

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO ENTRE EL USO DE CONCRETO
CONVENCIONAL Y ALTERNATIVAS DE CONCRETO RECICLADO**

Tesis para obtener el título profesional de **Ingeniero Civil**

AUTOR:

BALMACEDA CASTILLO, HANS ALONSO

ASESOR:

IAN VÁZQUEZ ROWE Ph.D.

Lima, 02 de febrero de 2021

Agradecimientos

A mi madre Jeanett Luzmila Castillo Tocto y a mi padre Julio Balmaceda Bayona por ser los pilares en mi formación personal y profesional, por ser ejemplos de responsabilidad y perseverancia para sus tres hijos, por ser mi motivación e inspiración diaria, por su incondicional apoyo, por su entendimiento y amor, paciencia y cariño, y porque siempre apostaron por mí. Los amo con todo mi ser.

A mis hermanos Sergio André Balmaceda Castillo y Miguel Enrique Balmaceda Castillo porque estuvieron siempre cuando los necesité, por regalarme esa cuota de tranquilidad y diversión, porque me escucharon y nunca se decepcionaron a pesar de mis errores y porque estoy convencido que serán mejores que quien escribe. Los amo y sé que con su esfuerzo, lograrán sus objetivos.

A mi abuela Ana María Tocto Escobar Vda. De Castillo porque siempre estuvo conmigo y fue capaz de dejar todo por sus nietos, porque es la personificación del amor a la familia y porque siempre me apoyó de cualquier forma posible. Por sus valiosos consejos y grandes anécdotas que me permitieron aprender enormes lecciones de vida. La amo demasiado.

A mi abuela Rita Bayona Bayona porque a pesar de estar lejos, siempre me demostró el gran amor que sentía por su nieto mayor, porque desde muy pequeño me aconsejó y siempre quiso lo mejor para mí. Estoy seguro que estará muy feliz cuando lea esto. La amo demasiado.

A mis padrinos Juan Alfonso Flores Almestar y Jackeline De los Milagros Castillo Tocto y a mis primos porque su familia fue la representación de la mía cuando estuve solo en Lima, porque fueron la imagen de mis padres y porque me recibieron en su casa con amor y cariño. Siempre me escucharon y respaldaron en cada una de mis decisiones y me dieron la confianza de ser como su hijo, que sepan que jamás los decepcionaré. Los amo.

A mis abuelos, Julio Enrique Balmaceda Correa y Miguel Anibal Castillo Mezones porque sé que desde donde estén interceden por mi bienestar y crecimiento. Los amo.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de este proyecto de investigación y su presentación, a los amigos y profesores por sus consejos. De manera muy especial, a mi amigo y asesor PhD. Ian Vazquez por su paciencia, constancia, gran disposición, por su gran corazón y por siempre creer en mí.

Y a Dios, sobre todas las cosas.

Hans Balmaceda.

RESUMEN

En los años inmediatamente anteriores al inicio de la pandemia de COVID-19, el sector de la construcción en Perú se venía recuperando de caídas recurrentes durante la crisis financiera global. Sin embargo, este progreso sólido se ampara en el crecimiento sostenido del consumo interno de cemento, acero y en la mayor explotación de canteras vírgenes para obtener agregados finos y gruesos, llevando al aumento en la generación de residuos y al agotamiento prematuro de recursos. Por cada tonelada de cemento, se necesitan entre 6 y 7 veces más toneladas de arena y grava. Por lo tanto, en esta tesis se analizan variantes ambientalmente positivas frente a los casos convencionales de estructuras de concreto utilizando los residuos de construcción y demolición generados por el aumento en el sector, para la formulación de nuevas mezclas de concreto reciclado. En primer lugar, se analizó la factibilidad de las mezclas de concreto reciclado mediante la revisión de la literatura pertinente para alcanzar propiedades mecánicas y condiciones de durabilidad adecuadas en su uso establecido y se buscó la optimización aplicando la técnica experimental de mezclado TSMA. Posteriormente, se procedió a determinar los impactos ambientales generados en tres casos de estudio con características de uso, resistencia y cemento particulares, tanto para las mezclas convencionales como para el concreto con agregado reciclado (10%, 15% y 20%). Para ello, se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para un número amplio de indicadores ambientales a través de los métodos de análisis IPCC 2013 y ReCiPe 2016.

A nivel técnico, se pudo confirmar la posibilidad de uso de agregados gruesos reciclados en concreto estructural en Perú en porcentajes no mayores a 15% de peso en mezcla, siguiendo las recomendaciones de la comunidad científica en ingeniería estructural y de materiales en países con condiciones sísmicas similares como EEUU, Japón y Chile. En consecuencia, a partir de porcentajes mayores de peso en mezcla, se torna posible su uso para bajas resistencias, carreteras y rellenos. A nivel ambiental, los resultados de gases de efecto invernadero calculados con el método IPCC reflejaron disminuciones para los 3 casos de estudio: 2.05, 2.60 y 3.24 kg CO_{2eq}/m³ de concreto producido, respectivamente. Estos valores escalados a las tasas de producción de concreto reflejarían disminuciones anuales promedio en emisiones de GEI en 22.3 t CO_{2eq}, aproximadamente. Además, también se obtuvieron reducciones entre un 5% y 24% en otros indicadores ambientales analizados con ReCiPe. Mediante esta investigación, se plantea crear precedentes en la apuesta por la economía circular en Perú, en la búsqueda de la sostenibilidad y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, en la reducción en el uso de combustibles

fósiles y el aumento de energías limpias. Asimismo, en la aplicación de nuevas estrategias ecoamigables como el concreto reciclado y en el enfoque legal del *carbon pricing* en sectores tan convencionales como la construcción.



**Análisis de ciclo de vida comparativo entre el uso de concreto convencional y
alternativas de concreto reciclado**

TEMA : Análisis de ciclo de vida comparativo entre el uso de concreto convencional y alternativas de concreto reciclado
ÁREA : Medio ambiente y Recursos Hídricos
ASESOR : Ian Vázquez Rowe
ALUMNO(S) : Hans Alonso Balmaceda Castillo - 20121534
FECHA : 17/03/2020

Descripción:

En los últimos años, el sector de la construcción se ha venido recuperando de una inestabilidad económica en el rubro, luego de registrar una acumulación de doce años de crecimiento consecutivo hasta el 2014. El PBI y la demanda interna del sector de la construcción han registrado su pico más alto en diciembre del 2017 con 287.4 puntos; mientras que, los meses de enero y febrero con 153.0 y 161.4 puntos, respectivamente, se situaron por encima de su media en los 5 últimos años (BCRPData, 2018). Al mismo tiempo, esto ha significado efectos colaterales como el consumo y desecho de recursos ocasionados por la producción y uso de sus materiales generando impactos ambientales que no pueden pasar inadvertidos.

En primer lugar, la depauperación de recursos naturales es una fase inevitable en el desarrollo de este sector económico, no solo por el proceso de producción del cemento, sino también por el agotamiento necesario de canteras vírgenes para la producción de agregado natural. Aproximadamente 3000 millones de toneladas de agregado se producen cada año en los países de la Unión Europea – UE (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2008). Por lo tanto, en algún momento ello significará la consumación de los recursos no renovables.

En segundo lugar, este sector económico es un alto generador de desechos, recibiendo el nombre de Residuos de Concreto y Demolición (RCD, C&WD en inglés). Hacia el año 2014, aproximadamente 860 millones de toneladas de residuos de C&D se generaron en la UE, lo que representa el 35% de la generación total de desechos (EUROSTAT, 2014). Estas estadísticas pueden resultar desalentadoras debido a que la mayoría de países, incluido Perú, no tienen un plan ampliamente desarrollado de gestión para este tipo de residuos. No obstante, se debería aprovechar esa alta cifra

para apostar por el reciclado de los mismos y reutilizar estos porcentajes en nuevas construcciones a modo de solución sostenible.

En cuanto al entorno normativo, la legislación peruana está bastante desfasada con respecto a la internacional debido a que recientemente se está trabajando en políticas de reciclado. Inicialmente, en el año 2013 en el sector vivienda, se definió el hormigón reciclado (N° 003-2013-Vivienda) y, posteriormente, la última modificación fue en el 2017 donde se indicaron categorizaciones de RCD, según su origen y uso posterior (NTP 400:050 2014). Por otro lado, según la *Cement Sustainability Initiative* (CSI), en Europa, las políticas de gestión de residuos de concreto y demolición (C&DW) están muy bien encaminadas ya que se introdujo el tema de agregados sostenibles desde, aproximadamente, el año 2004. Asimismo, en Japón, la Ley de Reciclaje sobre Materiales de Construcción entró en vigencia, desde 2009, donde se exige el reciclado de RCD (WBCSD, 2009).

En base a lo expuesto, preservar los recursos naturales, reducir los impactos ambientales negativos producto del desarrollo del sector de la construcción y reciclar los residuos de concreto y demolición requieren de implementar medidas con enfoque de economía circular fomentando el desarrollo sostenible en todos sus aspectos. Así, el uso de distintas alternativas de concreto con porcentajes de agregado reciclado provenientes de los RCD significaría una hipotética respuesta sustentable a los problemas presentados. En ese sentido, los porcentajes a evaluar considerarían unas condiciones peruanas sísmicas similares a las de Japón y, de acuerdo a la literatura revisada, validarían la alternativa de uso de mezclas con hasta 20% de agregado reciclado para aplicaciones estructurales (Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural, 2006). A modo de complemento, se pondrían en funcionamiento métodos de mezclado especiales como la TSMA (*two-stage mixing approach*, o enfoque de mezclado en dos etapas en español) que certifiquen la viabilidad técnica de utilizar mezclas con agregado reciclado en diversos escenarios de uso logrando mejorar propiedades y características esenciales del concreto (Tam et al., 2005).

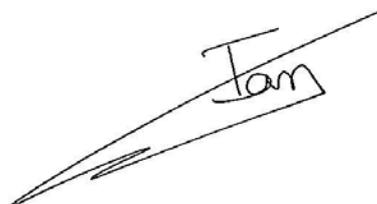
Finalmente, luego de ratificar el uso de concreto reciclado en el contexto peruano mediante la revisión de diversa literatura, se procede con el núcleo de este trabajo de investigación, es decir, la evaluación ambiental comparativa entre dos materiales de construcción con usos similares: una mezcla de concreto convencional y su alternativa de concreto reciclado. Para ello, es propicio seguir la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV; LCA por sus siglas en inglés), herramienta de gestión ambiental que posibilita analizar un producto o sistema con la finalidad de evaluar los

impactos ambientales generados durante todo su ciclo de vida (Klöpffer, 1997). A su vez, se modelará la información haciendo uso del software SimaPro para recolectar, analizar y monitorear el desempeño y la sostenibilidad del sistema elegido mediante gráficos que permiten esclarecer la interpretación de resultados (SimaPro, 2018). De este modo, se podrá corroborar si la aplicación de concreto reciclado en el Perú resulta factible en la parte técnica y favorable ambientalmente, generando menores emisiones de GEI e impactos ambientales que el concreto convencional, incluso para fines estructurales, con porcentajes de agregado reciclado menores a 20%.

