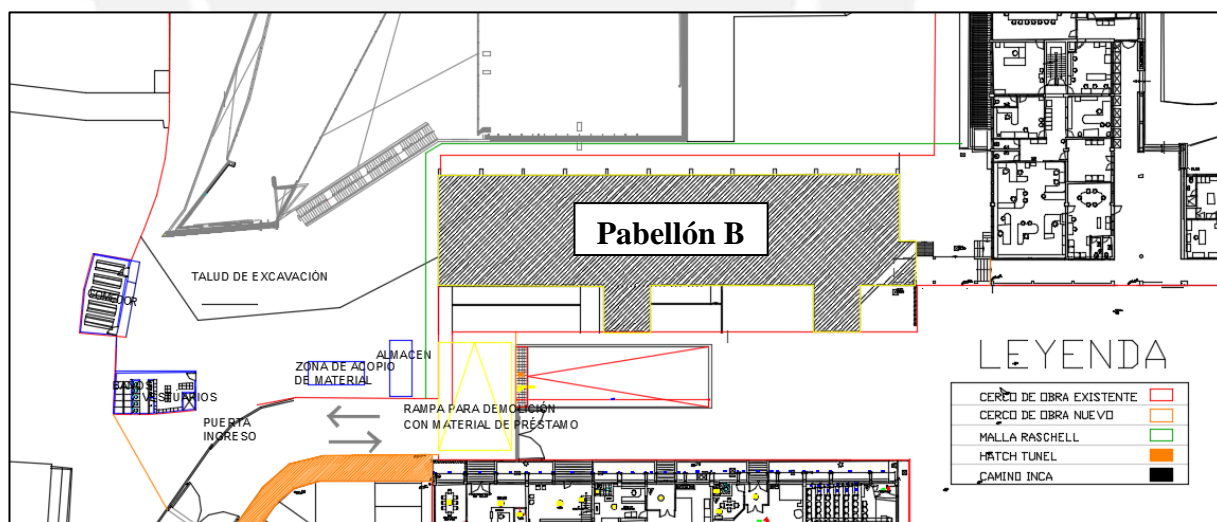


Figura 7. Plano de ubicación del pabellón B.

Fuente: obtención propia de la información brindada por la empresa Edifica.

Antes de realizar los trabajos de demolición se requiere una serie de trabajos preparativos que consisten en el reconocimiento del área de intervención y provisionar

al proyecto de los equipos necesarios para las labores. En la Figura 8 se muestra la secuencia de trabajos previos:

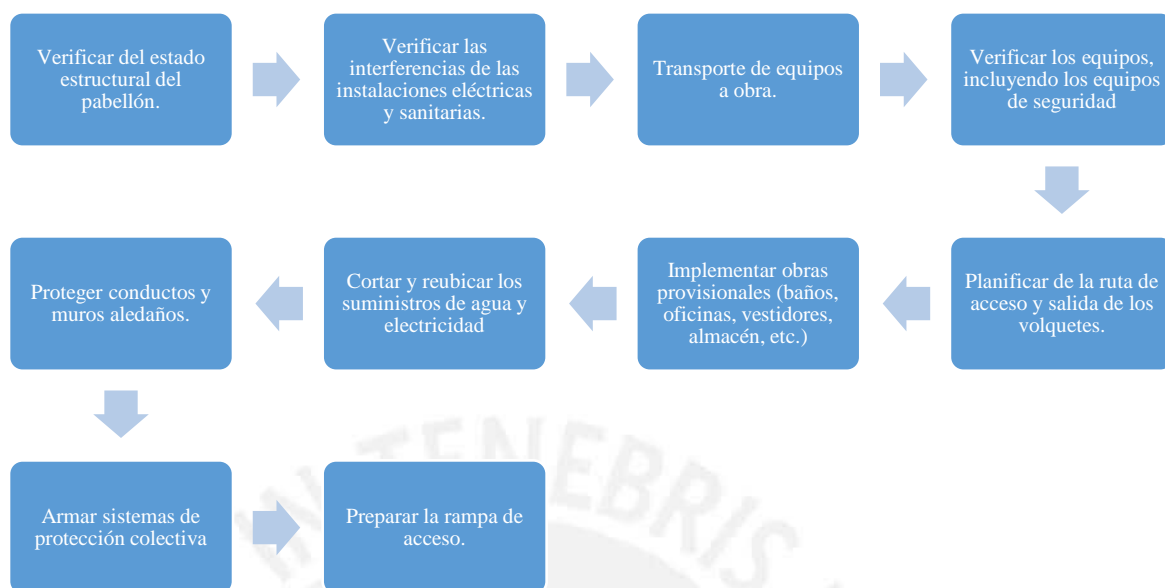


Figura 8. Secuencia de trabajos previos.
Fuente: elaboración propia.

Para la demolición se utilizarán los siguientes equipos y maquinarias ordenados en la Tabla N°4.

Tabla N°4: Equipos utilizados en la demolición

Maquinaria pesada	Equipos manuales	Equipos de protección
Excavadora sobre oruga CAT 330	Picos, palas, barretas	Casco, careta y lentes de oxicorte
Volquetes Volvo de 17m ³	Buggies, combas	Tapones auditivos
Camiones cisterna de 5,000 galones de capacidad	Martillos demoledores eléctricos	Botas, guantes y lentes de seguridad
	Amoladora eléctrica	Respirador para partículas N95 8210
	Equipo de oxicorte	Mandil de soldador
		Sistema contra caídas (arnés, línea de vida)
		Sistema de protección colectiva (mallas, cintas de señalización, cachacos, conos)

Nota Fuente: Elaboración Propia

El proceso de demolición se llevó a cabo en 2 fases. Primero, se llevó a cabo la demolición o sustitución manual, donde se efectuó la remoción de puertas, ventanas y cualquier material o elemento potencialmente reutilizable o que genere un valor económico al ser revendido, el cual luego quedará bajo la custodia y propiedad del contratista. Este proceso es conocido como desmantelamiento. Durante este proceso se lleva a cabo un control de la seguridad de los operarios, ya que hay posibilidad de encontrar material peligroso o tóxico. Para ello, el desmantelamiento debe seguir estrictamente las indicaciones del área de seguridad utilizando el equipo de protección personal adecuado.

Posteriormente se realizó la demolición o sustitución con maquinaria pesada. Para que sea posible realizar estos trabajos primero fue necesario revisar el plan de entrada y salida de volquetes, de manera que las personas del campus universitario se vean lo menos afectadas posibles por este proceso, inhabilitando el acceso por ciertas rutas de la universidad.

Una vez llevadas a cabo las verificaciones necesarias la excavadora empezara a romper las vigas y losas del último nivel avanzando hacia abajo. El material que se produzca de esta servirá como una rampa para que la maquinaria pueda terminar la demolición del edificio. Existen casos donde será necesario llevar a cabo cortes o demoliciones localizadas manuales para que luego la maquinaria pesada termine el trabajo. Para evitar la proliferación de material particulado se empleó un sistema de regado directo a través de cisternas de 5000 galones de capacidad cada una. Aproximadamente se empleaban tres camiones cisterna diarios.

Como etapa final se llevó a cabo la gestión de los residuos generados. Como se mencionó anteriormente, esta etapa la llevó a cabo bajo la empresa Volquete Maquinarias. Esta empresa llevó a cabo un traslado de los escombros mediante el uso de volquetes de diecisiete metros cúbicos de capacidad, sin llevar a cabo una recuperación del material demolido. Previo al carguío diario de cada volquete se humedecía el volumen de escombros con el uso de la cisterna para evitar emisiones de material particulado, luego de este cada volquete llevaba a cabo el recorrido necesario en cada día para completar la eliminación dentro del plazo especificado con destino al botadero de Areneras San Martín y finalizando su recorrido en el depósito de la empresa Volquete Maquinarias.

4.2 Análisis de Ciclo de Vida

La evaluación ambiental será llevada a cabo a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del sistema definido, bajo la directiva de las normas ISO 14040 e ISO 14044, cuyas cuatro fases de implementación (definición de objetivos y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto, e interpretación) servirán de base para el proyecto en general (ISO, 2006).

4.2.1 Definición de objetivos y alcance

El proceso de demolición a estudiar, se puede resumir en tres etapas: trabajos previos, demolición y gestión de residuos, las cuales serán usadas como las etapas del ciclo de vida del proceso (ver Figura 9).

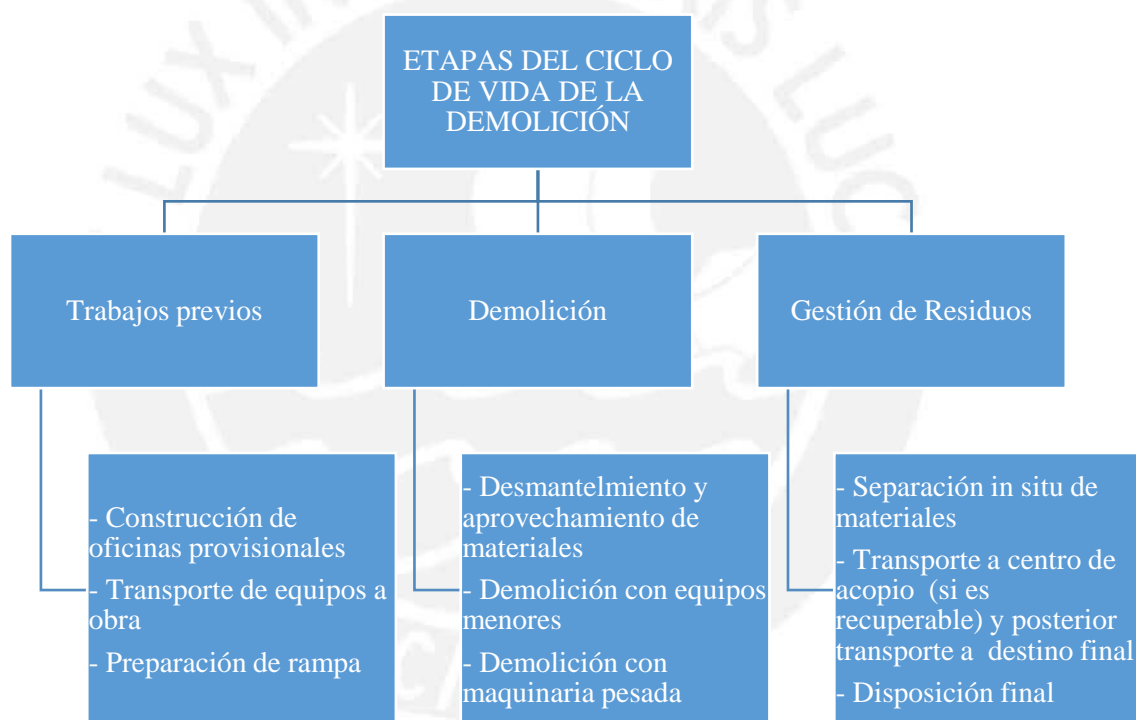


Figura 9. Etapas del ciclo de vida de la demolición
Fuente: Elaboración propia

La unidad funcional escogida para el análisis será el metro cuadrado de edificación demolida. En cada etapa se considerarán solo aquellas actividades que sean relevantes para llevar a cabo un análisis ambiental. Asimismo, es sumamente importante recalcar que en la etapa de gestión de residuos se considerarán dos límites según se haya realizado la disposición de los residuos: en primer lugar, si los residuos se destinan a

una entidad recicladora se considerará el fin del sistema hasta el punto de entrega de estos materiales, sin considerar el impacto producido por los procesos internos que se susciten para llevar a cabo el reaprovechamiento de los residuos; por otro lado, se tendrá la situación en donde el transporte de los residuos sea directamente hacia un relleno sanitario, donde el límite del sistema será hasta el punto de entrega de los mismos. En la Figura 10 se ilustra los límites del sistema.

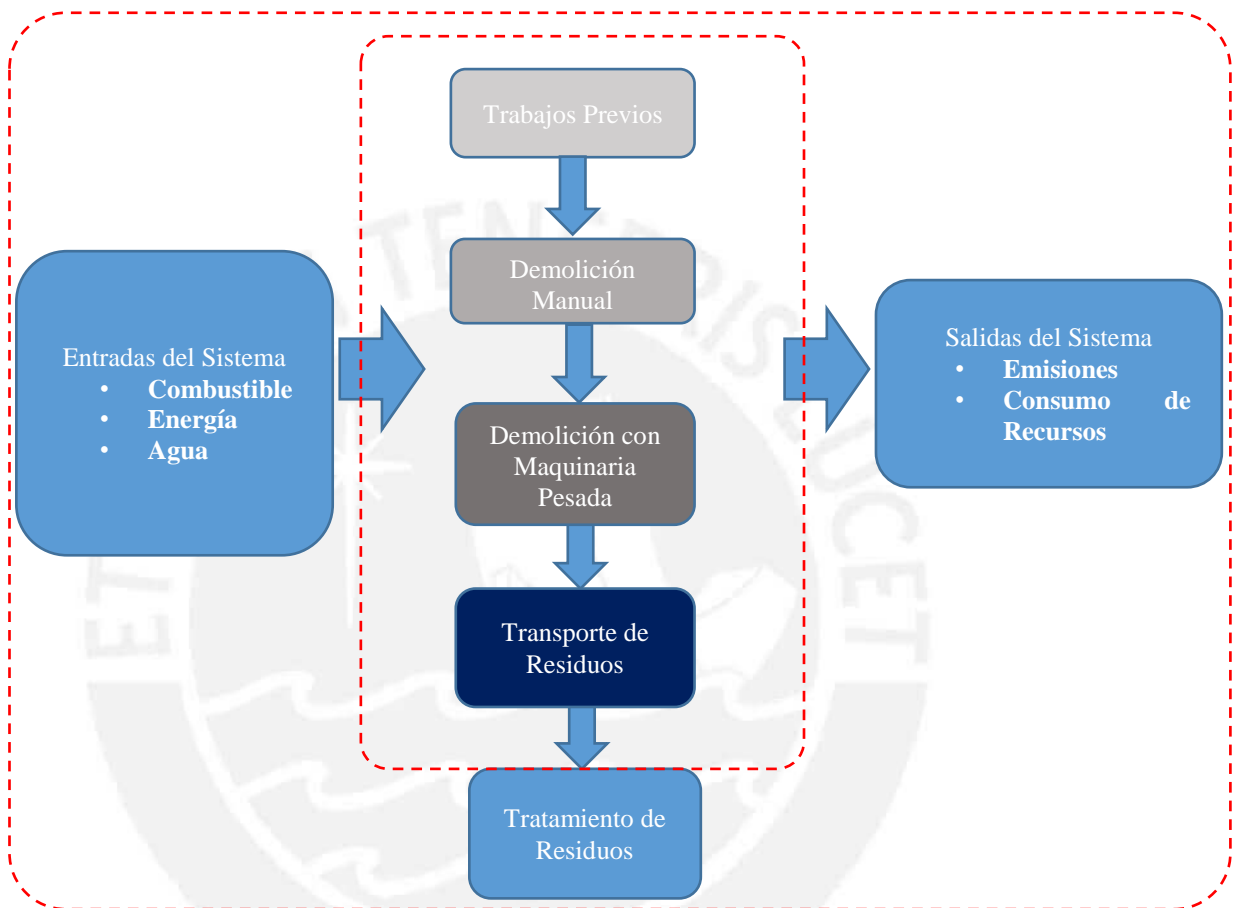


Figura 10. Límites finales de la gestión de residuos de la demolición
Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Inventario de Ciclo de Vida

En esta etapa se efectuó la recolección de los datos asociados a las etapas del ciclo de vida del proceso de demolición, las cuales servirán como entradas para los análisis posteriores. Se debe considerar en esta etapa del proceso que los datos cuantitativos para la etapa de demolición, que es normalmente tomada como la última fase de los análisis de ciclo de vida convencionales es sumamente limitada y dispersa (Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P.,2003). Por ello, se tiene que realizar una creación de

una base de datos, aprovechando al máximo las existentes exclusivamente para este proceso.