Objetivos:

El presente proyecto de tesis tiene como objetivo general contribuir con la implementación de materiales sostenibles como el concreto con niveles variados de agregado reciclado demostrando su eficiencia ambiental frente a procesos de producción del concreto convencional. Asimismo, para lograrlo se cuenta con los siguientes objetivos específicos:

1. Efectuar una comparación entre normativa internacional y legislación peruana sobre residuos sólidos para la elaboración de concreto reciclado.
2. Aplicar la legislación e informes técnicos previamente revisados para concluir tres casos de porcentaje de agregado reciclado (10%, 15% y 20%) y compararlo con tres calidades similares en concreto convencional.
3. Evaluar ambientalmente mediante la metodología del ACV cada caso de concreto reciclado y su respectivo análogo de concreto convencional. Es decir, se centrarán los esfuerzos en calcular los impactos ambientales generados por la producción tanto del concreto reciclado como convencional.
4. Proponer medidas de reducción de emisiones para cada caso de porcentaje de agregado reciclado en concreto.
5. Plantear opciones de mejora y optimización para el concreto mediante el uso de agregados reciclados y enfocarlo en políticas públicas vinculadas al sector.

A handwritten signature in black ink, consisting of the letters 'J', 'a', and 'm' in a cursive style, enclosed within a simple rectangular box. The signature is slanted upwards to the right.

ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| LISTA DE FIGURAS | v |
| LISTA DE TABLAS | vi |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 2.1. GENERACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS | 8 |
| 2.1.1. Residuos de Concreto y Demolición (RCD)..... | 12 |
| 2.1.1.1. Gestión de RCD | 17 |
| 2.1.1.2. Los áridos reciclados provenientes de RCD..... | 25 |
| 2.2. CONCRETO RECICLADO | 29 |
| 2.2.1. Procesos de producción de áridos reciclados para nuevas mezclas..... | 29 |
| 2.2.2. Propiedades del hormigón con agregados reciclados | 33 |
| 2.2.3. Medidas de optimización de mezclado: TSMA (Two Stage Mixing Approach en inglés)..... | 39 |
| 2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA AMBIENTAL | 40 |
| CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE | 40 |
| CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA | 59 |
| 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO | 60 |
| 4.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA | 63 |
| 4.2.1. Definición de objetivos y alcance..... | 64 |
| 4.2.1.1. Objetivo principal y Alcance | 64 |
| 4.2.1.2. Función y Unidad funcional | 65 |
| 4.2.1.4. Recolección de información | 67 |
| 4.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida (LCI) | 68 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS | 86 |
| 5.1. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA (LCIA) | 86 |
| 5.2. MODELACIÓN DE CASOS Y RESULTADOS..... | 86 |
| CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 95 |
| 6.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... | 95 |
| 6.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON EL CONCRETO CONVENCIONAL | 100 |
| 6.3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE IMPACTOS Y OPTIMIZACIÓN | 107 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 113 |
| REFERENCIAS | 118 |
| ANEXOS | 132 |
| ANEXO A: PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETO RECICLADO | 132 |
| ANEXO B: TÉCNICA EXPERIMENTAL DE OPTIMIZACIÓN DE MEZCLADO TSMA. | 133 |
| ANEXO C: RUTAS RECORRIDAS POR VOLQUETES Y CISTERNAS HACIA TODOS SUS DESPLAZAMIENTOS - MODELO DE TRANSPORTE..... | 134 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: PBI del sector construcción de enero y febrero entre 2014 y 2018 | 1 |
| Figura 2: Factores que influyen los elementos del sistema de gestión integral de residuos sólidos. . | 9 |
| Figura 3: Principio de jerarquía de 4R's de Gestión Integral de Residuos Sólidos | 10 |
| Figura 4: Elementos principales generados en Residuos de Concreto y Demolición | 15 |
| Figura 5: Recomendaciones para el encargado general de obra..... | 21 |
| Figura 6: Reutilización en obra a modo de Gestión de RCD | 22 |
| Figura 7: Diagrama de disposición de residuos de construcción de nuevas estructuras | 25 |
| Figura 8: Diagrama de disposición de residuos de demolición | 25 |
| Figura 9: Composición básica de residuos de construcción y demolición | 26 |
| Figura 10: Diagramas de flujo de plantas de primera generación (a) sistema cerrado, (b) sistema abierto. | 31 |
| Figura 11: Diagrama de flujo de plantas de segunda generación | 32 |
| Figura 12: Composición de árido grueso reciclado..... | 35 |
| Figura 13: Fases en la Metodología del ACV | 42 |
| Figura 14: Índice de PBI por sectores económicos (Primeros tramos 2016-2018) | 48 |
| Figura 15: Esquema metodológico | 59 |
| Figura 16: Producción anual y reciclado de RCD en millones de toneladas de países seleccionados. 61 | |
| Figura 17: Porcentaje de reciclado de RCD | 61 |
| Figura 18: Límites finales del sistema a evaluar ambientalmente | 67 |
| Figura 19: Entradas y salidas en sistema a evaluar | 68 |
| Figura 20: Planta de producción de agregado reciclado, vista en planta. | 82 |
| Figura 21: Porcentajes de Incidencia en 5 Categorías de Impacto – ReCiPe Midpoint H..... | 87 |
| Figura 22: Porcentajes de Incidencia de los casos de concreto reciclado – IPCC GWP 100a..... | 90 |
| Figura 23: Impacto de la Producción de Áridos Reciclados vs. Uso de Grava de Categorías de Impacto de la metodología de evaluación ReCiPe | 91 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Comparación de LCIA de un edificio de concreto y otro de acero | 2 |
| Tabla 2: Uso de Residuos de Concreto y Demolición en 1 m ³ de hormigón demolido | 4 |
| Tabla 3: Clasificación, generadores comunes y tipos de Residuos Sólidos | 8 |
| Tabla 4: Elementos principales en Residuos de Construcción y Demolición..... | 14 |
| Tabla 5: Componentes peligrosos en RCD por elementos y sus respectivos riesgos | 16 |
| Tabla 6: Cargas ambientales producto de ACV para 1 tonelada de construcción y demolición de residuos tratados según diferentes métodos..... | 22 |
| Tabla 7: Clasificación de áridos reciclados de acuerdo a su composición | 26 |
| Tabla 8: Ventajas en durabilidad de concreto reciclado utilizando la técnica de optimización TSMA... | 39 |
| Tabla 9: Generación de residuos per cápita por regiones | 46 |
| Tabla 10: Generación de residuos per cápita por regiones | 47 |
| Tabla 11: Marco legislativo para RCD en Alemania | 52 |
| Tabla 12: Casos de estudio de la presente investigación | 60 |
| Tabla 13: Porcentaje máximo óptimo permitido de árido reciclado en peso..... | 62 |
| Tabla 14: Características generales de los equipos empleados | 71 |
| Tabla 15: Consumo de diésel en kg por maquinaria pesada de demolición y transporte..... | 72 |
| Tabla 16: Consumo de energía eléctrica por maquinaria de demolición | 73 |
| Tabla 17: Emisiones producidas por consumo de acetileno del equipo de oxicorte | 73 |
| Tabla 18: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias de demolición | 74 |
| Tabla 19: Área de ambientes en Antiguo Pabellón B de la PUCP | 74 |
| Tabla 20: Tasas medidas de generación de RCD en masa (kg/m ²) y volumen (m ³ /m ²) | 75 |
| Tabla 21: Calculo de viajes reales de transporte de escombros a planta de producción | 76 |
| Tabla 22: Cálculo de tiempo promedio por ruta de viaje (Ruta 1, Ruta 2, Ruta 3)..... | 77 |
| Tabla 23: Cálculo de toneladas de RCD por kilómetro recorrido y tiempo de transporte | 78 |
| Tabla 24: Cálculo de emisiones de material particulado por demolición de la estructura | 80 |
| Tabla 25: Cálculo de emisiones de material particulado por carga y descarga de RCD en volquete ... | 81 |
| Tabla 26: Cálculo de emisiones de material particulado por transporte de escombros | 82 |
| Tabla 27: Producción de agregados reciclados para los casos 1 y 2..... | 83 |
| Tabla 28: Producción de agregados reciclados para el caso 3..... | 84 |
| Tabla 29: Dosificaciones para cada caso de estudio de concreto convencional | 85 |
| Tabla 30: Dosificaciones para cada caso de estudio de concreto reciclado..... | 85 |
| Tabla 31: Resultados IPCC y su porcentaje de incidencia de Demolición y Transporte | 86 |
| Tabla 32: Resultados IPCC de Demolición y Transporte..... | 88 |
| Tabla 33: Resultados IPCC de Casos Convencionales de Concreto | 89 |
| Tabla 34: Resultados ReCiPe de Producción de Concreto con 10% de árido reciclado..... | 92 |
| Tabla 35: Resultados ReCiPe de Producción de Concreto con 15% de árido reciclado..... | 93 |
| Tabla 36: Resultados ReCiPe de Producción de Concreto con 20% de árido reciclado..... | 94 |
| Tabla 37: Resultados GWP enfatizados en Diésel B5, según IPCC – Demolición y Transporte..... | 95 |
| Tabla 38: Resultados enfatizados en Diésel B5, según ReCiPe – Demolición y Transporte | 96 |
| Tabla 39: Diferencia entre uso de oxiacetileno y oxibutano..... | 97 |
| Tabla 40: Diferencias por reducción de distancias de transporte al 50%, según las 17 categorías de impacto ambiental de ReCiPe | 98 |
| Tabla 41: Análisis de escenario para CASO 2 con cemento puzolánico | 102 |

LISTA DE ACRÓNIMOS

- ACHE: Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural
- ACI: American Concrete Institute
- ACV: Análisis de Ciclo de Vida
- AFN: Agregado Fino Natural
- AFR: África
- AFR: Agregado Fino Reciclado
- AGN: Agregado Grueso Natural
- AGR: Agregado Grueso Reciclado
- ARCC: Autoridad para la Reconstrucción con Cambios
- BCRP: Banco Central de Reserva del Perú
- C&DW: Construction and Demolition Waste
- CalEEMod: California Emission Estimator Model
- CAPECO: Cámara Peruana de la Construcción
- CCAA: Comunidades Autónomas
- CFC: Clorofluorocarbonos
- CONAMA: Comisión Nacional del Ambiente
- DCB: Dichlorobenzene, Diclorobenceno
- EAP: Asia Este y Pacífico
- ECA: Asia Oeste y Central
- EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
- EPP: Equipos de Protección Personal
- EUROSTAT: Oficina Europea de Estadística
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- GERD: Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrisos
- GWP: Global Warming Potential
- HIC: Ingresos Altos
- INC: Índices de Nocividad de los Combustibles
- INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- ISC: Impuesto Selectivo al Consumo
- ISO: International Organization for Standardization
- ITZ: Interfacial Transition Zone
- LAC: América Latina y el Caribe
- LCIA: Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida
- LCIA: Life Cycle Impact Assessment
- LI: Ingresos bajos
- LMI: Ingresos bajos – medios
- MENA: Este Medio y Norte de África
- MINAM: Ministerio del Ambiente
- NTP: Normas Técnicas Peruanas
- OCDE: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
- OECD: Organización de Cooperación Económica y Desarrollo
- ONU: Organización de las Naciones Unidas
- PDF: Fracciones Potencialmente Desaparecidas
- PLANRES: Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos, Perú
- PM: Particulate Matter, Material Particulado
- PNIR: Plan Nacional de Investigación de Residuos, España
- PNIR: Plan Nacional Integrado de Residuos
- PNRCD: Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición
- PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú
- RCD: Residuos de Concreto y Demolición
- ReCiPe: Metodología de Evaluación de LCA, sus iniciales representan los contribuyentes: RIVM and Radboud University, CML, and PRé Consultants
- RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
- SAR: Asia Sur
- SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
- TSMA: Two-Stage Mixing Approach
- TSP: Partículas Suspendidas Totales
- UE: Unión Europea
- UMI: Ingresos Medios – Altos
- UNACEM: Unión Andina de Cementos
- UNE: Una Norma Española, Asociación Española de Normalización
- UNEP: United Nations Environment Programme
- USGS: United States Geological Service

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector de la construcción se ha venido recuperando de una inestabilidad económica en el rubro, luego de registrar una acumulación de doce años de crecimiento consecutivo hasta el 2014. El Producto Bruto Interno y la demanda interna del sector de la construcción han registrado su pico más alto en diciembre del 2017 con 287.4 puntos; mientras que, los meses de enero y febrero con 153.0 y 161.4 puntos, respectivamente, se situaron por encima de su media en los 5 últimos años (BCRPData, 2018).

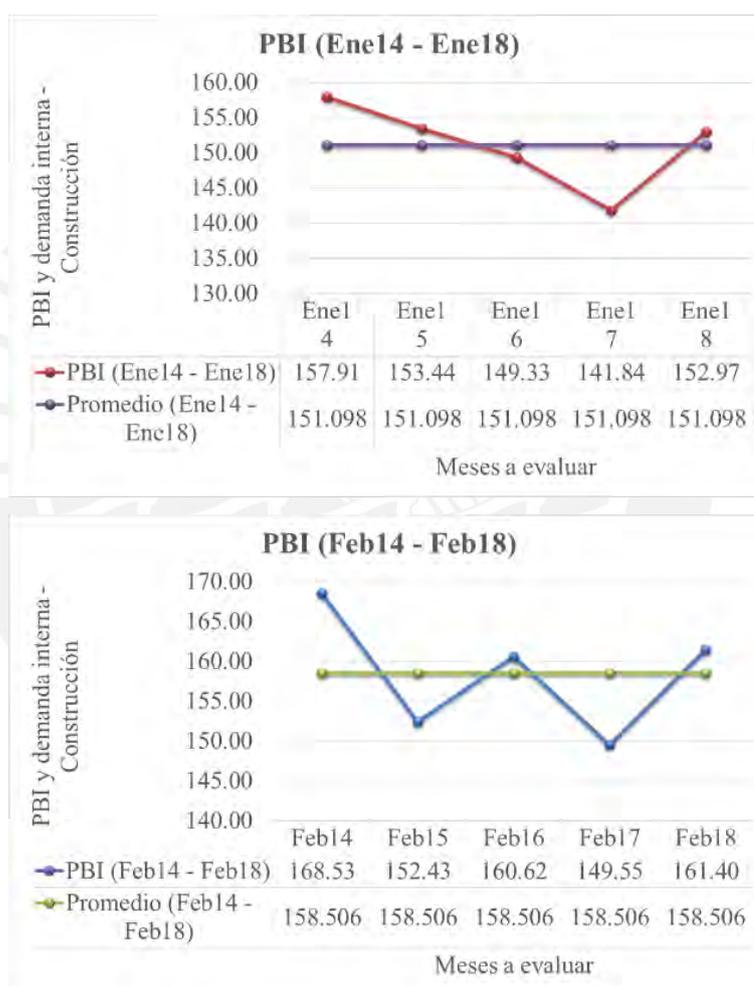


Figura 1: PBI del sector construcción de enero y febrero entre 2014 y 2018

Fuente: Adaptación del BCRP, 2018

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el sector construcción registró un crecimiento de 7.8% en enero, seguido del mayor incremento del ingreso promedio mensual de 5.1% consignado durante el mes de febrero del 2018. Esto se debió al mayor gasto en inversión en obras públicas (27.6%) y al mayor nivel de ejecución de obras de construcción tanto en el ámbito del Gobierno Local (47.1%)

como en el Gobierno Nacional (30.8%). Sin embargo, el dato más alarmante brindado por la misma fuente es el registro del mayor consumo interno de cemento en 6.6% (INEI, 2018), lo cual nos lleva a considerar el paralelismo del desarrollo en el sector. Es decir, la reciente recuperación en el sector construcción no solo es sinónimo de progreso sólido, sino también significa considerar los efectos colaterales como la generación de residuos y el agotamiento de recursos ocasionado por la producción y uso de los materiales utilizados.

La construcción, en la mayoría de los países del mundo incluido el Perú, tiene como material predominante al concreto armado, el cual está compuesto de acero y hormigón. Esta aceptación universal se debe a tres principales ventajas: disponibilidad de los elementos para su fabricación, bajo costo en comparación con otros materiales de construcción y a la facilidad de colocación del concreto en estado plástico en los encofrados de diferentes formas y tamaños (Otazzi, 2018). Por tanto, los impactos ambientales negativos generados por este sector debido a sus materiales, en su mayoría, dependerán de cualquiera de estos dos componentes del hormigón armado. En virtud de ello, se realizó un Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (LCIA en inglés) para cuantificar en porcentaje los impactos ambientales generados por ambos componentes del concreto armado (concreto y acero) durante las fases de su propia producción individual y en su uso en el material compuesto.

Tabla 1: Comparación de LCIA de un edificio de concreto y otro de acero.

| | Concreto | | Acero | |
|---|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| | Materiales de construcción (%) | Fase de uso (%) | Materiales de construcción (%) | Fase de uso (%) |
| Energía potencial de agotamiento (escape de combustible mineral) | 17 | 83 | 12 | 88 |
| Potencial de calentamiento global (emisiones GEI) | 20 | 80 | 12 | 88 |
| Impacto en el ambiente atmosférico (emisiones contaminantes totales) | 22 | 78 | 13 | 87 |
| Impacto en el ambiente urbano (emisiones contaminantes urbanas) | 13 | 87 | 6 | 94 |

Fuente: Adaptación de Zhang et al., 2007

Si bien, durante la fase de uso, el consumo de energía y las emisiones ambientales del acero son superiores a las del concreto, sucede todo lo contrario cuando se evalúan los materiales de construcción. En cada índice evaluado, la Tabla 1 muestra que el porcentaje contaminante debido a los insumos del edificio de concreto es mucho mayor que los de acero en 5, 8, 9 y 7%, respectivamente (Zhang et al., 2007). Por ello, se hace necesario enfocar los esfuerzos en los componentes más

numerosos en la mezcla de concreto, siendo estos los agregados (80% en peso) y el cemento (12% en peso). Se encontraron estadísticas inquietantes con respecto a estos componentes; en el año 2009, se necesitaron 3 mil millones de toneladas de cemento y 20 mil millones de toneladas de agregados para la producción de 25 mil millones de toneladas de concreto (WBCSD, 2009). Al año siguiente, alrededor de 47 a 59 mil millones de materiales fueron extraídos donde la grava y arena significaron la mayor parte oscilando entre 69 a 85% (Steinberger et al., 2010). Es decir, entre 37 a 46 mil millones representan la extracción de estos agregados a nivel mundial para diversos usos; cifra que, a su vez, es el máximo aumento por año entre todas las extracciones mineras (Krausmann et al., 2009). Para la construcción, resulta más útil entender esta explotación de materiales en términos de producción de cemento. Según la USGS (2013b), por cada tonelada de cemento, se necesitan entre 6 a 7 veces más toneladas de arena y grava. Por tanto, si al año 2012 se registró 3.7 mil millones de toneladas de cemento para la producción de concreto (USGS, 2013a), se puede estimar la extracción de agregados en 25.9 a 29.6 mil millones de toneladas. Como consecuencia de ello, los constantes incrementos en cifras de extracción de agregados se sitúan como uno de los problemas importantes debido a la depauperación de su fuente primordial para su producción, las canteras vírgenes. Estas fuentes no renovables forman parte de ecosistemas y al ser continuamente explotadas, se aproximarían a su agotamiento inminente, lo cual se entendería como considerables impactos ambientales negativos en las zonas aledañas.

El otro factor que se mencionó es la generación de residuos. Este sector económico es alto generador de desechos y, mundialmente, estos son catalogados como Residuos de Concreto y Demolición (RCD, C&DW en inglés). Hacia el año 2014, se generaron aproximadamente 860 millones de toneladas de residuos de C&D en la Unión Europea, lo que representa el 35% del total mundial (EUROSTAT, 2014). Aunque existan países en el mundo como Perú que aún no tengan un plan de gestión desarrollado para este tipo de desechos, las cifras permiten insertar una idea de reciclaje tal que se aproveche la alta tasa de generación y se eviten mayores impactos ambientales negativos generados por la deposición de estos en botaderos o rellenos sanitarios.