Los datos necesarios para el análisis ambiental fueron recolectados de diversas fuentes: planos de arquitectura existentes, certificados provistos por empresas subcontratistas, archivos, declaraciones de trabajadores y literatura relacionada al tema. Cabe resaltar que existen datos que fueron modelados, debido a que no existe información documentada por parte de los involucrados. Las modelaciones serán presentadas a lo largo del desarrollo del proyecto, debidamente sustentadas. Según la información obtenida, los trabajos efectuados se llevaron a cabo en 30 días laborales, en un horario que comprendía desde las ocho horas de la mañana hasta las diecisiete horas (ocho horas de trabajo). Asimismo, las características generales de la maquinaria empleada y los equipos manuales se detallan en la Tabla N°5.

Tabla N°5: Características generales de los equipos empleados.

Equipo/Maquinaria empleada	Potencia	Consumo de diésel (galones/hora)	Consumo de oxígeno (m³/hora)	Consumo de butano (m³/hora)
Retroexcavadora	268 hp	7.24	-	-
Volquetes	330 hp	8.79	-	-
Cisternas	210 hp	5.59	-	-
Martillo demoledor	1.60 kW	-	-	-
Equipo de oxicorte	-	-	5.23	1.98
Amoladora	2.60 kW	-	-	-

Fuente: los diversos valores se obtuvieron de Finesa (2016). Equipos para Soldadura y Oxicorte. Catálogo obtenido de URL: <http://www.infra.com.mx>> Acceso: Mayo de 2016; CAT (2016). Excavadora Hidráulica 330D L. Ficha técnica obtenida de URL: <http://www.kellytractor.com>> Acceso: Mayo de 2016.

Por otro lado, es de suma importancia conocer las características del material de escombros generados debido a la demolición. Debido a la poca duración del proyecto y la falta de documentación por parte de los ejecutores no se tiene una cantidad exacta de escombros generados. Sin embargo, es posible estimarla a través de valores teóricos que son compatibles con la realidad. Según Jury Espinoza, ingeniero residente a cargo del proyecto, se emplea un factor de uno en la relación de metros cúbicos de escombros

generados y el área de cada piso demolido, aunque la práctica evidencia que a veces es mayor.

Por tal motivo, para la estimación de la cantidad de escombros generados se empleará el método propuesto por Pacheco-Torgal, Tam, Labrincha, Ding y de Brito en *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, el cual se asemeja al empleado en la obra, como se mencionó anteriormente.

Se tomarán valores de las Tablas N°6, N°7 y N°8 para poder efectuar los cálculos:

Tabla N°6: Tasas medias de generación de Residuos de Construcción y Demolición en masa (kg/m²).

Tipo de Construcción	Construcción pesada (albañilería, concreto, etc.)		Construcción Ligera (prefabricados, drywall, madera, etc.)	
	Residencial	No residencial	Residencial	No residencial
Edificaciones Nuevas	120-140	100-120	20-22	18-20
Rehabilitación	300-400	250-350	90-120	80-90
Demolición	800-1000	1000-1200	500-700	700-800

Fuente: Adaptado de Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., & de Brito, J. (Eds.). (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Elsevier.

Tabla N°7: Tasas medias de generación de Residuos de Construcción y Demolición en volumen (m³/m²).

Tipo de Construcción	Construcción pesada (albañilería, concreto, etc.)		Construcción Ligera (prefabricados, drywall, madera, etc.)	
	Residencial	No residencial	Residencial	No residencial
Edificaciones Nuevas	0.12-0.14	0.10-0.12	0.02-0.03	0.02-0.03
Rehabilitación	0.3-0.4	0.25-0.35	0.10	0.09-0.10
Demolición	0.80-1.00	1.00-1.20	0.50-0.70	0.70-0.80

Fuente: Adaptado de Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., & de Brito, J. (Eds.). (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Elsevier.

Según el plano de arquitectura proporcionado por la Oficina de Obras y Proyectos de la PUCP fue posible determinar las dimensiones de los ambientes a demoler, los cuales se detallan en la Tabla N°8.

Tabla N°8: Área de ambientes en el Pabellón B de la PUCP.

AMBIENTE	ÁREA (m ²)
1er nivel	433.16
Columnas 1er nivel	1.49
Escaleras	142.68
2do nivel	610.30
3er nivel	610.30
4to nivel	610.30
Techo 4to nivel	433.16
TOTAL	2841.39

Fuente: elaboración propia

Con el total anterior se puede estimar de forma acertada, usando un factor de 1.20 para ambos casos, volumen y peso, obteniendo un valor de 3 049.66 toneladas y la misma cantidad para metros cúbicos de escombros generados.

Con dichos valores se puede realizar un modelado del transporte de escombros, tomando como referencia tres puntos base de traslado: el depósito de Volquetes Maquinarias S.A., ubicado en alameda sur Mza. H-1 lote. 22 Urb. Villa Marina, Chorrillos; Arenera San Martín (centro de disposición final), ubicado en Av. Monteverde 197, Ate; y la PUCP, ubicada en Av. Universitaria 1801, San Miguel. Se muestra en la Figura 11 un esquema que representa el modelo del transporte del material entre los distintos establecimientos.

A continuación, se describe el proceso llevado a cabo para hallar la cantidad de kilómetros recorridos tanto con material cargado como con la tolva vacía. Esto afecta de manera significativa el impacto generado ya que en los viajes cargados se produce una emisión de partículas al aire, mientras que el número de viajes sin carga solo influye en el uso de combustible.



Figura 11. Modelo del transporte de material
Fuente: Adaptado de Google Maps.

Una vez obtenido el volumen estimado de demolición y con la capacidad del volquete se puede hallar la cantidad de viajes teóricos necesarios para movilizar la totalidad de los escombros generados, esto se halla dividiendo el volumen de la demolición entre el la capacidad del volquete. Luego se procede a obtener la cantidad de viajes reales diarios necesarios ya que no es posible realizar una fracción de viaje, los viajes reales diarios necesarios sería la aproximación al menor de la cantidad de viajes teóricos entre el número de días de duración del proyecto. Finalmente, este número aproximado al menor se volvería a multiplicar por la cantidad de días de duración del proyecto.

$$v_t = \frac{Vd}{Vc}$$

$$v_r = vt \text{ (redondeado al menor)}$$

$$v_{tot} = v_r \times t_d$$

Donde:

V_d : Volumen de demolición total en m^3

V_c : Capacidad de un volquete en m^3

v_t : Número de viajes teóricos en un día

v_r : Número de viajes reales en un día

v_{tot} : Número de viajes totales

Se muestran en la Tabla N°9 los resultados de los cálculos descritos.

Tabla N°9: Cálculo de los viajes cargados

Descripción	Cantidad	Unidad
Total demolido	3409.66	m ³
Capacidad por cada volquete	17.00	m ³ /volquete
Viajes teóricos	201.00	viajes
Duración de la demolición	30.00	días
Viajes cargados cada día	6.70	viajes/día
Viajes cargados totales	210.00	viajes

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se usó la cantidad de siete horas de trabajo para cada volquete ya que se asume que de las ocho horas de trabajo se usan en realidad estas horas en las cuales el volquete está transportando el material en todo el día laboral. Debido al horario de trabajo y al estado promedio del tráfico en el horario de trabajo se toma un tiempo de una hora con veinte minutos para el traslado tanto entre la PUCP y el botadero, como entre el botadero y el depósito de la empresa Volquete Maquinarias, para el tiempo de traslado entre el depósito y la PUCP se usó en proporción al tiempo usado para el traslado anterior y según la distancia aproximadamente una hora con dos minutos.

Según las siete horas laborales en las que un volquete puede trasladar el material se halla la cantidad de carguíos posibles para un volquete en un día y en caso de ser necesario se añade un volquete que realiza un solo carguío. Vale decir que en cada día el inicio del recorrido empieza en el depósito de la empresa Volquete Maquinarias, siguiendo a la PUCP, y para un volquete que realiza dos carguíos hay dos viajes con destino al botadero de Areneras San Martín y evidentemente un viaje de vuelta,

mientras que para un volquete que realiza un solo carguío solo tiene un viaje de ida al botadero; en ambos ciclos, al terminar el carguío final se procede con el viaje al depósito. Con estas consideraciones se halla el número de viajes diarios entre cada destino y multiplicándolo por la duración del proyecto se tiene la cantidad de viajes totales entre cada destino. Finalmente, al multiplicar el número de viajes por la distancia recorrida entre cada destino se obtiene la cantidad de kilómetros recorridos totales, y para obtener el tiempo invertido total se multiplica la cantidad de viajes entre cada destino por el respectivo tiempo usado para un viaje entre cada destino, respectivamente. La Tabla N°10 muestra los resultados mencionados anteriormente.

Tabla N°10: Cálculo del kilometraje y tiempo usado en el traslado de material de la demolición.

Descripción	Cantidad	Unidad
Horas laborales diarias por volquete	7	hrs/día/volquete
Viajes cargados/ volquete	2	viajes/volquete
volquetes/día	4	volq/día
Volquetes que hacen 2 carguíos	3	volq/día
Volquetes que hacen 1 carguío	1	volq/día
Viajes diarios entre PUCP y Arenera San Martín	10	viajes/día
Viajes diarios entre PUCP y depósito	4	viajes/día
Viajes diarios entre Arenera San Martín y depósito	4	viajes/día
Viajes totales entre PUCP y Arenera San Martín	300	viajes
Viajes totales entre PUCP y depósito.	120	viajes
Viajes totales entre arenera San Martín y depósito	120	viajes
Viajes totales distancia de la PUCP a Arenera San Martín	32	km
Distancia de la PUCP a depósito	25	km
Distancia de Arenera San Martín a depósito	32	km
Kilómetros recorridos cargados	9600	km
Kilómetros recorridos sin carga	6840	km
Kilómetros recorridos totales	16440	km
Tiempo Total	685	horas

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a asignar qué porcentajes del tiempo de vida útil de las maquinarias y equipos manuales efectivamente se están consumiendo durante el período de demolición. Para la maquinaria pesada se tomaron los datos del documento “El equipo y sus costos de operación” distribuido por la Cámara Peruana de la Construcción, de autoría de Jesús Ramos Salazar.

Para el cálculo de horas presentes en la demolición de los volquetes se asumieron las horas de trayecto efectivas halladas anteriormente, para la retroexcavadora se asumió que trabaja durante toda la jornada de ocho horas, al igual que el camión cisterna, del cual se tiene conocimiento que transportaba tres cargas de agua durante todo el día. Por último, para saber qué fracción del tiempo de vida era consumido por la demolición, se realizaba una división simple como se muestra en la Tabla N°11:

Tabla N°11: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias pesadas.

Tiempo de vida de Maquinarias	Horas en la demolición (hrs)	Tiempo de vida de la maquinaria (hrs)	Fracción de tiempo de vida
Volquete 1	171.25	6900	2.48E-02
Volquete 2	171.25	6900	2.48E-02
Volquete 3	171.25	6900	2.48E-02
Volquete 4	171.25	6900	2.48E-02
Retroexcavadora	240.00	10000	2.40E-02
Camión cisterna	240.00	6900	3.48E-02

Fuente: Elaboración Propia. Datos de vida útil tomados de Ramos Salazar, J. (2011). El Equipo y sus Costos de Operación. Cámara Peruana de la Construcción. Quinta Edición. Perú.

A continuación se procede con las maquinarias menores o equipos manuales, para los cuales se realizó el mismo procedimiento. Sin embargo, para los martillos demoledores y la amoladora se consideró un factor de eficiencia de 0.83. El factor de eficiencia en operación se define, según Julio Félix (1990), como aquel porcentaje de tiempo que trabaja efectivamente la máquina durante la jornada laboral. Según Félix, este factor es comúnmente establecido por el contratista o dueño de la maquinaria, pero es aceptable considerar un valor promedio de cinco sextos (0.83), lo que significa que la maquinaria trabaja 50 minutos por cada 60.

Por otro lado, al equipo de oxicorte no se le aplicó este factor debido a que se contaba con una buena aproximación por parte del contratista encargado, tres horas diarias. Se presenta la Tabla N°12.

Tabla N°12: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias menores o equipos manuales

Tiempo de vida de Maquinarias Menores	Horas en la demolición (hrs)	Tiempo de vida de la maquinaria (hrs)	Fracción de tiempo de vida
Rotomartillo (Martillo demoledor) 1	199.20	3000	6.64E-02
Rotomartillo (Martillo demoledor) 2	199.20	3000	6.64E-02
Rotomartillo (Martillo demoledor) 3	199.20	3000	6.64E-02
Rotomartillo (Martillo demoledor) 4	199.20	3000	6.64E-02
Amoladora	199.20	10000	1.99E-02
Equipo de oxicorte	90.00	10000	9.00E-03

Fuente: Elaboración Propia. Datos de vida útil tomados de Ramos Salazar, J. (2011). El Equipo y sus Costos de Operación. Cámara Peruana de la Construcción. Quinta Edición. Perú.

Con los datos anteriores definidos se procederá a calcular datos más específicos. En primer lugar se evaluarán las emisiones por parte del proceso de demolición y gestión de escombros. Para dichos procesos no existe una metodología específica, ni programas que faciliten el cálculo, por tanto se optó por realizar un modelo sencillo para emisión de partículas.

Según la *Environmental Protection Agency (EPA)*, para la fase de demolición y remoción de escombros, se identifican cuatro actividades principales generadoras de polvo:

- Demolición de estructura.
- Limpieza de terreno
- Carga de escombros dentro de volquetes
- Transporte de escombros
- Descarga de escombros

Para el modelado de emisiones de partículas debido al proceso de demolición, se siguieron los lineamientos del *CALIFORNIA EMISSION ESTIMATOR MODEL*

(*CalEEMod*), preparado por *ENVIRON Internation Corporation*, el cual hace referencia directa a la base de datos *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, la cual se publicó en el año 1972 y se considera la compilación principal de factores de emisión de la *EPA*. Contiene información de más de 200 procesos de polución de aire, divididos en categorías. Los factores de emisión publicados han sido calculados a través de pruebas de campo, estudios de balance de materia y estimados ingenieriles (EPA, 2016).

Según el reporte de *CalEEMod*, no existen factores de emisión directos para el desmembramiento y colapso (demolición) de una estructura, sin embargo, es aceptable trabajar con la ecuación brindada por *AP-42* para operaciones de colocación por lotes (*batch drop operation*), tales como carga y descarga de material de un volquete.

La ecuación es la siguiente:

$$EF_D = k * (0.0032) * \frac{\left(\frac{U}{5}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}}$$

Donde:

EF_D = factor de emisión (lb PM/tonelada de escombros)

EF_D -PM₁₀ = 1.10E-03 lb PM₁₀/tonelada de escombros

EF_D -PM_{2.5} = 1.7E-04 lb PM_{2.5}/toneladas de escombros

k = multiplicador por tamaño de partícula. El AP-42 da valores por defecto para PM₁₀ de 0.35 y para PM_{2.5} de 0.053.

U = velocidad media del viento. Se usa como valor predeterminado 5 (m/s).

M = contenido de humedad promedio del material. Se usa como valor predeterminado 2%.

Por tanto, las emisiones totales serán calculadas multiplicando los factores de emisión por la cantidad total de escombros, empleando la siguiente ecuación:

$$E_D = EF_D \times W$$

Donde:

E_D = emisiones (lb de PM)

EF_D = factor de emisión (lb de PM/tonelada de escombros)

W = desperdicio de la edificación (tonelada escombros)

Para conservar las unidades usadas en el país, al final se le multiplicará por el factor 0.453592, que convierte de libras a kilogramos.

En cuanto a la limpieza del terreno, la *EPA* sugiere tomar como referencia ecuaciones desarrolladas para actividades en minas de carbón. Estas expresiones funcionan (con bajo nivel de confiabilidad, en primer lugar) para escenarios donde se trasladan cantidades importantes de escombros por tiempos prolongados y distancias considerables, es por tal motivo que las unidades resultantes de los factores de emisión son kilogramos sobre hora. Para nuestro caso particular no se tendrá en consideración este aspecto, siguiendo la línea de *CalEEMod*, que tampoco la toma en cuenta para sus estimaciones.

Para la carga y descarga de escombros dentro de los volquetes, *CalEEMod* ofrece un método bastante simplificado con bases en el mismo documento de la EPA en combinación con el documento de AP-42, donde se emplea la fórmula anterior teniendo en cuenta el valor del factor de emisión del *Total Suspended Particulate* – Partículas Suspendidas totales (TSP):

$$EF_L = k * EF_{L-TSP}$$

Donde:

EF_L = factor de emisión (lb de PM/tonelada de escombros)

k = multiplicador por tamaño de partícula. El AP-42 da valores por defecto para PM10 de 0.35 y para PM2.5 de 0.053.

CalEEMod toma como valor predeterminado para EF_{L-TSP} 0.058 lb/ton. Por tanto, para calcular las emisiones de carga/descarga de escombros en volquetes se usará la ecuación final:

$$E_L = EF_L * SF * 0.046 \left(\frac{ton}{ft^2} \right)$$

Donde:

E_L = emisiones (lb)

EF_L = factor de emisión (lb/ton)

SF = metros cuadrados de construcción

Cabe mencionar que la expresión “ $SF * 0.046 \left(\frac{ton}{ft^2}\right)$ ” representa la cantidad de material de desperdicio (escombros) en toneladas que estima *CalEEMod*, sin embargo, con base en las tablas anteriores, se optará por emplear el método de las tablas de Pacheco-Torgal et al. debido a la similitud con la realidad, como se mencionó anteriormente. La ecuación sería:

$$E_L = EF_L * \text{Peso de desperdicio}$$

Respecto a las emisiones de transporte de escombros en camión, la *EPA* sugiere tomar las indicaciones de *AP-42* para caminos pavimentados o no pavimentados, según sea el caso. Para el presente estudio se tendrán en cuenta las consideraciones para caminos pavimentados, debido a que el trayecto hacia el destino final (Arenera San Martín, en Ate Vitarte) cumple con dichas características.

Las expresiones descritas por el *AP-42* son válidas para calcular factores de emisión relacionados a la re-suspensión de partículas presentes en el camino transitado. Las emisiones relacionadas a los gases de vehículos, desgaste de frenos y neumáticos son excluidos de este método para no incurrir en un conteo doble de emisiones.

Para calcular el factor de emisión que determinará la cantidad de material particulado se emplea la siguiente expresión:

$$E = k * (sL)^{0.91} * (W)^{1.02}$$

Donde:

E = factor de emisión de material particulado,

k = factor multiplicador según tamaño de partículas,

sL = carga de limos presente en el camino (en gramos por metro cuadrado)

W = Peso promedio de los vehículos que transitan por el camino (toneladas)

Para el factor “k” se presentan diversos valores y unidades, para el presente trabajo se tendrán en cuenta los mostrados en la Tabla N°13.

Tabla N°13: Multiplicadores según tamaño de partículas

Tamaño de Material particulado	Multiplicador k
	g/VKT ^a
PM -2.5	0.15
PM - 10	0.62

Nota: (a) la unidad significa Gramos por kilómetro viajado del vehículo.

Fuente: Adaptado de Environmental Protection Agency (1995). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Carolina del Norte: Research Triangle park.

En cuanto al valor de sL , la *EPA* también sugiere valores típicos que dependen de la cantidad de vehículos que circulan diariamente por cierta vía. Para el traslado de escombros del presente proyecto se optó por considerar una ruta cuyo recorrido es mayor en las autopistas de la vía de Evitamiento, Ramiro Priale y carretera Central, a las cuales se les considerará como similares en cuanto a la cantidad de vehículos que circulan diariamente por ellas. Según el diario *El Comercio* (2016), la Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías [Sutrán] indica que la cantidad de vehículos que circulan diariamente por la carretera Central es aproximadamente 6,000 entre vehículos livianos y pesados. Por tanto, se tomará el valor recomendado por la *EPA* para vías por donde transitan de 5,000 a 10,000 vehículos de forma diaria, el cual es 0.06 gramos por metro cuadrado.

Por otro lado, para el valor del peso del vehículo se tendrán dos: el primero de ellos correspondiente al peso vacío, mientras que el otro lleno de carga. Para el primer peso se tomará como valor referencial 18 toneladas, debido a que los vehículos empleados fueron volquetes marca Volvo de la serie FM, los cuales, según especificaciones técnicas, tienen un peso bruto vacío de dicha cantidad. Para el peso cargado se asumirá que por viaje van colmados en su capacidad de 17 m³, y según las tablas de Tasas medias de generación de Residuos de Construcción y Demolición en masa y volumen se puede asumir un factor de 1.20 para residuos de construcción pesada no residencial. Así, por viaje, cada volquete se verá cargado con 20.40 toneladas, haciendo un total de 38.40 toneladas.

Con los datos anteriores de kilómetros recorridos, total de escombros generados y las ecuaciones descritas anteriormente, se procede a realizar el cálculo de las emisiones de material particulado durante la demolición. En la Tabla N°14 se muestran las emisiones de material particulado.

Tabla N°14: Emisiones de material particulado.

Fase del sistema	Factor de Emisión PM 2.5	Emisión PM 2.5 (kg)	Factor de Emisión PM 10	Emisión PM 10 (kg)
Desmembramiento y colapso	0.00017	2.63E-01	0.0011	1.70E+00
Carga de escombros	0.003074	4.75E+00	0.0203	3.14E+01
Descarga de escombros	0.003074	4.75E+00	0.0203	3.14E+01
Transporte de escombros				
Vehículo Cargado	0.15	4.60E+00	0.62	1.90E+01
Vehículo Vacío	0.15	2.12E+00	0.62	8.77E+00
Transporte de Cisternas				
Vehículo Cargado	0.15	1.33E+00	0.62	5.48E+00
Vehículo Vacío	0.15	6.37E-01	0.62	2.63E+00
Totales de emisión (kg)	PM 2.5 (kg) →	1.85E+01	PM 10 (kg) →	1.00E+02

Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente usando la cantidad total de horas empleadas por los vehículos se calculará el total de combustible empleado, aplicando las conversiones necesarias (ver Tabla N°15).

Tabla N°15: Consumo de combustible de maquinaria pesada.

Equipo	Factor (gal/hora)	Total (galones)	Total (litros)	Total (kg)
Volquetes	8.79	6021.15	22792.4 6	18917.74
Cisternas	5.59	1341.60	5078.49	4215.15
Retroexcavadora	7.24	1737.60	6577.51	5459.33

Fuente: Elaboración Propia.

Del mismo modo se procede a calcular la cantidad de kilowatts-hora consumidos, a través de la multiplicación de la potencia absorbida por la cantidad de horas empleadas de la maquinaria, se muestran los resultados en la Tabla N°16.

Tabla N°16: Consumo de energía eléctrica de equipos menores

Equipo	Consumo (kW·h)
Rotomartillos	1274.88
Amoladora	517.92
TOTAL	1792.8

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se procede a estimar el consumo de oxígeno, butano y agua, con los datos mencionados anteriormente, cuyos resultados se muestran en la Tabla N°17.

Tabla N°17: Consumo de oxígeno, butano y agua

Equipo	Consumo
Equipo de oxicorte	470.70 m ³ de oxígeno
	178.20 m ³ de butano
Consumo de agua (tres cisternas diarias por 30 días)	1 703 435.40 litros de agua
	450 000 galones de agua

Fuente: Elaboración Propia

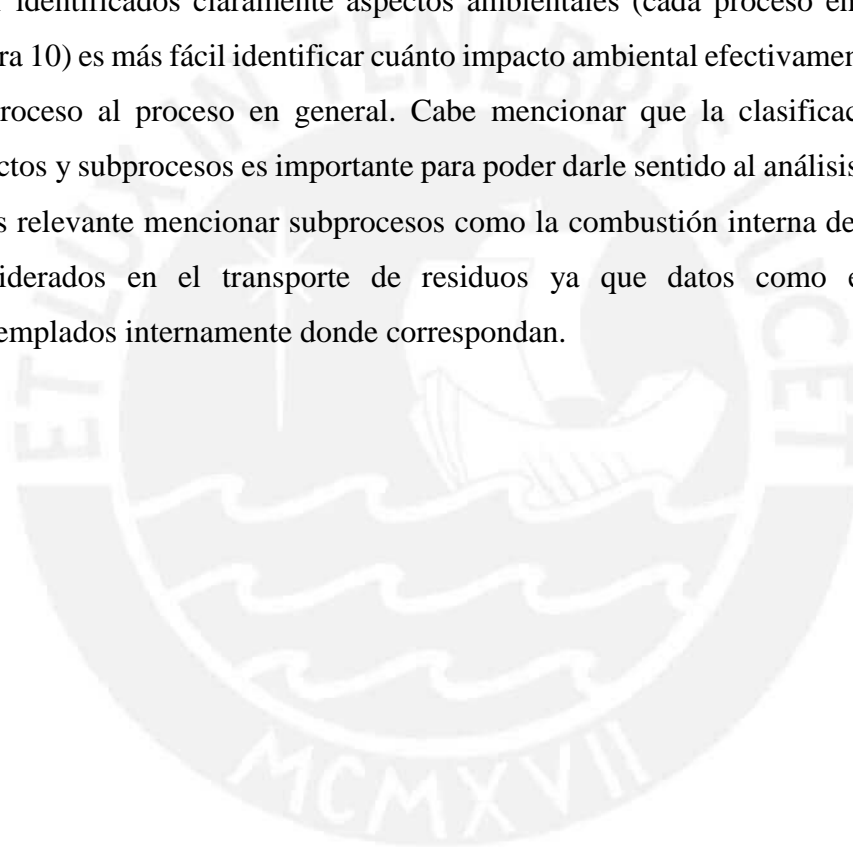
Tomando estos datos como base se procedió a su introducción en el programa SimaPro 8.2, el cual fue escogido para realizar el análisis de ciclo de vida (PRè-Product Ecology Consultants, 2015). Dicho programa de origen alemán, es uno de los mejores soportes para llevar a cabo un ACV según Herrmann y Moltesen (2015), cuyos resultados son confiables según el nivel de detalle que se tenga de los datos de entrada.

4.2.3 Evaluación de Impacto

Para la evaluación de impacto se consideró la metodología de análisis *ReCipe* con sus 18 categorías de impacto. Sin embargo, para la categoría de Cambio Climático se optó por la metodología del IPCC, dado que esta es una metodología más actualizada. La evaluación se apoyó en el software *SimaPro* y la base de datos *EcoInvent*. Cabe resaltar esta base de datos contiene información actualizada en las áreas de energía, agricultura, transporte, biocombustibles, metales, tratamiento de residuos, entre otros y toma en consideración la ubicación en la que se trabaja. Sin embargo es muy común encontrar datos específicos para países europeos, mas no para países latinoamericanos. Por tal motivo, es importante tomar en cuenta considerar la modificación de los datos predeterminados en caso sea necesario para poder adaptar el modelamiento a nuestra realidad y obtener resultados más confiables. En la interfaz del software *SimaPro* se

consideró crear un esquema para poder clasificar lo suficiente los datos a ingresar calculados anteriormente y poder identificar mejor los impactos ambientales según cada etapa del proceso de demolición. La Figura 12 muestra la clasificación de los datos.

Siguiendo el esquema de la Figura 12 y tomando las cantidades obtenidas en el Inventario de Ciclo de Vida, se introdujeron los datos en la plataforma *SimaPro*. Como se explicó anteriormente, esta plataforma modela los procesos generales, debidamente disgregados, y subprocesos apoyándose en la base de datos *Ecoinvent* y muestra los impactos ambientales según las categorías de impacto relevantes seleccionadas. Al tener identificados claramente aspectos ambientales (cada proceso enunciado en la Figura 10) es más fácil identificar cuánto impacto ambiental efectivamente aporta cada subproceso al proceso en general. Cabe mencionar que la clasificación de datos, aspectos y subprocesos es importante para poder darle sentido al análisis, por ejemplo, no es relevante mencionar subprocesos como la combustión interna de los vehículos considerados en el transporte de residuos ya que datos como este ya están contemplados internamente donde correspondan.