Según el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024 de Perú, se dice que, del total de la generación de residuos sólidos municipales, menos del 50% fueron transportados a rellenos sanitarios autorizados. Sin embargo, la cantidad restante no se dispuso de manera adecuada, lo cual sugiere la posible aplicación de

políticas especiales de reciclado en el país y conlleva un adecuado análisis cuantitativo para determinar qué parte de volumen de RCD podría utilizarse como árido reciclado en nuevas mezclas de concreto.

Si luego de la vida útil de un edificio se procede a demolerlo y se opta por el reciclaje, se puede afirmar que el 60% de residuos en 1 m³ de concreto es reutilizable tal y como se detalla en la Tabla 2; es decir, más de la mitad se podría aprovechar en diversas posibilidades de reuso, de acuerdo a sus propiedades. En ese sentido, el uso de concreto con porcentajes de agregado reciclado provenientes de RCD resulta conveniente por la cantidad recuperable y por la contribución a evitar el inminente agotamiento de las canteras vírgenes y la contaminación por la disposición final en vertederos.

Tabla 2: Uso de Residuos de Concreto y Demolición en 1 m³ de hormigón demolido

| DEMOLICIÓN DE EDIFICIO LUEGO DE SU TIEMPO DE VIDA | | |
|---|--|---|
| DECISIÓN DE RECICLAJE | VOLUMEN DE RESIDUOS GENERADOS (en 1 m ³) | VOLUMEN DE RESIDUOS PARA REÚSO (en 1 m ³) |
| Si se opta por reciclar | 0.4 m ³ de residuos | 0.6 m ³ de residuos |
| Si no se opta por reciclar | 1 m ³ de residuos | No se optó por reuso. |

Fuente: Adaptación de Nagataki et al., 2004

A nivel técnico – normativo, el *American Concrete Institute* (ACI) considera las causas mencionadas para brindar documentos que faciliten información sobre producción y consideraciones del concreto reciclado, mostrándolo como una salida eficiente al problema. Por ejemplo, el documento “555R – 01 Removal and Reuse of Hardened Concrete” se expone en estándares de calidad, efectos en las propiedades mecánicas del concreto y detalla puntos sobre proporciones de mezcla. Si bien, el proceso de producción de concreto con agregado reciclado es similar al convencional, se deben tener en cuenta algunas consideraciones especiales. Por ejemplo, para el caso de la hipotética solución sostenible es muy importante la separación de partículas menores a 2 mm y la hidratación de agregados reciclados para compensar la alta absorción de los mismos (ACI: Removal and Reuse of Hardened Concrete, 2001). Cuando el concreto demolido es triturado, una cierta cantidad de mortero y pasta de cemento del concreto original permanece adherida a las partículas de piedra en el agregado reciclado (Hansen, 1992; Poon y Lam, 2008; Sanchez de Juan y Gutierrez, 2004). Debido a ello, mientras más porcentaje de agregado reciclado se tenga en la mezcla, se presentará una efectiva zona de transición interfacial (ITZ en inglés) mucho más densa que la pasta antigua,

ocasionando problemas de trabajabilidad y un concreto más débil (Etxeberria et al 2007). Por ello, una solución válida es limitar estos porcentajes de agregado reciclado en mezcla y esto variará, de acuerdo a las características propias del país en el que se desarrolla. Además, se buscará optimizar las características mecánicas obtenidas del hormigón reciclado mediante la implementación de técnicas experimentales como es el caso de TSMA (*Two-Stage Mixing Approach* o Enfoque de mezclado en dos etapas).

Una vez realizada la validez de los aspectos técnicos mediante diversa literatura y comprobarse que la implementación de concreto con porcentajes de agregado reciclado resulta posible en un contexto peruano, se procede con el núcleo de este trabajo de investigación. Es decir, se conduce con la evaluación ambiental comparativa entre dos materiales de construcción con usos similares: una mezcla de concreto convencional y su alternativa de concreto reciclado. Por consiguiente, se plantea brindar más de una respuesta a la posibilidad de uso de esta solución sostenible al mostrarlo como variante por sus condiciones técnicas similares y al demostrarlo como ventajoso, desde el punto de vista ambiental.

El desarrollo sostenible conlleva al perfecto balance entre lo económico, social y ambiental; logrando nivel de vida y desarrollo económico, así como conciencia ambiental y producción ecológica. En palabras sencillas, el desarrollo sostenible busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones (Brundtland, 1987). Esta definición fue recogida en 1992 cuando tuvo lugar la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo” o “Cumbre de la Tierra” en Brasil donde se marcó un hito al reconocer internacionalmente la interdependencia de los aspectos social, económico y medioambiental (Naciones Unidas, 2002). Por su parte, en 1999, durante el Foro Económico Mundial, se propuso la idea de crear un impacto global mediante la unión con líderes empresariales por parte del Secretario General de las Naciones Unidas, Kofi Annan (Naciones Unidas, s.f.). Entonces, al año siguiente, en la sede de las Naciones Unidas de Nueva York, se concretó el llamado inicial a las empresas para alinear sus operaciones y estrategias con 10 principios universales sobre derechos humanos, normas laborales, medio ambiente y lucha contra la corrupción (UN, 2018). A modo de complemento, otro hecho importante en la búsqueda de la sostenibilidad empresarial ocurrió en julio del 2001. En la Comisión de las Comunidades Europeas, se publicó el Libro Verde cuyo objetivo principal fue fomentar la responsabilidad social de las empresas, no solo en Europa sino también a nivel internacional (Comisión de

las Comunidades Europeas, 2001). De ese modo, la sostenibilidad empezó a adquirir importancia para las compañías, tal que todos los Sistemas Integrados de Gestión empezaron a ser preparados para conseguir alinearse a estos principios planteados.

Con el pasar del tiempo, los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) propuestos en el año 2000 entraron en vigencia; tal que, en el año 2015, se acordó la nueva agenda universal para los próximos 15 años. Las Naciones Unidas formularon los 17 nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que conllevaban 169 metas aplicables internacionalmente. La publicación de la ONU (2018) considera estos novedosos propósitos de “carácter integrado e indivisible, de alcance mundial y de aplicación universal”. A su vez, La Organización de las Naciones Unidas, en el mismo reporte, aseguró que esta Agenda 2030 fue formulada como “un plan de acción para erradicar la pobreza, promover la prosperidad y el bienestar para todos, proteger el medio ambiente y hacer frente al cambio climático a nivel mundial” (2018).

En ese sentido, con esta nueva promulgación se brindó la oportunidad a los gobiernos de trazar un “futuro sostenible” (Naciones Unidas, 2015, pp.34) incorporando estas aspiraciones y recogiendo las diferentes realidades de cada país. De acuerdo a Stig Irving Olsen, la ingeniería también protagoniza la búsqueda de equilibrio sustentable a través del desarrollo de diferentes métodos que abarquen una perspectiva holística, tanto a nivel educacional como a escala profesional. En otros términos, la ingeniería sostenible será considerada como “buena ingeniería” cuando finalmente consiga implementar aquellas metodologías como el análisis del ciclo de vida de los productos en la educación de los futuros ingenieros (Olsen, 2018, pp. 627). Según el reporte del 2015 del *Queen Elizabeth Prize for Engineering*, se realizó una encuesta en relación a la labor realizada por los ingenieros como “llave de progreso e innovación”. De acuerdo a las respuestas, el 57% consideró que los ingenieros ocupan un rol vital en la solución de los retos de la sostenibilidad que la humanidad enfrentará en los años entrantes (2015). En consecuencia, no considerar una adecuada evaluación ambiental sería ir en contra de los paradigmas actuales de la sociedad y como ingenieros, se deben tomar en cuenta para la toma de decisiones.

Precisamente, profundamente comprometido con la búsqueda de la sostenibilidad, se aplicará la metodología mencionada líneas arriba, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los productos. Esta herramienta de gestión ambiental permite analizar un producto o sistema con la finalidad de evaluar los impactos ambientales generados durante todo su ciclo de vida; es decir, desde la obtención de la materia prima hasta

su disposición final (Klöpffer, 1997). Este mecanismo de evaluación ambiental se rige por las ISO 14040 y 14044, que permiten insertar una división del proceso para su adecuado orden en: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario de ciclo de vida, evaluación de impacto de ciclo de vida e interpretación de resultados. De ese modo, se estructurará de forma adecuada, la comparación entre los 3 casos de estudio propuestos de concreto reciclado y sus análogos convencionales siguiendo la metodología del ACV.

A su vez, se modelará la información haciendo uso del software SimaPro para recolectar, analizar y monitorear el desempeño y la sostenibilidad del sistema elegido mediante gráficos que permiten esclarecer la interpretación de resultados (SimaPro, 2018). De este modo, se podrá corroborar si la aplicación de concreto reciclado en el Perú resulta factible en la parte técnica y favorable ambientalmente, generando menores emisiones de GEI e impactos ambientales que el concreto convencional, incluso para fines estructurales, con porcentajes de agregado reciclado menores a 20%.

Si bien, la aplicación del concreto reciclado resulta ambiciosa y más aún para países como Perú donde apenas se recicla el 14% de RCD (MINAM, 2014), es parte de este trabajo de investigación determinar su posible implicancia como solución sostenible. Además, es recalable que el contexto nacional es bastante desfavorable en cuestión de promulgaciones, pues apenas se tiene conocimiento de la NTP 400.050.2014 y la N° 003-2013-VIVIENDA. Sin embargo, se espera como idea principal en esta tesis de investigación, que los resultados de la evaluación ambiental apoyados en la legislación y en la validación técnica resulten positivos para la situación nacional. De esta forma, se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos y a resaltar las conclusiones que puedan validar la hipótesis sobre el uso de distintas alternativas de concreto reciclado en Perú. Asimismo, se podrán proponer medidas de reducción de emisiones para cada caso de estudio y se plantearán opciones de mejora con la intención de crear precedentes para la aplicación de políticas de reciclado futuras y desarrollo tecnológico en el sector nacional de la construcción.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generación y Tratamiento de Residuos Sólidos

La economía es uno de los puntos clave del desarrollo sostenible que tiene injerencia en los ámbitos social y ambiental. Tal es así que cualquier variación en el sector económico tendrá efecto directo en la calidad de vida de la sociedad y en el cuidado y concientización del medio ambiente. Debido a ello, hoy en día, el incremento de la población, el auge de la economía, la rápida urbanización y el aumento en el nivel de vida de la comunidad han venido acelerando cada vez más la generación de residuos sólidos municipales en los países en vías de desarrollo (Minghua et al., 2009) como Perú. Por tanto, resultará importante clasificarlos de acuerdo a sus fuentes generadoras para darles tratamiento apropiado en base a su peligrosidad (residuos municipales y no municipales). La Tabla 3 ejemplifica dicho criterio de clasificación y sigue los lineamientos económicos generadores de residuos; es decir, los diferentes sectores de producción, a nivel mundial. Por consiguiente, el sector agropecuario puede relacionarse con la fuente de agricultura, el sector pesca con la de industrial y los sectores de minería e hidrocarburos, manufactura, electricidad y agua con las fuentes de procesos, institucional e industrial. Por su parte, el sector productivo de la construcción cuenta con fuentes de construcción y demolición, institucional y residencial; el sector comercio con comercial e industrial y, por último, el sector de servicios con las fuentes de institucional, servicios municipales y residuos médicos.