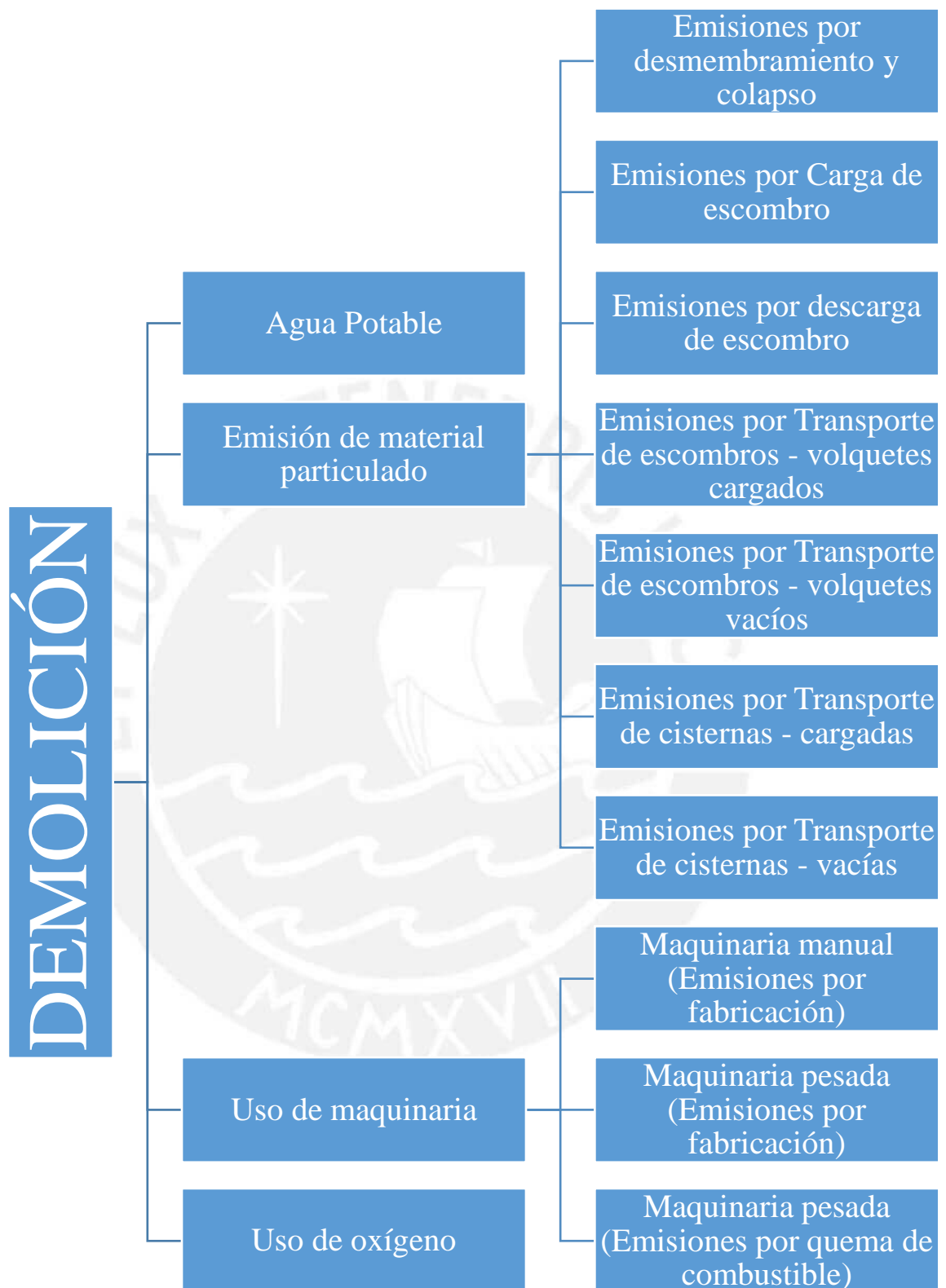


Figura 12. Clasificación de datos en el SimaPro
Fuente: Elaboración propia

4.3 Evaluación económica (*Life Cycle Costing*)

Para el sistema de valoración se eligió una evaluación económica. Esta será llevada mediante el método de *Life Cycle Costing* (LCC), el cual se escogió para cuantificar los costos de cada proceso en el ciclo de vida. De las cuatro etapas propuestas por Harvey (1976) mencionadas en el marco teórico, en la presente tesis se usarán las siguientes:

- Definición de los elementos de coste relevantes para el proyecto.
- Estructuración de los costos.
- Establecimiento del método de formulación del LCC, para el cual se tomarán los ocho pasos indicados por Kauffman.

Se prescindirá de la etapa del establecimiento de una relación de costos ya que todos los costos no se obtendrán mediante una estimación ya que algunos no los requieren debido al corto periodo del proceso de demolición y otros precios serán extraídos de tablas o catálogos.

4.3.1 Presentación de la matriz de costos y la clasificación de los mismos.

Para obtener el *LCC* del caso de estudio se necesitan las matrices de costos de los diversos elementos involucrados en el inventario. Tal como se explicó en los capítulos del marco teórico y de la metodología es necesario en primera instancia identificar el costo de los elementos involucrados en el ciclo de vida del proceso de demolición. Para este caso, los costos de mano de obra están incluidos en el costo de cada equipo ya que estos fueron obtenidos de la publicación de la revista *Costos* (2016), donde CAPECO (Cámara Peruana de la Construcción) brinda un análisis de costo horario de equipo y maquinaria y además explica la inclusión del costo de mano de obra para cada equipo.

Es importante resaltar la forma de obtención de los costos, ya que la elección del método de estimación de costos es importante para definir el costo del ciclo de vida. Esto se lleva a cabo mediante el método expuesto en la Norma Técnica Peruana “Elementos para la Determinación del Costo Horario de los Equipos y Maquinaria del Sector Construcción” (Resolución Directorial N° 035-2010/Vivienda/VMCS-DNC, 2010). Aquí se toma en consideración que el costo horario total se define como la suma del costo de posesión y el costo de operación y además se asume una depreciación anual constante. Las características que influyen en el costo de posesión son los

siguientes: depreciación, valor de adquisición, valor de salvataje o rescate, vida económica útil de la maquinaria, interés de capital invertido, inversión media anual, seguros, impuestos y almacenaje.

Por otro lado, para calcular el costo de operación se tomaron en consideración los siguientes puntos: mantenimiento y reparación, combustibles, lubricantes, grasas, filtros, llantas o neumáticos, piezas de desgaste, herramientas de corte, operador especializado.

Asimismo, fue necesario obtener ciertos costos como los del depósito en el lugar de destino de los residuos, el costo de las cisternas, entre otros costos que influyen de manera significativa en la demolición de una fuente directa, la cual fue una entrevista con el ingeniero residente de obra (ver Anexo 6). En la Tabla N° 18 se encuentran los costos por hora de maquinaria y equipo empleado. Asimismo, de la entrevista con el ingeniero residente de obra y de la información brindada por la empresa Arenera San Martín se obtuvieron los costos estimados mostrados en la Tabla N° 19

Tabla N° 18: Matriz de costos horarios de equipo y maquinaria

Equipo	Costo de posesión por hora (soles/hora)	Costo de operación por hora (soles/hora)	Costo por hora (soles/hora)
Excavadora sobre orugas CAT 330DL	150.04	164.23	314.27
Equipo de oxicorte	2.02	3.29	5.30
Martillo demoledor eléctrico	4.53	1.16	5.69
Amoladora eléctrica	2.02	3.29	5.30
Material de préstamo para construcción de rampa	50.09	4.33	54.42
Volquetes Volvo de 17 m3 de capacidad	80.07	163.43	243.50
Furgon HINO	50.09	81.03	131.12
Furgon MITSUBISHI	57.40	81.03	138.43

Nota Fuente: Elaboración propia. Datos de costos obtenidos de la Revista Costos

Tabla N° 19: Matriz de costos de equipo y maquinaria

Matriz de costos de equipo y maquinaria		
Maquinaria/Servicio	Costo	Unidad
Camión cisterna de 5 000 galones de capacidad con bomba	300	Soles/Viaje
Tratamiento de residuos sólidos	180	Soles/m ³
Botadero de Arenera San Martín	40	Soles/Eje
	100	Soles/3Ejes

Nota Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de la entrevista con el ingeniero residente de Edifica y de la empresa Arenera San Martín.

Por otro lado se tiene el costo de los permisos para poder llevar a cabo la obra, este es un precio único el cual asciende a los 77.90 soles debido al derecho de tramitación según el Texto Único de Procedimientos Administrativos de la Municipalidad de Pueblo Libre (2016).

4.3.2 Clasificación de los costos

Según las etapas de la demolición del pabellón B, las cuales son los trabajos previos, la demolición y la gestión de los RCD, se clasifican los costos de cada elemento según la etapa en la que se usaron. Esta clasificación se muestra en la Tabla N° 20. Es necesario resaltar que un equipo puede haber sido usado en más de una etapa por lo cual es necesario considerarlo en todas las etapas donde aparezcan. Además, es importante tener en cuenta que la disposición de los RCD se llevó a cabo de manera paralela de acuerdo al avance de la demolición y que en realidad estos procesos están traslapados a pesar de que se muestren de manera separada.

Tabla N°20: Clasificación de costos según las etapas del proceso de demolición

Trabajos previos	Demolición	Gestión de RCD
Excavadora sobre orugas CAT 330CL	Excavadora sobre orugas CAT 330DL	Volquetes Volvo de 17 m ³ de capacidad
Retroexcavadora con martillo hidráulico	Retroexcavadora con martillo hidráulico	Furgón HINO
Camión cisterna de 5 000 galones de capacidad con bomba	Equipo de oxicorte	Furgón MITSUBISHI
Material de préstamo para construcción de rampa	Martillo demoledor eléctrico	Botadero Arenera San Martín

Permiso Municipal	Amoladora eléctrica	Tratamiento de residuos sólidos
	Camión cisterna de 5 000 galones de capacidad con bomba	

Nota Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Obtención de los costos totales

Según los ocho pasos que enuncia Kauffman (1970) una vez clasificados los costos, definidos los parámetros que influyen en los costos y los costos de los elementos involucrados en el proceso de demolición, se procede a hallar el valor presente neto del proceso. Para llevar a cabo esto es imprescindible estimar el tiempo de uso de los elementos involucrados y la duración del proceso, los cuales ya fueron descritos anteriormente.

Debido a que se trata de un proceso de corta duración se considerarán los precios de inversión para la demolición como los precios del proceso en sí dentro de una misma unidad temporal. Esto es realizable ya que el LCC es la suma del costo de inversión inicial más el costo del proceso, menos el valor en el presente del producto. Ya que se trata de una demolición y según es recomendado por los lineamientos brindados por la Universidad de Stanford para llevar a cabo un análisis de costo de ciclo de vida, el valor presente es nulo por lo cual se tendrá al LCC como la suma del costo de la inversión inicial más el costo del proceso de demolición; sin embargo al ser el tiempo de operación muy corto (treinta días) y las variaciones en el tiempo se llegan a apreciar a años de aplicación de los costos se asumirá que todo ocurre en la misma unidad temporal (Standford University, 2005). Por esto, los costos se sumarán directamente para hallar el costo total del proceso. En la sección resultados se muestran los costos totales de cada elemento y el costo total de la demolición.

4.4 Estimación de la Eco-eficiencia

La norma ISO 14045 especifica que los resultados del análisis de eco-eficiencia deben ser determinados relacionando los resultados del análisis ambiental con los resultados de la evaluación de la valoración del sistema (en nuestro caso es un análisis económico). La norma sugiere ejemplos de indicadores arbitrarios, por ejemplo la división del indicador producto del análisis de valoración del sistema entre el indicador de impacto ambiental. La elección de los indicadores a ser relacionados deberán ser determinados en base a su importancia para el sistema y deben ser los más

representativos de cada análisis; esto dependerá de la calidad de datos que se tengan y las prioridades de impacto que se otorguen al sistema.

Con los datos de los impactos y los costos generados es posible hallar los índices de eco-eficiencia, los cuales indiquen el impacto generado por cada unidad monetaria. El problema reside en la manera que se han obtenido los resultados ya que se muestra según cada aspecto, mientras que los costos están por cada elemento que participa en el proceso de la demolición. A pesar de esto es posible hallar los índices de eco-eficiencia y para poder lograrlo primero se necesita saber la participación de cada elemento del costo en cada aspecto y de esta manera poder estimar un costo por aspecto.

Esto se llevó a cabo mediante una matriz de participación usando valores uno o cero, donde el valor uno significa la participación del elemento en el aspecto y el valor cero implica que el elemento no participó del aspecto. Una vez realizado esto se obtiene un total del número de veces que participa cada elemento en cada aspecto y de esta manera se normalizan los datos obteniendo factores de participación según el número total de veces que interviene cada elemento en cada aspecto. De esta manera, al multiplicar cada factor de participación por el costo total se obtiene la cantidad del costo total que influye en cada aspecto. Cabe resaltar que este proceso se llevó de tal manera que los costos no se vean reasignados, es decir que al tener elementos que participan en distintos aspectos, asignar el costo entero del elemento a cada aspecto significaría que el elemento participó únicamente de ese aspecto, lo cual hace más representativo considerar un factor de participación. En la Tabla N° 21 se puede apreciar la participación de cada elemento en cada aspecto de la demolición.

Por último, para obtener los factores de eco-eficiencia se llevó a cabo también una matriz de participación ambiental de cada aspecto según cada categoría de impacto, esto se logró con la ayuda de una matriz normalizada de los resultados de impacto ambiental para cada categoría (el porcentaje de participación de cada aspecto en cada categoría de impacto). La Figura 13 resume los procesos seguidos para el cálculo de los índices de eco-eficiencia. Los valores de los factores de participación ambiental según las categorías de impacto se muestran en el Anexo 4.

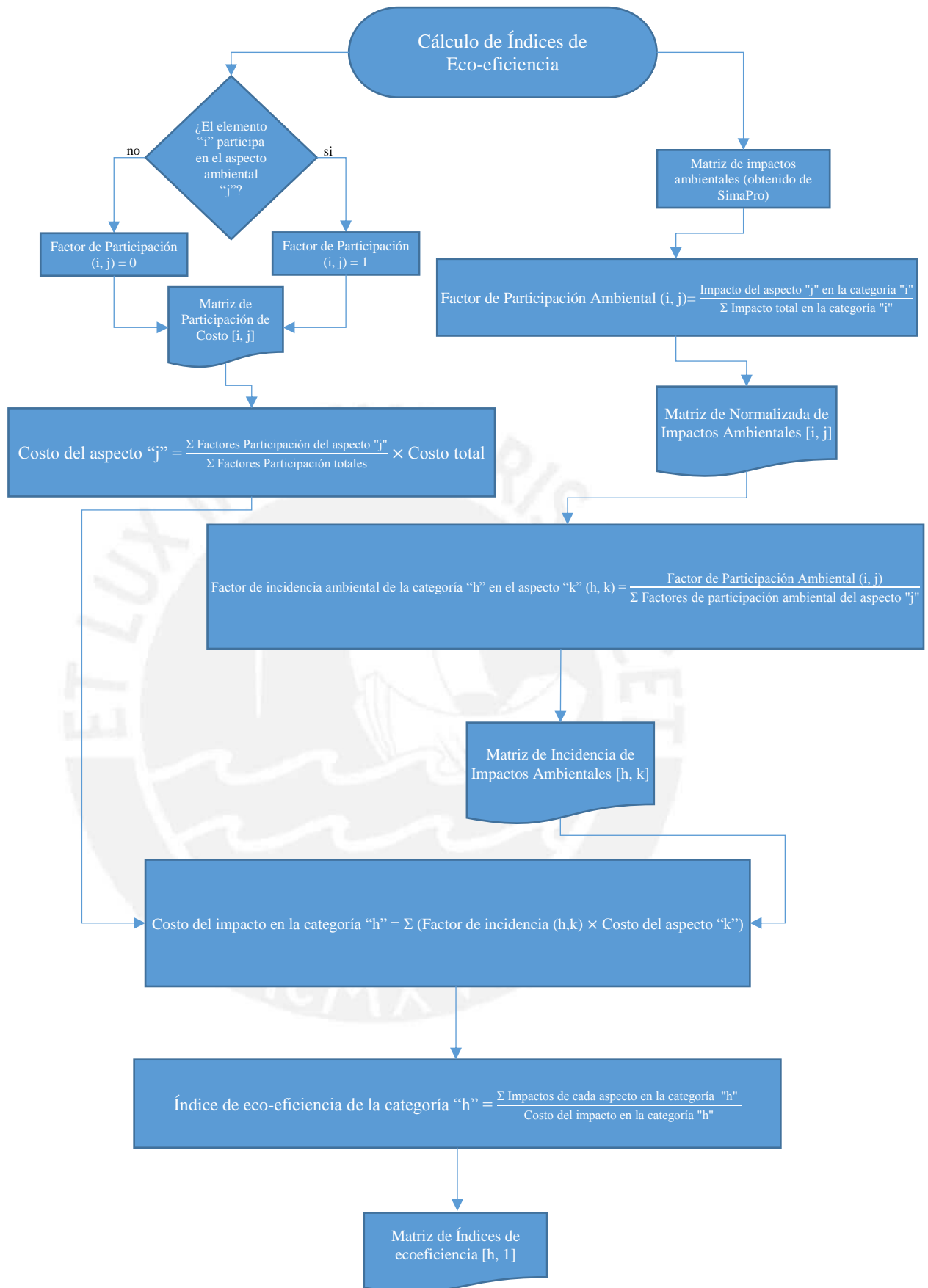


Figura 13. Procedimiento para la obtención de los índices de eco-eficiencia
Fuente: Elaboración propia

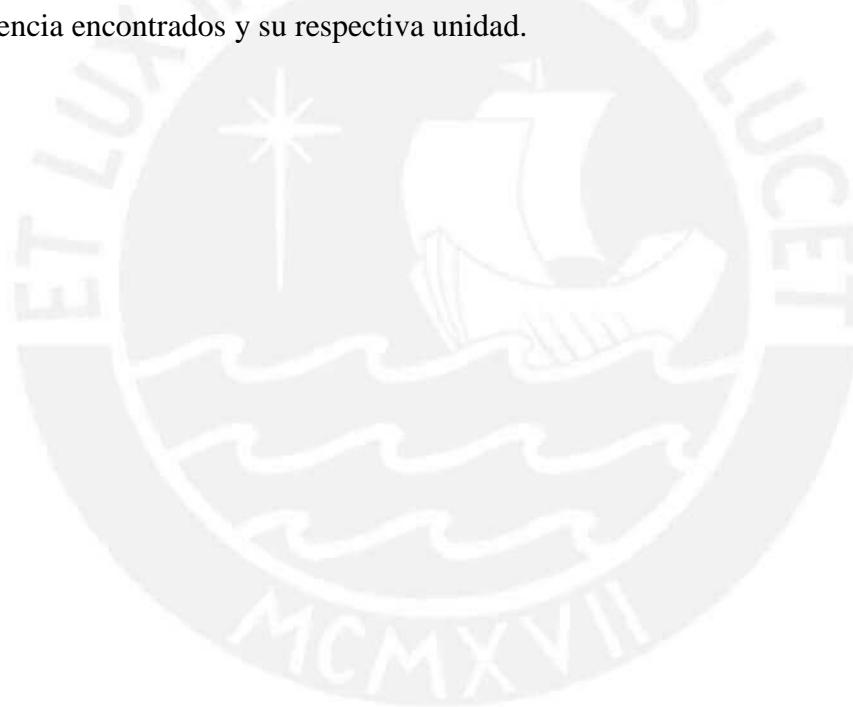
Tabla N° 21: Costo por aspecto según participación de cada elemento

Elemento	Costo (soles)	Porcentaje del costo bruto (%)	Uso de agua en la demolición	Producción de agua potable	Emissiones demolición (Desmembramiento y colapso)	Uso de maquinaria manual	Uso de maquinaria pesada	Emissiones de la maquinaria	Uso de Oxígeno	Emissiones demolición (Carga de escombros)	Emissiones demolición (Descarga de escombros)	Emissiones demolición (Transporte de cisternas - cargado)	Emissiones demolición (Transporte de cisternas - vaciado)	Emissiones demolición (Transporte de escombros - cargado)	Emissiones demolición (Transporte de escombros - descargado)	Suma
Excavadora sobre orugas	75424.80	24.70			1		1	1		1						4
Equipo de oxicorte	318.00	0.10			1				1							2
Martillo demoledor eléctrico	5462.40	1.79			1	1										2
Amoladora eléctrica	318.00	0.10			1	1										2
Volquetes de 17 m3	166797.50	54.62					1	1		1	1		1	1		6
Camión cisterna de 5 000 gal.	27000.00	8.84	1	1			1	1		1		1	1			7
Botadero Arenera San Martín	30000.00	9.82									1					1
Permiso municipal	77.90	0.03														0
TOTAL BRUTO	305398.60	100	1	1	4	2	3	3	1	3	2	1	1	1	1	24
Porcent. de participación (%)			4.17	4.17	16.67	8.33	12.50	12.50	4.17	12.50	8.33	4.17	4.17	4.17	4.17	100
Costo por aspecto (soles)			12724.94	12724.94	50899.77	25449.88	38174.83	38174.83	12724.94	38174.83	25449.88	12724.94	12724.94	12724.94	12724.94	305398.60

Nota Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se halló el costo asociado a cada impacto. Para ello se partió de los factores de participación ambiental según las categorías de impacto (Anexo 4): se tomó la suma de los factores ambientales por cada aspecto y se obtuvo una normalización que indica la incidencia de cada impacto ambiental en cada aspecto ambiental al dividir cada factor ambiental por dicha suma. Acto seguido, teniendo el costo total de cada aspecto, se halló el costo total asociado a cada impacto, que es la suma del producto de cada incidencia del impacto ambiental en cada aspecto, por el costo total respectivo de este último. En el Anexo 5 se indican los factores de incidencia de los impactos ambientales en cada aspecto y costo asociado a cada impacto ambiental

Finalmente, con el costo asociado a cada impacto y el impacto ambiental cuantificado, se obtiene el índice de eco-eficiencia, dividiendo el impacto ambiental entre el costo estimado anteriormente. En la sección de resultados se aprecian los índices de eco-eficiencia encontrados y su respectiva unidad.



CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Análisis de Ciclo de Vida

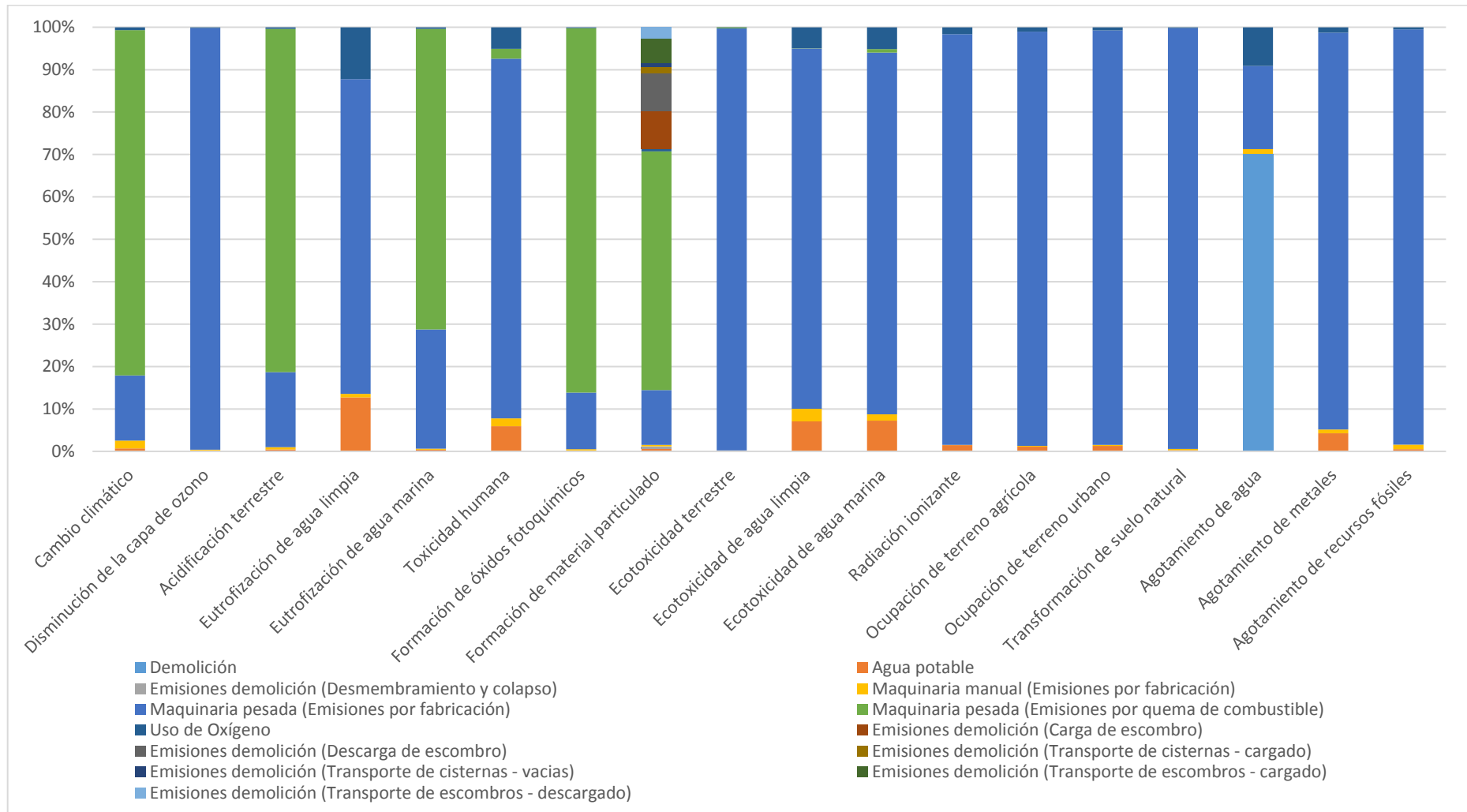
La Figura 14 muestra los resultados del ACV expresados en porcentajes. Los resultados numéricos originales del análisis se encuentran en el Anexo 2. Esta figura nos muestra un gráfico de barras con las contribuciones de cada aspecto a cada categoría de impacto, es decir, cuánto impacto ambiental es generado en cada categoría por cada etapa considerada del proceso de demolición. A simple vista se puede identificar que los aspectos con más participación en la generación de impactos ambientales son la Emisión por quema de combustible de la Maquinaria pesada y las Emisiones por fabricación de la maquinaria pesada. Los demás aspectos tienen una incidencia reducida en los impactos ambientales. Las Figuras 15A y 15B muestran cada categoría de impacto ambiental de una manera más precisa

En la sección de cambio climático, se puede apreciar que el aspecto que tiene más contribución al impacto ambiental son las emisiones por quema de combustible de la maquinaria pesada. Esto incluye, principalmente a los volquetes que transportan los escombros de un lugar a otro. Como se observa en las Figuras 15A y 15B las únicas actividades que contribuyen al cambio climático son aquellas que generan un tipo de emisión que puede ser expresada en dióxido de carbono equivalente, que son básicamente actividades de producción. Las emisiones que no participan de esta categoría son aquellas a las que únicamente se les ha asignado valores computables para emisiones de material particulado. Asimismo debe tomarse en cuenta que la emisión de la maquinaria pesada por quema de combustible es la actividad que predomina en la demolición en lo que respecta al tiempo de ejecución, pues se mantiene durante casi todo el proceso. Las emisiones por fabricación de la maquinaria pesada se hacen presente en menor medida ya que estas no abarcan el cien por ciento de la fabricación de toda la maquinaria, sino son proporcionales al tiempo que representa su trabajo en la demolición respecto a su tiempo de vida total. Los demás aspectos, al dar resultados mucho menores, evidencian que las cantidades empleadas en el proyecto respecto de las dos anteriormente mencionadas, no son significativas para considerar efectuar mejoras sobre estas.

En la disminución de la capa de ozono prácticamente todo el impacto ambiental es causado por la fabricación de la maquinaria pesada. Debe tomarse en cuenta que la unidad de medida de esta categoría es el CFC-11 (clorofluorocarbonos) equivalente, proveniente, principalmente de procesos industriales donde se hacen presentes procesos de refrigerantes, uso de pinturas, empaquetados, aislamiento, disolventes, aire acondicionado, entre otros. (IPCC,2001). Por tanto, mientras mayor sea la cantidad del producto producido, mayor cantidad de CFC-11 equivalente se tendrá. Cabe resaltar que las emisiones de la maquinaria pesada se hacen presentes también pero en menor medida, ya que se considera que el uso de aire acondicionado no es constante durante todo su tiempo de trabajo (algunas máquinas pueden no tener el sistema de aire acondicionado).

En el caso de la acidificación terrestre se tiene a la emisión por quema de combustible como la que ofrece mayor contribución a esta categoría de impacto. La acidificación hace referencia al aumento de del ion de hidrógeno en un ambiente, traducido en lluvia o niebla ácida, siendo el dióxido de azufre y el óxido nitroso los mayores contribuyentes a esta (EPA, 2012).

Si se analizan las demás categorías, se observa que, en doce de las 18 categorías de impacto, las emisiones debido a la fabricación de la maquinaria pesada son aquellas que predominan, mientras 6 de ellas tiene como aspecto con mayor incidencia a las emisiones por quema de combustible. En la categoría de agotamiento de agua, la demolición es la que tiene mayor incidencia pues, como se menciona líneas arriba, el uso de agua se ha imputado directamente en el empleo diario de los camiones cisternas. Una categoría interesante de analizar es la de formación de material particulado, que es la única donde podemos observar la participación de todos los aspectos, donde el de mayor participación es la maquinaria pesada. A pesar de efectuar una imputación exclusiva de las categorías de emisiones de la demolición (aquellas modeladas en base a las indicaciones de CalEEMod) se puede apreciar que aún sumadas las contribuciones individuales de cada una, son menores a la de las emisiones por quema de combustible.