Tabla 3: Clasificación, generadores comunes y tipos de Residuos Sólidos

| TIPOS DE RESIDUOS | Fuentes | Generadores comunes de residuos | Tipos de Residuos Sólidos |
|-----------------------------|----------------------|--|--|
| RESIDUOS MUNICIPALES | Residencial | Viviendas unifamiliares y multifamiliares | Desperdicios de alimentos, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, desechos de jardín, madera, vidrio, metales, cenizas, desechos especiales (artículos voluminosos, productos electrónicos de consumo, bienes, baterías, aceite, llantas) y desechos peligrosos de hogares (pinturas, aerosoles, tanques de gas, desechos que contienen mercurio, aceite de motor, agentes de limpieza), desechos electrónicos (computadoras, teléfonos, televisores). |
| | Industrial | Fabricación ligera y pesada. Sitios de construcción, plantas eléctricas y químicas | Desechos de limpieza, empaque, comida. Algunos residuos de construcción y demolición, desechos peligrosos, cenizas, especiales. |
| | Comercial | Tiendas, hoteles, restaurantes, tiendas, edificios de oficina | Papel, cartón, plásticos, madera, desechos alimenticios, vidrio, metales, desechos especiales, desechos peligrosos, desechos electrónicos. |
| | Institucional | Escuelas, hospitales (sin residuos estrictamente médicos), prisiones, edificios del gobierno y aeropuertos | |

| | | | |
|--|----------------------------------|---|---|
| | Construcción y Demolición | Nuevas construcciones, reparación de carreteras, sitios de renovación, demoliciones de edificios, concreteras | Madera, acero, hormigón, tierra, ladrillos, azulejos. Residuos de concreto premezclado y demolición. |
| | Servicios Municipales | Limpieza de calles, parques, paisajes, playas, áreas recreativas, plantas de tratamiento de aguas residuales | Basura de la calle; paisaje y árbol. Desechos generales de parques, playas y otras áreas recreativas, lodo. |
| RESIDUOS NO MUNICIPALES - NO SUPERVISADOS | Proceso | Fabricación pesada y liviana, refinarias, plantas químicas, plantas de energía, mineral, extracción y procesamiento | Desperdicios de procesos industriales, materiales de desecho, productos no especificados, escoria, relaves. |
| | Residuos Médicos | Hospitales, casas de enfermería, clínicas | Desechos infecciosos (vendajes, guantes, cultivos, torundas, sangre y fluidos corporales), desechos peligrosos (objetos cortopunzantes, instrumentos, productos químicos), desechos radiactivos de terapias contra el cáncer y farmacéuticos. |
| | Agricultura | Cultivos, huertos, viñedos, lecherías, granjas | Residuos de alimentos estropeados, desechos agrícolas (cáscaras de arroz, tallos de algodón, cáscaras de coco, desechos de café), desechos peligrosos (pesticidas) |

Fuente: Adaptación de What a Waste, 1999

Como fue expuesto, existe gran diversidad en la generación de residuos sólidos; en consecuencia, cada procedimiento por el que atraviesen estos desechos debería contribuir a formar un sistema integral adecuado que conlleve procedimientos de separación, colección, tratamiento, disposición final y reciclaje (Figura 2).

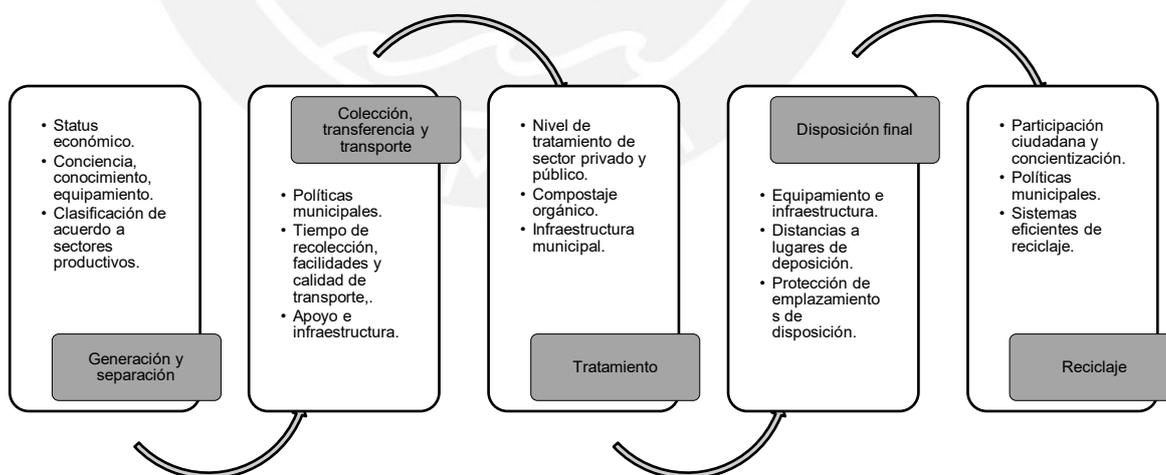


Figura 2: Factores que influyen los elementos del sistema de gestión integral de residuos sólidos.

Fuente: Adaptación de Guerrero et al., 2013

Además de los elementos del sistema de gestión integral de residuos sólidos, resulta inevitable dejar de lado dos factores determinantes para la sostenibilidad: los actores (stakeholders) y los aspectos (Van de Klundert et al., 2001). Las autoridades locales y municipales, los sectores formales e informales, las agencias donantes, los servicios y los usuarios son los personajes directos cuya actividad incide en la gestión de los residuos. Por tanto, se debe considerar una adecuada participación de cada uno de ellos tal que se aseguren roles importantes y se beneficie la política ambiental. Por su parte, los aspectos que se deben tener en cuenta son temas en legislación, económicos, socio-culturales, institucionales, técnicos y ambientales para conseguir unificar un plan integral que asegure la mayor reducción de impactos negativos. Además, Klundert estableció 4 principios básicos para conseguir el desarrollo de un adecuado sistema integral de gestión de residuos. La equidad adjudicando responsabilidad equitativa a todos los stakeholders, la efectividad para una disposición final segura, la eficiencia para maximizar los beneficios y minimizar los costos, y la sostenibilidad para mantener los aspectos como criterios de evaluación a lo largo del tiempo sin afectar los recursos, incluso optimizándolos (2001, pp. 11). En tal modo, el principio jerárquico de las 4R's (Figura 3) adquiere gran importancia pues proyecta autónoma decisión en las entidades interesadas en la gestión integral siguiendo los lineamientos expuestos por Klundert.

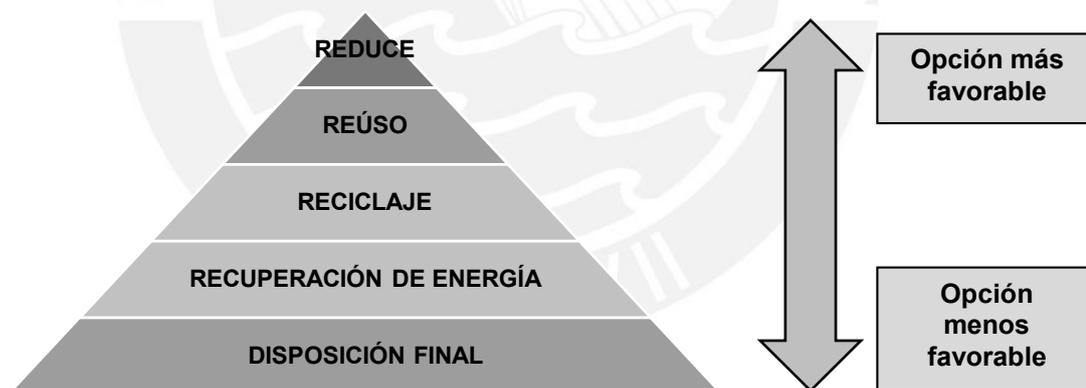


Figura 3: Principio de jerarquía de 4R's de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Fuente: Adaptación de UNEP, 2005 & EPA, 2006.

Antes de la toma de decisiones pertinente a cargo de la entidad correspondiente, resulta conveniente definir en breves palabras cada uno de los conceptos jerárquicos, en base a lo expuesto por la UNEP (2005) y la EPA (2006):

- **Reducción:** Introducción de medidas de carácter económico y logístico para evitar la generación de residuos y centrarlo como principal ideal de política ambiental.

- **Reutilización:** Operación designada a utilizar reiteradamente el objeto para el mismo uso inicial sin consumir nuevas materias primas.
- **Reciclaje:** Valorización y transformación de residuos en nuevos productos para los mismos usos iniciales u otras finalidades.
- **Recuperación de energía:** Aprovechamiento energético de los residuos para fines útiles.
- **Disposición final:** Eliminación mediante vertido legal o incineración sin recuperación energética.

Cada uno de los pasos de esta pirámide de conveniencia (Fig. 3), se ordena de forma inversa donde la reducción es la opción más favorable y la disposición final se ubica como la menos conveniente. Por consiguiente, tal cual se mencionó líneas antes, los residuos sólidos se podrán clasificar de acuerdo a los sectores productivos y al ser ordenados por su peligrosidad, se podrá determinar qué paso jerárquico es el más indicado para cada tipo de remanente generado. En ese marco, si se trata de residuos peligrosos no tendrán el mismo desenlace que los residuos no peligrosos o municipales donde podría trabajarse una alternativa de reciclaje. En definitiva, los 3 conceptos jerárquicos más pertinentes son los que recogen los 4 principios básicos de Klauvert; es decir, siempre será mejor reciclar, reusar o reducir la generación de determinado tipo de residuos que la disposición final mediante la eliminación. En Perú, de acuerdo a la legislación vigente, las municipalidades provinciales son las que regulan y controlan el respectivo procedimiento de disposición final. Las estadísticas llevan a concluir que del total de generación de residuos sólidos municipales al 2014 (7.5 toneladas /año), 3.31 toneladas son dispuestas a un relleno sanitario legalmente válido. No obstante, el porcentaje remanente; es decir, más del 50% se dispone inadecuadamente en el medio ambiente (MINAM, 2015). Esta circunstancia lleva a enfocar de una forma distinta el procedimiento posterior al tratamiento de los residuos sólidos; de modo que, cuando hay más de una opción posible con viabilidad en lo técnico y económico, puede implementarse el principio integral de jerarquía. Este fundamento de la gestión integral de residuos sólidos ayuda a los organismos a ser coherentes dentro del desarrollo legislativo para poder brindar más de una posibilidad. De acuerdo a la Directiva 98/2008 sobre los residuos de la Unión Europea, los estados deben adoptar medidas para incentivar las opciones que proporcionen el mejor resultado medioambiental global (Bustillo, 2010, p.34-42).