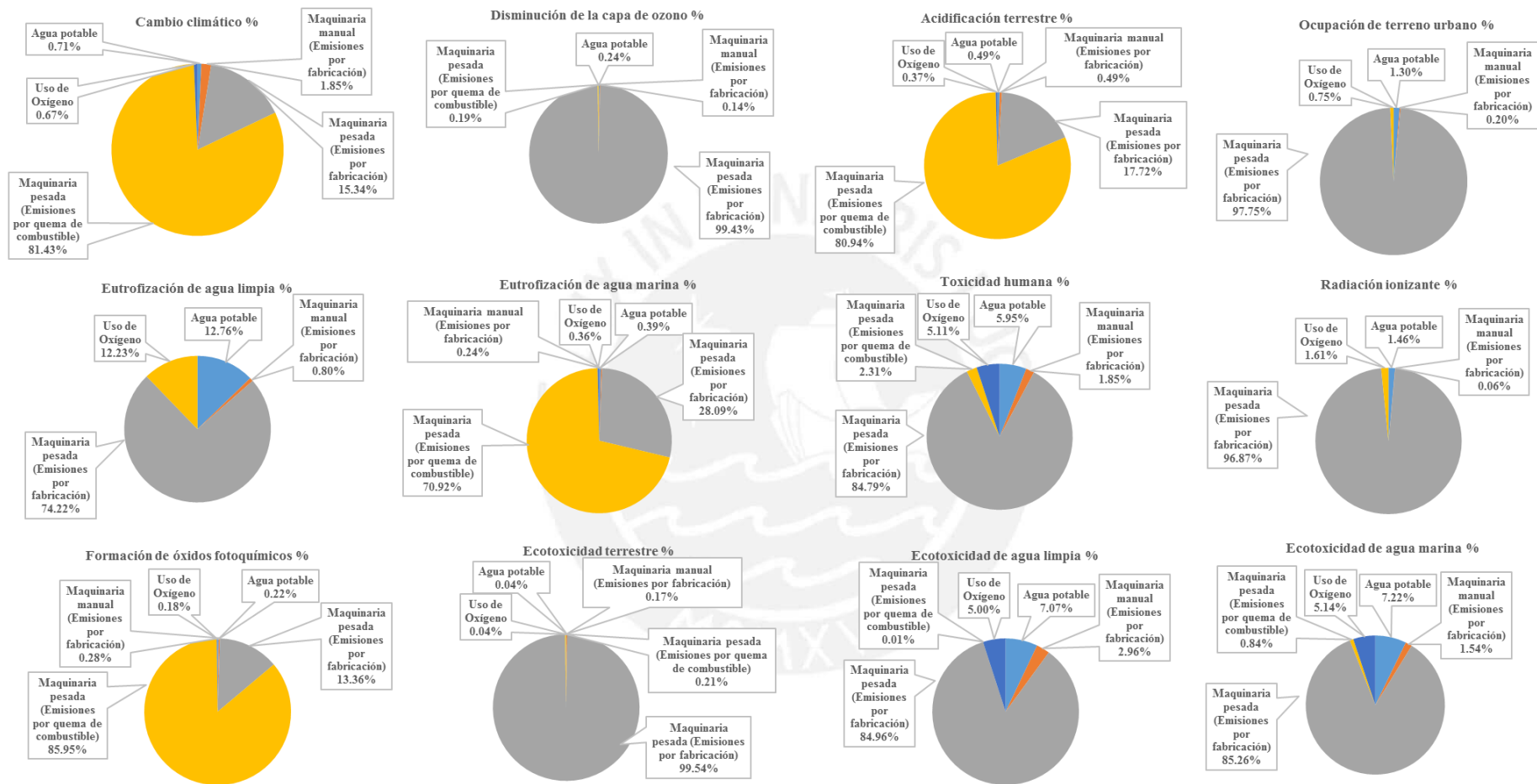


Figura 15A. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida por Categoría de Impacto
 Nota: Fuente: Elaboración propia

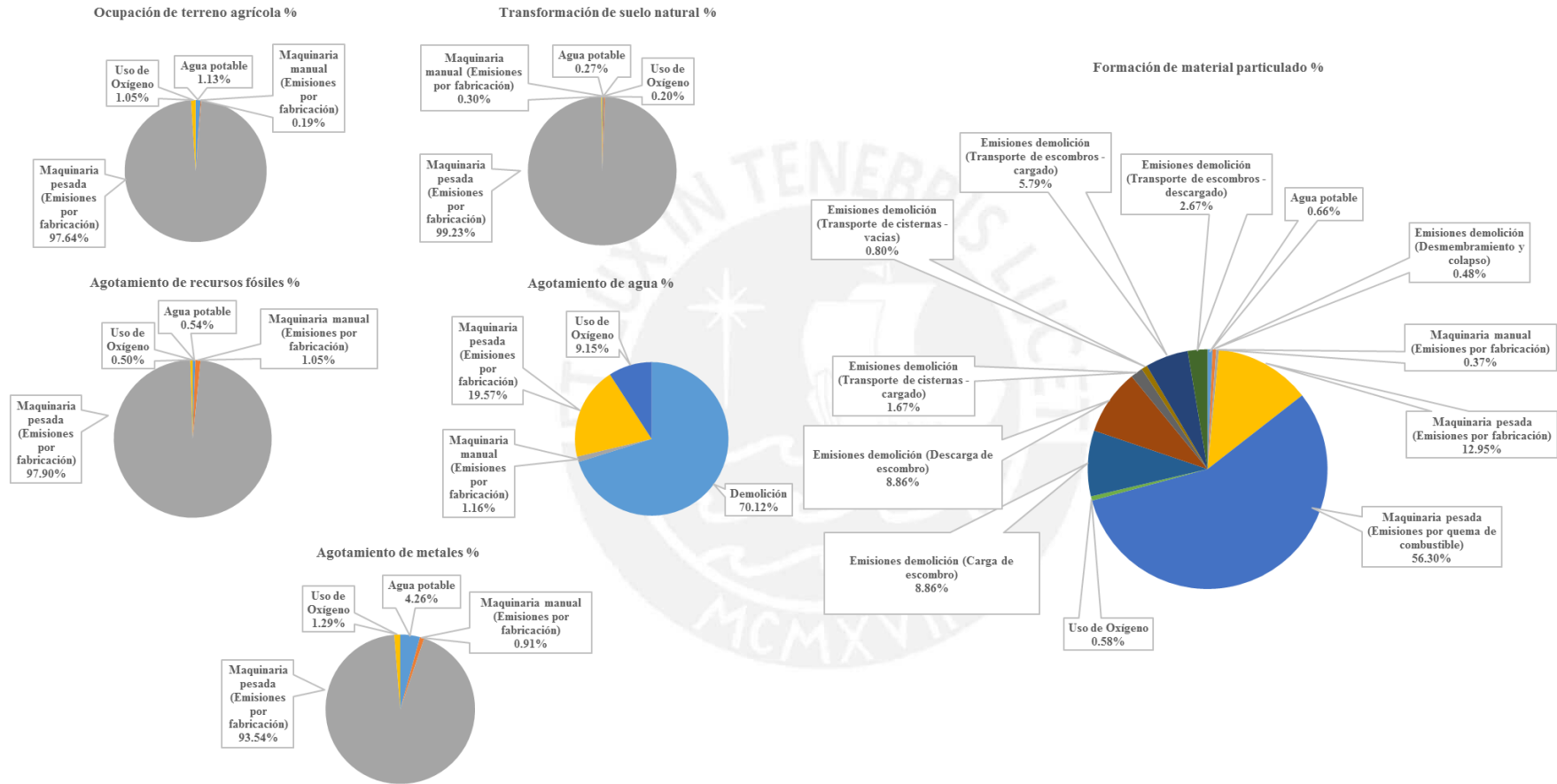


Figura 15B. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida por Categoría de Impacto
 Nota: Fuente: Elaboración propia

5.2 Life Cycle Costing

Según lo desarrollado en la sección de metodología, la Tabla N°22 muestra los costos totales de los elementos relevantes de la demolición.

Tabla N° 22: Costos totales de la demolición

Elemento	Unidad de costeo	Número de elementos	Costo por unidad	Unidades por Elemento	Costo (soles)
Excavadora sobre orugas CAT 330DL	soles/hora	1	314.27	240	75425
Equipo de oxicorte	soles/hora	1	5.30	60	318
Martillo demoledor eléctrico	soles/hora	4	5.69	240	5462
Amoladora eléctrica	soles/hora	1	5.30	60	318
Volquetes Volvo de 17 m ³ de capacidad	soles/hora	1	243.50	685	166798
Camión cisterna de 5 000 galones de capacidad con bomba	soles/viaje	1	300.00	90	27000
Botadero de Arenera San Martín	soles/3 ejes	1	100.00	300	30000
Permiso municipal	por unidad	1	77.90	1	78
				TOTAL	305398.60

Nota Fuente: Elaboración propia

5.3 Estimación de la Eco-eficiencia

Los índices de eco-eficiencia mostrados en la Tabla N°23 representan la relación entre cada categoría de impacto ambiental y el costo específico asociado a esta, considerando únicamente los elementos involucrados en cada aspecto. Este análisis es detallado y requiere cierta minuciosidad en su elaboración. Sin embargo, se pueden hallar índices más directos que requieren un menor procesamiento de información y son totalmente válidos también.

Una alternativa es relacionar el impacto ambiental del proceso de demolición con sus características físicas. Las principales características físicas de la demolición analizada son los metros cuadrados de área demolida y los metros cúbicos de residuos de construcción y demolición obtenidos. Si bien en el presente caso ambas cantidades están relacionadas por un factor de 1.20 pues son estimados teóricos obtenidos de tablas mencionadas en párrafos anteriores, no siempre van a coincidir de manera exacta y es provechoso obtener este tipo de índices por separado. En la Tabla N° 24

podemos observar los índices de eco-eficiencia obtenidos de la división de cada impacto ambiental sobre los metros cuadrados totales de área demolida. Adicionalmente, en la Tabla N° 25 de la sección resultados, se muestran los índices de eco-eficiencia obtenidos de la división de cada impacto ambiental sobre los metros cúbicos totales de residuos de construcción y demolición.

Tabla N° 23: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B (valores reportados para el conjunto de la demolición).

Categoría de Impacto	Costo asociado a impacto (miles de soles)	Impacto (según su unidad)	Índice de eco-eficiencia (Impacto/Costo)	Unidad
Cambio climático	12.30	1.08E+05	8.79E+00	kg CO ₂ eq/soles asociados a cada impacto
Disminución de la capa de ozono	3.48	1.86E-02	5.35E-06	kg CFC-11 eq/soles asociados a cada impacto
Acidificación terrestre	9.81	8.92E+02	9.09E-02	kg SO ₂ eq/soles asociados a cada impacto
Eutrofización de agua limpia	10.90	3.21E+00	2.94E-04	kg P eq/soles asociados a cada impacto
Eutrofización de agua marina	8.66	4.35E+01	5.02E-03	kg N eq/soles asociados a cada impacto
Toxicidad humana	9.31	5.09E+03	5.46E-01	kg 1,4-DB eq/soles asociados a cada impacto
Formación de óxidos fotoquímicos	9.69	9.97E+02	1.03E-01	kg NMVOC/soles asociados a cada impacto
Formación de material particulado	173.00	4.08E+02	2.36E-03	kg PM ₁₀ eq/soles asociados a cada impacto
Ecotoxicidad terrestre	3.46	1.02E+02	2.93E-02	kg 1,4-DB eq/soles asociados a cada impacto
Ecotoxicidad de agua limpia	11.30	1.84E+02	1.62E-02	kg 1,4-DB eq/soles asociados a cada impacto
Ecotoxicidad de agua marina	9.01	1.63E+02	1.81E-02	kg 1,4-DB eq/soles asociados a cada impacto
Radiación ionizante	4.03	7.01E+03	1.74E+00	kBq U ₂₃₅ eq/soles asociados a cada impacto
Ocupación de terreno agrícola	4.02	3.20E+03	7.96E-01	m ² a/soles asociados a cada impacto
Ocupación de terreno urbano	4.01	5.86E+02	1.46E-01	m ² a/soles asociados a cada impacto
Transformación de suelo natural	3.76	3.87E+01	1.03E-02	m ² /soles asociados a cada impacto
Agotamiento de agua	17.70	2.40E+03	1.36E-01	m ³ /soles asociados a cada impacto

Agotamiento de metales	6.13	7.05E+02	1.15E-01	kg Fe eq/soles asociados a cada impacto
Agotamiento de recursos fósiles	5.20	3.55E+04	6.82E+00	kg oil eq/soles asociados a cada impacto

Nota Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se puede hacer una relación directa con el costo total de obra, sin realizar el procesamiento de información para obtener el costo específico de cada impacto. Esto se obtiene dividiendo directamente el valor del impacto en sus respectivas unidades entre el costo total del proyecto de demolición. En la Tabla N° 26 se pueden apreciar los resultados de este análisis.

Tabla N° 24: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según metros cuadrados totales

Categoría de Impacto	Impacto según su unidad (valor total del impacto)	Índice de eco-eficiencia por unidad funcional (impacto/m ²)	Unidad
Cambio climático	1.08E+05	3.80E+01	kg CO ₂ eq/UF
Disminución de la capa de ozono	1.86E-02	6.55E-06	kg CFC-11 eq/UF
Acidificación terrestre	8.92E+02	3.14E-01	kg SO ₂ eq/UF
Eutrofización de agua limpia	3.21E+00	1.13E-03	kg P eq/UF
Eutrofización de agua marina	4.35E+01	1.53E-02	kg N eq/UF
Toxicidad humana	5.09E+03	1.79E+00	kg 1,4-DB eq/UF
Formación de óxidos fotoquímicos	9.97E+02	3.51E-01	kg NMVOC/UF
Formación de material particulado	4.08E+02	1.44E-01	kg PM ₁₀ eq/UF
Ecotoxicidad terrestre	1.02E+02	3.59E-02	kg 1,4-DB eq/UF
Ecotoxicidad de agua limpia	1.84E+02	6.48E-02	kg 1,4-DB eq/UF
Ecotoxicidad de agua marina	1.63E+02	5.74E-02	kg 1,4-DB eq/UF
Radiación ionizante	7.01E+03	2.47E+00	kBq U ₂₃₅ eq/UF
Ocupación de terreno agrícola	3.20E+03	1.13E+00	m ² a/UF
Ocupación de terreno urbano	5.86E+02	2.06E-01	m ² a/UF
Transformación de suelo natural	3.87E+01	1.36E-02	m ² /UF
Agotamiento de agua	2.40E+03	8.45E-01	m ³ /UF
Agotamiento de metales	7.05E+02	2.48E-01	kg Fe eq/UF
Agotamiento de recursos fósiles	3.55E+04	1.25E+01	kg oil eq/UF

Nota Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 25: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según metros cúbicos totales

Categoría de Impacto	Impacto según su unidad (valor total del impacto)	Metros cúbicos totales (m ³)	Índice de eco-eficiencia (impacto/m ³)	Unidad
Cambio climático	1.08E+05	3049.66	3.54E+01	kg CO2 eq/m3 demolidos
Disminución de la capa de ozono	1.86E-02		6.10E-06	kg CFC-11 eq/m3 demolidos
Acidificación terrestre	8.92E+02		2.92E-01	kg SO2 eq/m3 demolidos
Eutrofización de agua limpia	3.21E+00		1.05E-03	kg P eq/m3 demolidos
Eutrofización de agua marina	4.35E+01		1.43E-02	kg N eq/m3 demolidos
Toxicidad humana	5.09E+03		1.67E+00	kg 1,4-DB eq/m3 demolidos
Formación de óxidos fotoquímicos	9.97E+02		3.27E-01	kg NMVOC/m3 demolidos
Formación de material particulado	4.08E+02		1.34E-01	kg PM10 eq/m3 demolidos
Ecotoxicidad terrestre	1.02E+02		3.34E-02	kg 1,4-DB eq/m3 demolidos
Ecotoxicidad de agua limpia	1.84E+02		6.03E-02	kg 1,4-DB eq/m3 demolidos
Ecotoxicidad de agua marina	1.63E+02		5.34E-02	kg 1,4-DB eq/m3 demolidos
Radiación ionizante	7.01E+03		2.30E+00	kBq U235 eq/m3 demolidos
Ocupación de terreno agrícola	3.20E+03		1.05E+00	m2a/m3 demolidos
Ocupación de terreno urbano	5.86E+02		1.92E-01	m2a/m3 demolidos
Transformación de suelo natural	3.87E+01		1.27E-02	m2/m3 demolidos
Agotamiento de agua	2.40E+03		7.87E-01	m3/m3 demolidos
Agotamiento de metales	7.05E+02		2.31E-01	kg Fe eq/m3 demolidos
Agotamiento de recursos fósiles	3.55E+04		1.16E+01	kg oil eq/m3 demolidos

Nota Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 26: Índices de eco-eficiencia de la demolición del Pabellón B según costo total del proyecto

Categoría de Impacto	Impacto según su unidad (valor total del impacto)	COSTO TOTAL SOLES	Índice de eco-eficiencia (impacto/soles)	Unidad
Cambio climático	1.08E+05	305399	3.54E-01	kg CO2 eq/soles totales
Disminución de la capa de ozono	1.86E-02		6.09E-08	kg CFC-11 eq/soles totales
Acidificación terrestre	8.92E+02		2.92E-03	kg SO2 eq/soles totales
Eutrofización de agua limpia	3.21E+00		1.05E-05	kg P eq/soles totales
Eutrofización de agua marina	4.35E+01		1.42E-04	kg N eq/soles totales
Toxicidad humana	5.09E+03		1.67E-02	kg 1,4-DB eq/soles totales
Formación de óxidos fotoquímicos	9.97E+02		3.26E-03	kg NMVOC/soles totales
Formación de material particulado	4.08E+02		1.34E-03	kg PM10 eq/soles totales
Ecotoxicidad terrestre	1.02E+02		3.34E-04	kg 1,4-DB eq/soles totales
Ecotoxicidad de agua limpia	1.84E+02		6.02E-04	kg 1,4-DB eq/soles totales
Ecotoxicidad de agua marina	1.63E+02		5.34E-04	kg 1,4-DB eq/soles totales
Radiación ionizante	7.01E+03		2.30E-02	kBq U235 eq/soles totales
Ocupación de terreno agrícola	3.20E+03		1.05E-02	m2a/soles totales
Ocupación de terreno urbano	5.86E+02		1.92E-03	m2a/soles totales
Transformación de suelo natural	3.87E+01		1.27E-04	m2/soles totales
Agotamiento de agua	2.40E+03		7.86E-03	m3/soles totales
Agotamiento de metales	7.05E+02		2.31E-03	kg Fe eq/soles totales
Agotamiento de recursos fósiles	3.55E+04		1.16E-01	kg oil eq/soles totales

Nota Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La literatura muestra que el Perú continúa creciendo en el sector construcción al igual que muchos países desarrollados en el resto del mundo pero que, a pesar de tener cuantitativamente un crecimiento considerable, la introducción de métodos estimativos durante la fase de diseño para crear una armonía entre costo e impacto ambiental es sumamente escasa. Este tipo de estudios sirve como punto de partida en la obtención de valores típicos que funcionen a manera de base de datos para proyectos de demolición, específicamente, y se pueda en un futuro efectuar comparaciones con diversos sistemas de ejecución empleando el método desarrollado en párrafos anteriores.

En esta investigación se estimaron los impactos ambientales generados durante la demolición de 2841.39 m² de área techada del antiguo Pabellón B de la Pontificia Universidad Católica del Perú a través de un Análisis de Ciclo de Vida, bajo la metodología *ReCiPe* donde se encontraron resultados cuantitativos para dieciocho categorías de impacto. Bajo esta metodología no se puede comparar qué impacto es más nocivo para el ambiente ya que se presentan en distintas unidades. Sin embargo, se identifica que los aspectos que tienen mayor incidencia en los impactos ambientales negativos de cada categoría son los relacionados con la maquinaria pesada: emisiones por fabricación y emisiones por quema de combustible. Craighill y Powell (1999) indican que alrededor del 80% de la energía requerida para la construcción de una edificación se emplea en la producción y transporte de materiales, mientras Sanguinetti y Quiroz (2015) indican que, en un proceso de producción de hormigón, el mayor impacto ambiental en términos de emisiones de dióxido de carbono es generado por los transportes indirectos de materias primas.

El proceso de demolición, en su fase de gestión de residuos, confirma la tendencia de tener al proceso de transporte como aquel agente clave en la resolución de impactos ambientales, y lo califica como agente determinante tanto en la elección del método de demolición como el del tratamiento de residuos (Craighill, A., & Powell, J. C., 1999). Por tanto, una alternativa para mejorar el desempeño ambiental del sistema radica en optimizar los aspectos relacionados con la maquinaria pesada (casi en su totalidad volquetes). Se puede optar por seguir lineamientos europeos para la elección de la maquinaria a través de los estándares de emisión europeos para vehículos de

trabajo pesado. Actualmente se encuentra desarrollado el estándar de emisión para vehículos llamado Euro 6, que está en constante actualización y dicta normas de fabricación para motores vehiculares que limita la contaminación ocasionada por las emisiones (Martini, G., Giechaskiel, B., & Dilara, P., 2009).

A pesar de que las unidades de medición de los impactos, los factores de caracterización, son relativamente precisas y útiles para el cálculo de variables que afectan al medio ambiente, estos no son una herramienta tan potente de decisión ya que no dan una idea real del nivel de daño (Goedkoop et al., M., 2008). De manera que sea posible tener una mejor perspectiva del impacto ocasionado, el método *ReCiPe* posee, además de los factores de caracterización, indicadores de impacto y categorías de impacto a nivel *endpoint*, estas últimas también poseen sus propios factores de caracterización (Goedkoop, M. et al., 2008).

Los factores de caracterización, usados en esta tesis, sirven para llevar a cabo un análisis a nivel *midpoint*, mientras que los indicadores están expresados en unidades mensurables que representan el impacto sobre el ambiente. Asimismo es posible relacionar en su mayoría cada categoría de impacto *midpoint* con una categoría de impacto *endpoint*. Las categorías de impacto *endpoint* son el daño a la salud humana, expresado en años; daño a la diversidad del ecosistema, expresado en años; y daño a la disponibilidad de recursos, expresado en costo. Se muestra en la Tabla N° 27 las relaciones anteriormente mencionadas.

Cabe resaltar que los resultados *endpoint* representan una manera más fácil de entender los impactos y sus consecuencias para personas no familiarizadas con los tecnicismos de un análisis *midpoint*. Al ser de fácil entendimiento, estos pueden ser de ayuda en la toma de decisiones rápidas en cuestiones ambientales, ya que presentan los impactos de una forma más sencilla y resumida en únicamente tres tipos de categorías, lo que posibilita la identificación cualitativa del impacto. Sin embargo, los resultados de un análisis *midpoint* reflejarán datos cuantitativos reales, lo que permitirá tomar decisiones más precisas, ya que es posible detectar qué aspecto se debe mejorar y en qué medida para poder reducir la cantidad de contaminante emitido para poder, por ejemplo, satisfacer límites máximos permisibles. Realizar un análisis de impactos bajo lineamientos *endpoint* para conocer los efectos sobre la salud humana, cambio del clima y daños al ecosistema se puede tomar como una investigación derivada de la presente tesis, abriendo una línea de comparación distinta con una metodología

alternativa, donde se podría comparar también, qué tipo de impactos ambientales predominan en cada método.

Tabla N° 27. Relación entre las categorías de impacto, los indicadores y los factores de caracterización.

Categoría de Impacto	Indicador de impacto	Factor de caracterización midpoint	Factores de caracterización endpoint que son afectados
Cambio climático	Radiación infrarroja	Potencial de calentamiento global	Salud humana y diversidad del ecosistema
Agotamiento de la capa de ozono	Concentración de ozono estratosférico	Potencial de agotamiento de la capa de ozono	Salud humana y diversidad del ecosistema*
Acidificación terrestre	Saturación del suelo	Potencial de acidificación terrestre	Diversidad del ecosistema
Eutrofización de agua potable	Concentración de fósforos	Potencial de eutrofización de aguas potables	Diversidad del ecosistema
Eutrofización de agua marina	Concentración de nitrógenos	Potencial de eutrofización de aguas marinas	Diversidad del ecosistema*
Toxicidad humana	Dosis peligrosa	Potencial de toxicidad humana	Salud humana
Formación de óxidos fotoquímicos	Concentración de ozono fotoquímico	Potencial de formación de óxidos fotoquímicos	Salud humana y diversidad del ecosistema*
Formación de material particulado	Consumo de PM ₁₀	Potencial de formación de material particulado	Salud humana
Ecotoxicidad terrestre	Concentración peligrosa	Potencial de ecotoxicidad terrestre	Diversidad del ecosistema
Ecotoxicidad de agua potable	Concentración peligrosa	Potencial de ecotoxicidad de agua potable	Diversidad del ecosistema
Ecotoxicidad marina	Concentración peligrosa	Potencial de ecotoxicidad marina	Diversidad del ecosistema
Radiación ionizante	Dosis absorbida	Potencial de radiación ionizante	Salud humana
Ocupación de tierra agrícola	Área ocupada	Potencial de ocupación de tierra agrícola	Diversidad del ecosistema y disponibilidad de recursos*
Ocupación de terreno urbano	Área ocupada	Potencial de ocupación de terreno urbano	Diversidad del ecosistema y disponibilidad de recursos*
Transformación de terreno natural	Área transformada	Potencial de transformación de terreno natural	Diversidad del ecosistema y disponibilidad de recursos*
Agotamiento del agua	Cantidad de agua	Potencial de agotamiento del agua	Disponibilidad de recursos*

Agotamiento de recursos minerales	Disminución de grado	Potencial de agotamiento de recursos minerales	Disponibilidad de recursos
Agotamiento de recursos fósiles	Valor de calentamiento superior	Agotamiento de recursos fósiles	Disponibilidad de recursos

Fuente: *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.* (Goedkoop, M. et al, 2008).

Nota: (*) corresponde a los factores de caracterización que no tienen una conexión cuantitativa con el factor de caracterización *midpoint*.

Por otra parte, se realizó un análisis económico del proyecto de demolición. Se estimaron los costos relevantes para el proceso considerando el uso de maquinaria pesada, agua, maquinaria manual y el recorrido de los volquetes. Clasificando estos costos en cada etapa de la demolición y mediante el método descrito en esta investigación se obtienen los costos por impacto. De éste análisis sobresalen los valores de los costos de la formación de material particulado, cambio climático, eutrofización de agua limpia y agotamiento de agua; estos valores en conjunto constituyen un gran porcentaje del costo total de la demolición, este es un resultado esperado ya que en una demolición mecánica se hace gran uso de la maquinaria pesada para impactar la estructura existente llevándola al colapso. Además, en el caso analizado, se mitigó la propagación del material particulado mediante el humedecimiento de este material usando considerables cantidades de agua, por lo cual otro costo importante se encuentra en las categorías referentes al agua limpia. Finalmente, el uso de volquetes para el transporte junto con el de la maquinaria pesada implica el uso de combustibles fósiles lo cual se traduce directamente como emisión de GEI, incidiendo en el costo de la categoría de cambio climático.

Es importante resaltar que si no se hubiera implementado el uso del agua se habría reducido el costo de esta misma, sin embargo se incrementaría el impacto en la formación de material particulado afectando al índice de eco-eficiencia de esta categoría. A manera de reducir los costos debido al uso de la maquinaria pesada se debe evaluar la factibilidad de usar otros tipos de maquinaria y vehículos de menor consumo, la adición de un proceso de reciclaje para obtener un flujo de ingresos debido a la revaloración de los residuos, y un cambio en la técnica de demolición. El desarrollo de un proceso de menor costo e igual o menor impacto, respaldado por un análisis de eco-eficiencia, representaría una opción atractiva para el gestor del proyecto, con la posibilidad de mejorar el margen operativo del este.

En la fase de estimación de la eco-eficiencia se buscó asignar un costo específico a cada impacto a través de la participación de cada elemento involucrado en la demolición, sin redundancias. Los índices obtenidos bajo esta metodología permiten conocer, específicamente, qué elementos participan en la generación de impacto ambiental en cada categoría y permiten realizar un análisis desglosado del proceso de demolición, lo que posibilita un mejor control de los costes involucrados en cada impacto ambiental. Al ser estos independientes del tamaño del proyecto, permiten evaluar distintos métodos de demolición. Los índices hallados sirven como punto base de comparación de proyectos tanto en términos ambientales como económicos según el enfoque que el evaluador quiera seguir. Para esto, se debería obtener una base de datos completa de índices según metodología. En esta investigación los índices hallados son válidos para demoliciones mecánicas. Por ejemplo, si para un mismo proyecto se desea evaluar dos metodologías distintas de demolición de similar costo, se pueden emplear los índices de eco-eficiencia de cada una para hallar el impacto ambiental estimado generado por estas y a partir de ello discernir cuál es la más conveniente para cada categoría de impacto. Por otro lado, si se desea partir de un impacto ambiental estimado similar para cada metodología, los índices se pueden emplear para conocer cuál es precio estimado que se gastaría por cada una, y, a partir de ello, escoger la que más se ajuste al presupuesto estimado y, de ser necesario, realizar las modificaciones necesarias para satisfacer las necesidades ambientales y económicas, generando así un proceso iterativo que podría generar nuevos índices.

Los índices de eco-eficiencia presentados en la Tablas N°24, N°25 y N°26 son muy útiles para realizar estimaciones rápidas de proyectos globales, ya que permiten tomar como referencia datos generales de impacto y costo. Los índices hallados son válidos únicamente para demoliciones llevadas a cabo mediante una metodología mecánica, pero se puede repetir el proceso seguido en esta investigación para distintos proyectos y así obtener índices para cada tipo de proyecto. Gracias a la versatilidad de los índices se pueden incluso hallar otros más específicos. Por ejemplo, se puede combinar el dato de la cantidad de agua usada en el proyecto (o cantidad de cisternas) y la cantidad de material particulado generado, lo que permitiría conocer la cantidad de agua estimada a emplear para no sobrepasar un límite máximo permisible en esta categoría, y a su vez aproximar su costo. Así como este, cada metodología permite la obtención de índices detallados que facilitan la previsión del comportamiento de un proyecto.

Por otro lado, un aspecto que se podría tomar en cuenta para futuras investigaciones es involucrar el tiempo como factor de análisis. Este tipo de análisis podría partir de las indicaciones del *LCC* que sugieren ubicar los costos en un espacio temporal y serviría para saber cuándo, en qué medida y cuánto costaría implementar medidas de mitigación para distintos impactos.

Es de suma importancia llevar a cabo este tipo de investigaciones en el país, ya que el desarrollo del mismo viene acompañado de consecuencias ambientales que dependerán del grado de anticipación que se le pueda dar gracias a lecciones aprendidas de proyectos similares pasados. Asimismo, este tipo de investigaciones abre paso a metodologías de análisis previos de soluciones para un mismo problema, dando la posibilidad de discernir qué alternativa se acomoda más a los objetivos planteados del ejecutor (en este caso en términos ambientales y económicos) a través de la predicción de situaciones y comparación de indicadores tomando como base los hallados en la presente tesis. Se debe ampliar la evaluación a otros casos similares para poder obtener un punto de comparación aceptable ya que no existe precedente de este tipo de análisis en el país, a manera de crear una base de datos y establecer un estándar o línea base que sirva de referencia en la elección de cualquier alternativa evaluada.