En este caso particular, para fines de esta investigación será de utilidad centrarse en los residuos ocasionados por el sector productivo de la construcción o residuos de

concreto y demolición (RCD), donde la principal arma de gestión integral es la de reciclar, en lugar de eliminar o verter. Perú aún tiene largo tramo por mejorar en estos temas, debido a que recientemente en el año 2013 se inició con la normativa en este tipo de residuos y es un punto a mejorar en el PLANRES 2016-2024 (MINAM, 2013). Para beneficio local, se realizó un acuerdo de cooperación y memorándum de entendimiento con la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) donde se propuso la inclusión de Perú y el trabajo en conjunto con una serie de implementaciones, iniciando con una evaluación de gestión ambiental del contexto nacional, durante el año 2015. En este documento, se observó dentro de las recomendaciones que aún se debe mejorar la trazabilidad y la información sobre la generación de estos residuos (Evaluación de Desempeño Ambiental del Perú, 2016). Es decir, aún hay déficit de notificación y gestión de RCD; no obstante, su debido estudio será de vital importancia para poner en contexto la propuesta de uso de concreto con diversos porcentajes de agregado reciclado.

2.1.1. Residuos de Concreto y Demolición (RCD)

Los Residuos de Concreto y Demolición (RCD o “C&D” por sus siglas en inglés), se definen de forma específica como aquellos “desperdicios que surgen de las actividades de construcción, renovación y demolición, incluida la excavación o formación de terrenos, construcción civil y de edificios, limpieza de sitios, actividades de demolición, obras viales y renovación de edificios” (Shen et al., 2004). Esta serie de actividades relacionadas han originado un gran problema ambiental que se ha ido agravando por el creciente volumen de generación de residuos y debido al escaso tratamiento que aún resulta muy complicado para ciertas realidades nacionales. En general, los impactos ambientales provocados están relacionados a la contaminación de suelos y acuíferos a razón de los vertederos incontrolados, el deterioro paisajístico y a la eliminación de estos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables ni como energía. Entre otros, se tienen emisiones a la atmósfera, generación de ruido y polvo en trabajos de excavación y obras, y la ocupación de terrenos por préstamos e instalaciones auxiliares (Bustillo, 2010, p.48).

Sin embargo, estos generadores de impactos ambientales no siempre han tenido la misma composición. Con el pasar de los años, los materiales de construcción utilizados para el desarrollo de diferentes fortalezas o monumentos han ido cambiando. Durante la época precolombina, en Perú se dieron a conocer muchos períodos como el Lítico, Arcaico, Formativo con sus posteriores desarrollos regionales y Tardíos, donde los materiales de construcción fundamentales fueron

pedra, barro y, posteriormente, adobe (Bouso, s.f., p.03). Tras la llegada del Imperio Incaico, según L. Alcayhuamán, se pusieron en marcha técnicas para el transporte de piedra de gran tamaño para monumentos, se usó adobe y paja para las casas y se implementaron series de troncos con estribos de mampostería para los puentes (2007, p. 08). En la época colonial, se reemplazaron algunas de las técnicas y monumentos de piedra por nuevas construcciones donde lo novedoso fue el uso del adobe, el refuerzo de quincha, la implementación de ladrillos y tejas y la carpintería de madera especializada (García Bryce, 2004). Quiero decir, los materiales de construcción se han ido industrializando, han llegado a tener mayor grado de especialización y cantidad de recursos debido a sus nuevos procesos de producción. Con el pasar del tiempo y la llegada del siglo XX, el petróleo empezó a tomar la mayoría de los sectores energéticos y la industria de la construcción no fue la excepción. La generación de residuos creció de forma alarmante, así como la inversión en obras, puesto que los indicadores de calidad requerían apariciones masivas de componentes, materiales novedosos y nuevas prácticas en pro de ello.

Cuchí y Sagrera, en el contexto de España, resume los impactos ambientales debido a la alta tasa de generación de RCD en 4 pilares:

- (a) Vertido incontrolado de estos en zonas de valor ecológico como bosques o reservas acuíferas.
- (b) Vertido incontrolado e inadecuada gestión en instalaciones lo que origina deposición de lixiviados, contaminación de suelo y niveles freáticos.
- (c) Consumo energético y emisiones de CO₂ debido al transporte en vertederos.
- (d) Extracción y fabricación de nuevas materias primas; por tanto, bajo nivel de reciclaje de residuos de construcción (2007).

Sin lugar a dudas, el incremento de polución y los problemas citados plantearían la hipótesis de aplicar conceptos de economía circular para disminuir la afección al medioambiente. De esa manera, se incidiría en la mejora de esta industria y en la gestión de sus residuos al buscar nuevas técnicas de reaprovechamiento; es decir, en volver a obtener un beneficio de un bien, artículo, elemento o parte del mismo que constituye un residuo sólido (López et al., 2016). Por tanto, siguiendo el principio jerárquico y la historia de la construcción, la reducción, reutilización y reciclaje serían claves; a pesar que siga siendo insuficiente (Euformación Consultores, 2012, p. 07). Para conseguirlo, se deberán diferenciar las fuentes de generación de los RCD de acuerdo a sus elementos principales (Tabla 4), punto importante debido a las

desiguales operaciones, cantidades globales producidas, participantes, sistemas de gestión, etc. (Mañá et al., 2000a).

Tabla 4: Elementos principales en Residuos de Construcción y Demolición

| RESIDUOS DE: | OBJETO | ELEMENTOS PRINCIPALES | CONSIDERACIONES |
|--|---|--|---|
| D E M O L I C I O N | Viviendas | Antiguas: marroquinería, ladrillos, madera, tejas, yeso. | Los materiales dependen de la edad del edificio y del uso concreto del mismo, en el caso de los de servicio. |
| | | Recientes: ladrillos, hormigón, hierro, acero, metales y plásticos. | |
| | Otros edificios | Industriales: hormigón, acero, ladrillo, mampostería. | |
| | | Servicios: hormigón, ladrillo, mampostería, hierro, madera | |
| Obras públicas | Mampostería, hierro, acero, hormigón, armado. | Los materiales dependen mucho de la edad y del tipo de infraestructura a demoler. No es una actividad frecuente. | |
| C O N S T R U C I O N | Edificación y obras públicas | Hormigón, hierro, acero, ladrillos, bloques, tejas, materiales cerámicos, plásticos, materiales no férreos | Normalmente se reutilizan en gran parte. |
| | Reparación y mantenimiento | Suelo, roca, hormigón, productos bituminosos | Originados básicamente por recortes, materiales rechazados por su inadecuada calidad y roturas por deficiente manipulación. |
| | Reconstrucción y rehabilitación | Viviendas: cal, yeso, madera, tejas, materiales cerámicos, pavimentos, ladrillo. | Generación de residuos poco significativos en el caso de edificación |
| Otros: hormigón, acero, mampostería, ladrillo, yeso, cal, madera. | | | |

Fuente: "Gestión de RCD y su repercusión en el desarrollo sostenible", adaptación de L.M. Aneiros, 2008, pp. 48 – 60

Por otro parte, Bustillos, en el año 2010, realizó un Manual de RCD y áridos reciclados donde expuso de otra forma los elementos principales observados en las diferentes actividades relacionadas al sector generador y ofreció algunas alternativas

de tratamiento resumidas en la Figura 4. Entre ellos, se apreciaron la tierra superficial y de excavación, hormigón y obra de fábrica, asfalto y betún, madera, metales, plásticos, elementos arquitectónicos, residuos especiales.

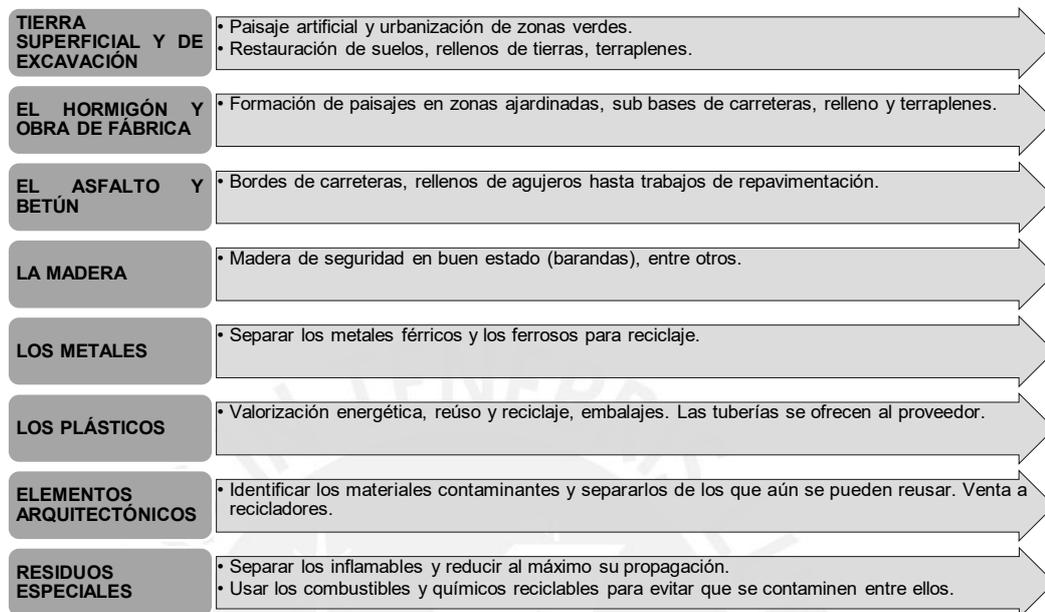


Figura 4: Elementos principales generados en Residuos de Concreto y Demolición

Fuente: Adaptación de Bustillos de Manual de RCD y áridos reciclados, 2010, pp. 84 – 94

Por otro lado, entre otros autores, B.E. Flynn (1998) expuso la falsa creencia de que los RCD no generaban tantos efectos contaminantes debido a su baja peligrosidad en la composición de sus principales elementos. Sin embargo, la realidad es totalmente contraria, según Roussat et al. (2008), se ha encontrado presencia de asbestos en tejas, baldosas y cemento; mercurio en lámparas fluorescentes; arsénico, cromo, pentaclorofenol, cresota y lindano en maderas tratadas. A su vez, el mismo menciona plomo en pinturas y tubos con base en plomo; Hidrocarburos aromáticos policíclicos en revestimientos bituminosos; plomo y cadmio en baterías de señales de emergencia; PCB (policlorobifenilos) en juntas y selladores; entre otros (Roussat et al., 2008).