El análisis de eco-eficiencia es una herramienta con gran potencial de ayuda para la toma de decisiones dentro de un marco ambiental. Sin embargo, dado que solo se ha evaluado un solo caso el método utilizado no ha logrado alcanzar todo su potencial, el cual reside en la comparación. Por tanto, sería pertinente llevar a cabo más casos de disposición de RCD utilizando distintos métodos de demolición. Las variaciones entre la maquinaria usada, el tamaño del edificio demolido, el uso de agua para disminuir la emisión de partículas PM10, la eficiencia del transporte de los residuos usando distintos tipos de transporte, el uso de explosivos, entre otras técnicas diseñadas para su uso en la demolición podrían dar mayores aportes al nivel de conocimiento que se tiene sobre el sistema más óptimo para la demolición dadas ciertas circunstancias. Asimismo, es posible agregar un nuevo flujo dedicado al reciclaje y revalorización de los residuos donde se analizarían los impactos positivos del reciclaje y reutilización de los residuos tanto en términos ambientales como económico; siendo este comparado con un flujo de procesos en el cual no se incluye el reciclaje.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- Abdullah, A. (2003). Intelligent selection of demolition techniques (Doctoral dissertation, © Arham Abdullah). Acceso: Enero 2017
- Álvarez Alves, L. (2010). Análisis medio ambiental de la gestión de los residuos de la construcción y demolición (RDC's).
- Amienyo, D. & Azapagic, A. (2015) Life Cycle Environmental Impacts and Costs of Beer Production and Consumption in the UK. School of Chemical Engineering and Analytical Science, The University of Manchester.
- Ampliación de vía Ramiro Prialé afectará 786 predios (2016, 04 de Enero). El Comercio. Recuperado de: <http://elcomercio.pe/lima/obras/ampliacion-via-ramiro-priale-afectara-786-predios-noticia-1868553>. Acceso: Abril de 2016
- Banco Central de Reserva (2004-2014), Instituto Nacional de Estadística e Información (2015). Así evolucionó el sector construcción desde el 2004. El Comercio: Portafolio.
Recuperado de:
http://elcomercio.pe/economia/peru/asi-evoluciono-sector-construccion-desde-2004-interactivo-noticia-1804495?ref=flujo_tags_514878&ft=nota_1&e=titulo Acceso: Octubre del 2015.
- Banco Central de Reserva del Perú (2017). Producto Bruto Interno y demanda interna (índice 2007=100) – Construcción. Recuperado de <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01766AM/html> Acceso: Enero 2017.
- Bertrand, C. M. (2009). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización. In *Congreso nacional del medio ambiente (España)*.
- Bosch (2016). Herramientas eléctricas, amoladoras angulares. <URL:<http://www.bosch-professional.com/es/es/amoladoras-angulares-tratamiento-de-metales-101272-ocs-c/>>. Acceso mayo de 2016.

- Brualla, A. (2015) España se convierte en el tercer país por inversión inmobiliaria en Europa, *El Economista: Construcción Inmobiliario*. Recuperado de: <http://www.economista.es/construccion-inmobiliario/noticias/6989252/09/15/Espana-se-convierte-en-el-tercer-pais-por-inversion-inmobiliaria-en-Europa.html> Acceso: Setiembre del 2015.
- Bustillo Revuelta, M. (2010). *Manual de RCD y áridos reciclados*. Fueyo Editores, Madrid, España
- California Air Districts y ENVIRON International Corporation (2013). *California Emissions Estimator Model. Appendix A. Calculation Detail for CalEEMod*. San Francisco.
- CalRecycle (2014). *Construction and Demolition Debris Recycling*. Recuperado de <http://www.calrecycle.ca.gov/condemo/> Acceso: Octubre del 2015
- Carroll, J. S., & Johnson, E. J. (1990). *Decision research: A field guide*. Sage Publications, Inc.
- Castaño, J. O., Rodríguez, R. M., Lasso, L. A., Cabrera, A. G., & Ocampo, M. S. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes*. *Revista Tecnura*, 17(38), 121-129.
- CAT (2016). *Excavadora Hidráulica 330D L*. Ficha técnica obtenida de URL: <http://www.kellytractor.com>> Acceso: Mayo de 2016.
- Consejo Europeo de Gotemburgo (2001). *Conclusiones de la Presidencia*.
- Constructivo (2016). *Demolición de estructuras, recuperación de espacios para nuevas construcciones*. Recuperado de <http://www.constructivo.com/cn/d/novedad.php?id=104> . Acceso: Octubre 2016.
- Côté, R., Booth, A., & Louis, B. (2006). *Eco-efficiency and SMEs in Nova Scotia, Canada*. *Journal of Cleaner Production*, 14(6), 542-550
- Craighill, A., & Powell, J. C. (1999). *A lifecycle assessment and evaluation of construction and demolition waste*. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment.

- Decreto Supremo N°003 – 2013 Vivienda (2013, 8 de febrero). El Peruano.
- Del Pozo, J. M., Valdés, A. J., Aguado, P. J., Guerra, M. I., & Medina, C. (2011). Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. *Informes de la Construcción*, 63(521), 89-95
- Del Rio, M.; Izquierdo, P.; Salto, I.; Cruz, J. S. (2010) “La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid”. *Informes de la Construcción*, Vol. 62 n° 517, pp. 81-86. doi: 10.3989/ic.08.059.
- DeWalt (2014). Catálogo 2014 Herramientas y Accesorios. Catálogo obtenido de: <URL:<http://www.dewalt.com>>. Acceso abril de 2016.
- Dueñas A, Defilippi M & Amp; Díaz V. (2006). Teoría y práctica del método de análisis de patrón de curvas. Mimeo. UNFV.
- Dueñas, A., Defilippi, M., Ramírez, H. & García, V. (2007). Caña y azúcar en el agro costeño: A razón de las externalidades y eco-eficiencia ambiental. SEPIA XII. Perú: El problema agrario en debate. Tarapoto.
- English, M. R. (1999). *Environmental Decision Making by Organizations; Choosing the Right Tools. Better Environmental Decisions: Strategies for Governments, Businesses, and Communities*, 57.
- Environmental Protection Agency (2003). *Construction And Demolition Materials Amounts*. U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de: <http://www3.epa.gov/epawaste/conservation/imr/cdm/pubs/cd-meas.pdf> Acceso: Setiembre del 2015.
- Environmental Protection Agency (2014) *Wastes- Resource Conservation - Reduce, Reuse, Recycle - Construction & Demolition Materials*. U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de: <http://www3.epa.gov/epawaste/conservation/imr/cdm/programs.htm> Acceso: Octubre del 2015.
- Environmental Protection Agency (1995). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Carolina Del Norte: Research Triangle Park

- Environmental Protection Agency (2016). Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. EPA. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. Acceso: Abril de 2016.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2012) Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI). Consulta: 25 de octubre de 2014. <<http://www.epa.gov/nrmrl/std/traci/traci.html>>
- Eurostat (2012). Waste generation by economic activity and households. Eurostat. Recuperado de: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activity_and_households,_2012_lb.png Acceso:
- Félix Castro, Julio César (1990). Procedimiento constructivo y maquinaria utilizada en la elaboración de carpetas de concreto asfáltico. Hermosillo: Universidad de Sonora, Escuela de Ingeniería.
- Finesa (2016). Equipos para Soldadura y Oxicorte. Catálogo obtenido de URL: <http://www.infra.com.mx>> Acceso: Mayo de 2016.
- Fueyo, L. (2003). Manual de demoliciones, reciclaje y manipulación de materiales. Fueyo editores.
- Gaiker (2007). Reciclado de materiales: perspectivas, tecnologías y oportunidades. Diputación foral de Bizkaia, Departamento de Innovación y Promoción Económica.
- García Temoltzi, José Fidel (2016). *Gestión de residuos de la construcción y la demolición en Chile*. Fundación de la industria de la Construcción
- Garraín Cordero, D. (2009). *Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida*.
- Gluch, P., & Baumann, H. (2004). The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. *Building and environment*, 39(5), 571-580.

- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1.
- Grupo Español del Hormigón (1997). Demolición y reutilización de estructuras de hormigón. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Grupo S10 (2016). Costos Construcción, Arquitectura e Ingeniería Ed. 265
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243-1248.
- Harvey, G. (1976). Life-cycle costing: a review of the technique. *Management accounting*, 343-347
- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163-169.
- Hong Kong Buildings Department (2004). Code of Practice for Demolition of Buildings. Buildings Department.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (1984). Demolición de Estructuras de Concreto Reforzado y Presforzado. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2014). Economía peruana crece por 15 años consecutivos. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/economia-peruana-crece-por-15-anos-consecutivos-7441/> . Acceso: Diciembre 2016.
- International Standards Organization (2006). ISO 14040. Environmental Management and Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization.
- International Standards Organization (2006). ISO 14044. Environmental Management and Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization.

- International Standards Organization (2012). ISO 14045. Environmental management — Ecoefficiency assessment of product systems — Principles, requirements and guidelines International Organization for Standardization.
- IPCC III, G. D. T. (2001). Tercer Informe de evaluación. Cambio Climático.
- Kaufman, R. J. (1970). LIFE CYCLE COSTING-DECISION-MAKING TOOL FOR CAPITAL EQUIPMENT ACQUISITION. *Cost and Management*, 44(2), 21-28.
- Larrea Gallegos, G. M. (2016). Análisis de ciclo de vida de la construcción de una carretera en una zona de amortiguamiento en la provincia de Manu, Madre de Dios. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. (1998). España
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Amores, M., Termes-Rifé, M., Marín-Navarro, D., Moreira, M., Feijoo, G., (2016). Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective. *Science of the Total Environment*, 566, 468-479.
- Martini, G., Giechaskiel, B., & Dilara, P. (2009). Future European emission standards for vehicles: the importance of the UN-ECE Particle Measurement Programme. *Biomarkers*, 14(sup1), 29-33.
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Matthews, D. H. (2013). Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter. Unpublished draft.
- Mercante, I. T., Edo, B., María, D., Ibañez-Forés, V., & Arena (2010), A. P. PERFIL AMBIENTAL DE LA GESTION DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION. ELABORACION DE INVENTARIOS DE CICLO DE VIDA
- Mercante, I., Bovea, M., Ibañez-Flores, V., Arena, A. (2010). *Perfil Ambiental De La Gestión De Los Residuos De Construcción Y Demolición. Elaboración De Inventarios De Ciclo De Vida*. 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013). Programa Estatal de Prevención de Residuos. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2007). Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015 (PNIR). España.
- Ministerio del Medio Ambiente, y Medio Oficial y Marino (2009). Boletín Oficial de Estado, Madrid, España.
- Municipalidad de Jesús María (2013). *Plan De Gestión De Residuos De La Construcción Y Demolición Depositados En Espacios Públicos Y De Obras Menores Del Distrito De Jesús María*. Decreto de Alcaldía N° 034-2013-MDJM. Sub Gerencia de Limpieza Pública, Parques y Jardines.
- Municipalidad de San Isidro (MSI) (2012). *Plan Urbano Distrital de San Isidro 2012-2022*. Recuperado de <http://msi.gob.pe/portal/obras-municipales/propuesta-de-plan-urbano-distrital-2012-2022/> . Acceso: Diciembre 2016
- Municipalidad Distrital de Bellavista (2013). *Ordenanza que regula la ocupación de la vía pública con materiales de construcción y gestión de residuos sólidos de la construcción en el Distrito de Bellavista*. Concejo Distrital de Bellavista.
- Municipalidad Distrital de San Miguel (2013). *Plan De Gestión De Residuos De La Construcción Y Demolición Depositados En Espacios Públicos Y De Obras Menores en el Distrito de San Miguel-Lima*. Decreto de Alcaldía N° 004-2013/MDSM
- Municipalidad Distrital de Villa el Salvador (2014). *Ordenanza Que Prohíbe La Informalidad De La Actividad En Recolección, Transporte, Disposición Final O Descarga De Los Residuos Sólidos Urbanos, De La Construcción Y Demolición En La Vía Pública Del Distrito De Villa El Salvador*. Ordenanza Municipal N° 303-MVES.
- Municipalidad Distrital del Rímac (2013). *Plan De Gestión De Residuos De La Construcción Y Demolición Depositados En Espacios Públicos Y De Obras Menores*.

- Municipalidad Provincial de Arequipa (2013). *Plan de Gestión de residuos de la Construcción y la Demolición y de Obras Menores Depositados en Espacios Públicos del Distrito de Arequipa 2013*. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento.
- Municipalidad Provincial de Trujillo (2013). *Plan De Gestión De Residuos De Construcción Y Demolición Depositados En Espacios Públicos Y De Obras Menores Del Distrito De Trujillo 2014 - 2017*. Servicio de Gestión Ambiental de Trujillo. Resolución de Alcaldía N° 319-2013-MPT y 446-2013-MPT.
- Norma Técnica Peruana NTP 400.050 (2014) Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción, Lima, Perú. Octubre del 2015.
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., & de Brito, J. (Eds.). (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Elsevier.
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Red Peruana de Ciclo de Vida (2012). Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo entre ladrillos artesanales y ladrillos mecanizados. Red Peruana de Ciclo de Vida
- Ramos Salazar, J. (2011). *El Equipo y sus Costos de Operación*. Cámara Peruana de la Construcción. Quinta Edición. Perú.
- ReCiPe. (2016). *LCIA: the ReCiPe model*. Recuperado de: http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe.
- Reich, M. C. (2005). Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC). *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 253-263.
- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín iiE*, 91-97.
- Samton, G. (2003). *Construction and Demolition Waste Manual*. City of New York.
- Sanguinetti, C. M., & Ortiz, F. Q. (2015). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 4(2), 16-25.

- Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and buildings*, 35(10), 1049-1064.
- SETAC (1993) “Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice”, Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- Sherif, Y. S., & Kolarik, W. J. (1981). Life cycle costing: concept and practice. *Omega*, 9(3), 287-296.
- Stanford University. (2005). *Guidelines for Life Cycle Cost Analysis*. Stanford University Land and Buildings.
- Statistics Norway (2013). Waste from building and construction. Statistics Norway. Recuperado de: <https://www.ssb.no/statistikkbanken/SelectVarVal/saveselections.asp> Acceso: Setiembre del 2015.
- Stocker, T. F. (Ed.). (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Termes-Rifé, M., Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., Sala-Garrido, R., (2013). Life cycle costing: a tool to manage the urban water cycle. *J. Water Supply Res. Technol.* 62, 468–476.
- Trusty, W. B. (2000). Introducing an assessment tool classification system. *Advanced Building Newsletter*, 25(7).
- UNITED STATES CENSUS BUREAU (2015) Value of Construction Put in Place - Seasonally Adjusted Annual Rate. Recuperado de: <https://www.census.gov/construction/c30/pdf/totsa.pdf>. Acceso: Octubre Del 2015.
- Valdivia Mercado, S. (2002). *Instrumentos de gestión para el sector construcción*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Verán Leigh, D. (2017). Evaluación ambiental de un tramo específico de la autopista Panamericana Sur, usando la metodología de análisis de ciclo de vida. Pontificia Universidad Católica del Perú.

White, G. E., & Ostwald, P. F. (1976). Life cycle costing. *Management accounting*, 57(7), 39-42.

Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing—theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335-344.

Wrisberg, N., Udo de Haes, H.A., Clift, R., Frischknecht, R., Grisel, L., Hofstetter, P., Jensen, A., Lindfors, L.G., Schmidt-Bleek, F., Stiller, H. (1997) “A Strategic Research Programme for Life Cycle Assessment”, Final Document for the Concerted Action LCANET, LCA Documents, Vol. 1, pp. 15-31.

Wübbenhorst, K. L. (1986). Life cycle costing for construction projects. *Long Range Planning*, 19(4), 87-97.