Al año siguiente, durante el II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos desarrollado en Barranquilla, la investigación de Quaranta et al. (2009) confirmó la presencia de agentes peligrosos (Tabla 5). Los principales contaminantes de los RCD encontrados fueron: aluminio, arsénico, asbestos, asfalto, BPC (bifenilos policlorados) y BPB (bifenilos polibromados), cadmio, CFC (clorofluorocarbonos), creosota, fibras minerales, mercurio y plomo.

Tabla 5: Componentes peligrosos en RCD por elementos y sus respectivos riesgos

| <u>ELEMENTO EN RCD</u> | <u>CONTAMINANTE PELIGROSO</u> | <u>RIESGO</u> |
|--|--|--|
| Aberturas y cerramientos de construcción | ALUMINIO | Por exposición al polvo de aluminio: enfermedades respiratorias y renales (intoxicación). |
| Maderas antiguamente tratadas con preservadores que contienen Arseniato de Cobre Cromatado (ACC) | ARSÉNICO | Cáncer pulmonar por inhalación y cáncer de piel por ingestión |
| Materiales aislantes de tuberías, paredes y techos (tejas), otros resistentes al fuego, losetas, recubrimientos vinílicos para pisos, aislantes para estufas y hornos. | ASBESTO | Por inhalación: retención de fibras en pulmón, instaladas en garganta o derivadas al aparato digestivo (cáncer pulmonar e intestinal). |
| Desmantelamiento de techos, recubrimientos protectores de paneles murales, tuberías de instalaciones eléctricas, pavimentos | ASFALTO | Por contacto en trabajos en caliente: problemas respiratorios por contacto prolongado y cáncer pulmonar. |
| Aislantes y enfriamientos de componentes eléctricos, transformadores y capacitores, plastificantes, tintes, colorantes, adhesivos y protectores de maderas | BPC (BIFENILOS POLICLORADOS) Y BPB (BIFENILOS POLIBROMADOS) | Alta toxicidad, algunos reaccionan con luz ultravioleta realzando su toxicidad |
| Galvanización de productos metálicos, pigmentos en pinturas y plásticos, baterías recargables, barnices, pinturas, aleaciones y soldaduras especiales | CADMIO | Alta toxicidad desencadenando problemas pulmonares, cardíacos, renales y hepáticos |
| Agentes de enfriamiento, paneles y paredes de espumas aislantes | CFC (CLOROFLUORO-CARBONOS) | Exposición prolongada: situaciones aisladas de depresión del sistema nervioso, palpitaciones y afecciones a embarazos. Afección ambiental: Deterioro de capa de ozono |
| Conservantes de madera, postes de alumbrado | CREOSOTA | Por contacto directo (estado líquido o gaseoso): quemaduras progresivas, ulceración de piel, lesiones oculares y efectos sistemáticos agudos (dolores de cabeza, vómitos, dificultades respiratorias). |
| Fibras de vidrio, lana de vidrio en drywall, lana de roca, aislantes térmicos en edificios. | FIBRAS MINERALES | Exposición de fibras sueltas con piel o inhalación: irritación o comezón en ojos y piel, dificultades respiratorias. |

| | (APARTE DEL ASBESTO) | |
|---|----------------------|--|
| Pinturas como agentes antimoho, lámparas fluorescentes, detectores de humo, sistemas de iluminación de emergencia, barómetros, termostatos y termómetros, tubos de rayo catódicos, etc. | MERCURIO | Metal nocivo y composición fatal para cualquier forma de vida. Afección ambiental: como metilato de mercurio a los peces y afección al humano por ingesta de ellos. |
| Pinturas de plomo en edificios antiguos luego de su demolición, escombros, descartes de cañerías, tubos y uniones. | PLOMO | Se acumula en los huesos y, por su nivel de toxicidad, la EPA lo reguló. Afección ambiental: luego de demoliciones, los lixiviados de escombros contaminan potencialmente el suelo y el agua subterránea. |

Fuente: "Uso de residuos de Construcción y Demolición cuando contienen sustancias peligrosas", adaptación de Quaranta, N, Caligaris, M., López, H., Unsen, M., 2009, pp. 5 – 8

De este modo, se reafirma la diversidad de concepción de los RCD y la necesidad latente de una adecuada gestión de acuerdo a los diferentes elementos apreciados y a su composición química. Todo ello dará lugar al correcto reaprovechamiento siguiendo los preceptos jerárquicos y la normativa expuesta. La gestión de RCD es muy importante, hoy en día, y para conseguir demostrar la hipótesis de esta investigación, su estudio será crucial.

2.1.1.1. Gestión de RCD

Hoy en día, los residuos de construcción y demolición se han convertido en todo un reto debido a su generación sin control alguno y a la deficiente rigurosidad en los trabajos de monitoreo. Entre tantos problemas, se ubican tanto la falta de compromiso de parte de cada uno los *stakeholders* envueltos en todo el ciclo de vida de los RCD como la insuficiente información y estadísticas reales que reflejen datos confiables sobre los cuales se podría trabajar. Por ello, se hacen necesarios nuevas soluciones, instrumentos y objetivos que aseguren una adecuada gestión (Gálvez-Martos et al., 2018, p. 167) aplicable a las diferentes realidades nacionales.

La construcción es un sector económico cuyos productos finales conllevan singularidades; es decir, no se asemeja a las industrias donde sus entregables guardan las mismas particularidades y podría considerarse un solo plan aplicable para todo el sector. Por tanto, se deberían considerar tres peculiaridades propuestas

por el libro Gestión de RCD 2º Edición antes de decidir por algún mecanismo de gestión (Euformación Consultores S.L, 2012). Así, luego de explicado esto, se podría dar inicio al paso elegido dentro del principio jerárquico:

En primera instancia, las cantidades y tipos de materiales varían de acuerdo al alcance del proyecto pudiendo considerar; por ejemplo, aditivos, curado o tratamientos de concreto de composiciones diferentes. Por tanto, se deberá hacer un nuevo plan de gestión y calidad ambiental por proyecto que incluya la planificación de los materiales exactos a usar durante toda la construcción. También, se debe prever la gestión adecuada de RCD generados in situ; de tal forma que, las compras no varíen en demasía con respecto a la cantidad de material, inicialmente planificado.

En segundo lugar, el ciclo de vida de los productos utilizados en el sector construcción es muy largo, tal que, el fin de vida útil tiene un horizonte, en ocasiones, mayor a 50 años. Por tanto, las medidas preventivas que se condicionen en el plan de gestión y calidad ambiental serán para los residuos generados luego de su vida útil; es decir, para la demolición a futuro.

Finalmente, la incertidumbre que generan las medidas preventivas es bastante amplia. Es decir, prever la generación de residuos en más de 50 años, aproximadamente, es complicado para los actores. En ese sentido, se hace necesaria la participación del sector público pues el plan de gestión de RCD de obra deberá regir el Plan nacional, mediante el cual se podrá definir el tratamiento de los residuos que escapen de la planificación.

Como se mencionó, la base fundamental en la gestión de residuos sólidos marca el estricto uso del principio jerárquico. Este sigue la secuencia ordenada y lógica de modalidades de gestión que van desde reducción pasando por reutilización, reciclaje y recuperación hasta disposición final, de mayor a menor calidad ecológica, donde este último resulta menos conveniente. Sin embargo, de las 5 opciones que brinda esta pirámide, se deben identificar las prioridades que existen para la gestión de este tipo de residuos generados por el sector productivo de la construcción.

Tal cual se definió anteriormente, el mejor residuo es el que no se genera debido a que al minimizar ello se reduce la contaminación ambiental; de eso se trata la prevención o la reducción. Un plan de gestión de RCD enfocado en esta fase debe centrarse en dar medidas que consigan reducir su emisión tanto de forma cuantitativa (disminución cuantitativa de RCD) como cualitativa (reducción de cantidad de productos peligrosos presentes en RCD) (Management C&DW, Comisión Europea, 2000). Además, se debe tener en cuenta la participación y la forma en que se logran

ambas disminuciones; por tanto, los actores o *stakeholders* tendrán gran relevancia en esta prioridad. Por ejemplo, para lo cuantitativo, los ingenieros, arquitectos, contratistas, etc., deberían elegir que la demolición futura sea solo para generar los RCD necesarios que aseguren la reutilización total. De forma análoga, en cuanto a términos cualitativos, lo que se debe hacer es limitar el uso de sustancias peligrosas en nuevos proyectos, tal que los fabricantes decidan eliminar dichos compuestos en sus ciclos productivos (Bustillo, 2010, p. 191). Se puede indicar que este paso es el planteado por todos los organismos encargados de la gestión de este tipo de residuos pues, de esa forma se pueden frenar, mediante la aplicación de leyes y compromisos, a los principales generadores en el primer paso de producción. Ríó Merino, M. afirma que el principio de prevención es también llamado el “principio del que contamina paga y el principio de cooperación” planteándose como meta final el establecimiento de las bases para la efectividad de la prevención y la adecuada valorización (2012).

Por ende, bajo este precepto, es importante detallar precauciones del epígrafe 7.2 por el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015 (II PNRCD), documento vigente de España y adaptadas para un contexto generalizado:

Medidas de prevención para promotores de obras y proyectistas:

- Desarrollo de herramientas para la cuantificación y caracterización de RCD en obras.
- Creación de mecanismos para la casación de ofertas y demandas de residuos y/o materiales reutilizables, como bolsas de excedentes de tierras.
- Elaboración de guías prácticas sobre prevención de RCD en obras.
- Desarrollo de tecnologías específicas para la clasificación de RCD en obra, en particular en la elaboración de inventarios de residuos peligrosos en obras de demolición, reparación o reforma (para su retirada selectiva previamente a la ejecución de la demolición).
- Formación de expertos en RCD para apoyo a la fase de proyecto, a la dirección facultativa de obra y a la fase de ejecución de obra.
- Desarrollo de herramientas en el proyecto, dirección y ejecución de obra, en relación con aspectos de RCD.
- Adopción, por parte de los promotores de obras, de planes de prevención de RCD en su ámbito de actuación, desde la óptica del conjunto de su actividad y no solamente para cada obra concreta en la que participen.

Medidas de prevención para constructores:

- Incorporar a las herramientas de planificación de obras los aspectos de RCD.

- Desarrollar tecnologías y prever la separación por flujos de materiales reciclables o valorizables en obra.
- Aplicar herramientas para una gestión correcta de compras y almacenes.
- Adopción, por parte de los promotores de obras, de planes de prevención de RCD en su ámbito de actuación, desde la óptica del conjunto de su actividad y no solamente para cada obra concreta en la que participen.
- Extensión de sus buenas prácticas ambientales de obra a los subcontratistas que participen en sus obras.
- Implementación de sistemas de gestión ambiental certificados, por ejemplo, normas ISO 14001 o similares.

Medidas de prevención para gestores

- Aplicación por parte de los titulares y explotadores de vertederos:
 - o Repercusión de los costes totales por vertido de RCD vía precios de vertido; y no sólo para la repercusión de los costes totales de vertido vía precios, sino aplicando sistemas de tarifas de admisión de RCD en vertedero que incentiven la prevención de RCD. Por ejemplo: tarifas de crecimiento superior al lineal dependiendo de la cantidad enviada a vertedero, que tengan en cuenta la contaminación del residuo recibido.
- Establecimiento de sistemas de información (en particular, accesibles vía internet) sobre gestores de RCD, incluyendo información sobre su localización, residuos admitidos, tarifas de tratamiento, procedimientos y criterios de admisión y otros datos de interés para promotores, constructores y gestores de RCD, como usuarios.

De la misma manera, para trabajadores muy específicos como encargados o Ingenieros Residentes de obra se podrían definir responsabilidades dentro de un sistema de gestión de Residuos de Construcción y Demolición (Figura 5). En cada proyecto, el factor vigilancia y control estará a cargo por todo el personal de obra; es decir, tanto obreros como staff de ingenieros, quienes deberán estar capacitados para cumplir su rol. De esa forma, se asegurará el estricto cumplimiento y la correcta distribución de responsabilidades dentro de un plan de gestión en todas las escalas.

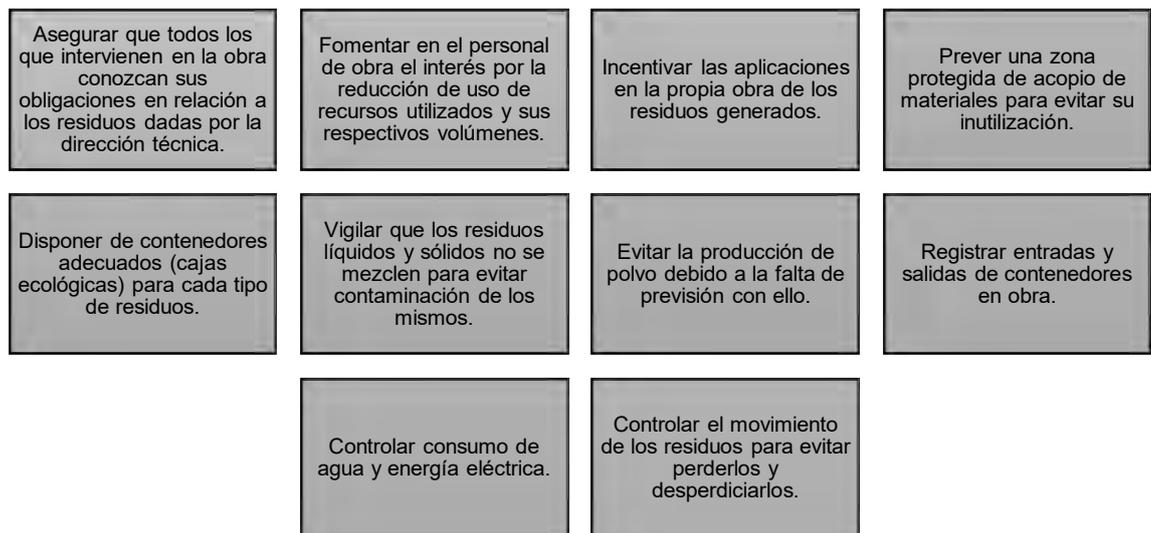


Figura 5: Recomendaciones para el encargado general de obra

Fuente: Adaptación de Itec, 2000

Generalmente, los diversos planes de gestión de este tipo de residuos utilizan cada uno de los diferentes pasos restantes del principio jerárquico, de acuerdo al tipo de RCD recolectado y a la modalidad ofertada del lugar donde se aplique. Es decir, los tratamientos serán variados, donde algunos optarán por la reutilización, el reciclaje para otros y la disposición final como último recurso. Sin embargo, el reto está en aumentar el porcentaje de reciclaje y reutilización, y reducir las grandes cantidades de RCD en disposición final. En Europa, existen situaciones muy variables hasta el 2014 con respecto al tratamiento de este tipo de residuos (Eurostat, 2017); por ejemplo, Chipre, Bélgica o Grecia aún cuentan con más del 50% de sus RCD destinados a botaderos o incineración. Mientras que, hay otros que tienen una mezcla de tratamientos como Hungría, Islandia, Francia, España, Suecia, entre otros. Estos últimos están en labores de trabajo para disminuir la disposición final teniendo ratios entre 20% a 50% de RCD y aumentando el reciclaje a intervalos entre 40 a 70%. Por su parte, la misma fuente revela que países como Malta, Irlanda, Eslovenia, Holanda, entre otros; cuentan con un avanzado plan de gestión de RCD debido a que se da estricta prioridad al reciclaje con mayorías casi absolutas y al uso de rellenos sanitarios reglamentados (2017). En definitiva, se debe priorizar el reciclaje y la reutilización por encima de los otros tratamientos y ese es el mensaje que algunos países de Europa ya han empezado a dar a las naciones americanas. Solo de esa forma, se mitigarán los impactos ambientales producidos por ciertos tratamientos y disminuirán grandes consumos energéticos. Todo ello, expuesto en la Tabla 6, permitirá referenciar una mejor decisión de gestión de RCD en el resto de países.

Tabla 6: Cargas ambientales producto de ACV para 1 tonelada de construcción y demolición de residuos tratados según diferentes métodos

| TRATAMIENTO | GWP (kg CO_{2eq} / t) | Energía primaria (MJ / t) | Uso de tierra PDF. m² year/ t)* |
|--------------------|--|--------------------------------------|---|
| Recolección | 6 | 100 | 0.15 |
| Relleno | 15 | 300 | 0.80 |
| Reciclaje | 2.5 | 45 | 0.18 |

Fuente: "Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix", adaptación de Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010, pp. 1021 – 1030

* PDF. m² year: Unidad para medir impactos sobre ecosistemas. Fracción potencialmente desaparecida de especies en 1 m² de superficie terrestre durante 1 año es la unidad para medir ecosistemas (Joliet et al., 2003).

El relleno es una opción válida cuando es reglamentado y disminuya al máximo las afecciones al medioambiente; sin embargo, queda claro que equivale a 43% más kg CO_{2eq}, a 52% más de fracción potencialmente desaparecida de especies y a cerca de 59% más de energía liberada que el tratamiento de recolección y reciclaje, juntos. Una vez aceptado que los tratamientos de reciclaje y reutilización son las salidas idóneas y enfoque principal de un plan de gestión de RCD, resulta importante explicar la diferencia entre ambas. En teoría, la reutilización es una fase que es poco detallada en los planes debido a que se contempla como un tipo de reciclaje. De acuerdo a las definiciones previamente expuestas, al reutilizar, vuelves a usar un producto sin adicionar consumo de materias primas; sin embargo, existe una controversia en la finalidad de uso. En un primer caso, podría considerarse para el mismo uso original (Aneiros, 2008), mientras que en otro podría admitirse para un uso diferente al que se planeó inicialmente (Rebri, 2005). Si bien es cierto, aunque una o ambas aseveraciones puedan considerarse válidas, el costo de reutilización y el nivel de complejidad es mucho más bajo que el de reciclaje; por tanto, resulta valioso estudiarlo independientemente. De acuerdo a Bustillo (2010), las medidas que aplican a la reutilización en obra (Figura 6) son las de forma directa (generación de residuos in situ) o de forma indirecta en otras obras ya sea de la misma empresa o de otra constructora (Bustillo, 2010, p. 207).

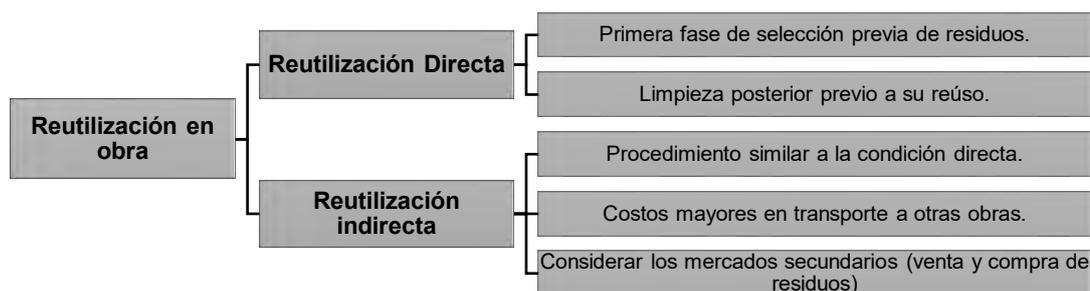


Figura 6: Reutilización en obra a modo de Gestión de RCD

Fuente: Manual de RCD y áridos reciclados, Bustillo, 2010, p. 207

Sin duda que esta opción es válida como alternativa de tratamiento de RCD; sin embargo, es bastante limitada debido a su baja posibilidad de aplicación y alcance de reuso en obra haciendo que sus ejemplos se tornen bastante puntuales. El elemento de los RCD que más se ajusta a este tratamiento es el material expuesto producto del movimiento de tierras debido a que podrían formar parte del paisaje artificial de la propia obra o de zonas adyacentes. No obstante, también existen otras aplicaciones válidas para los *stakeholders* que tienen participación en obra. Por ejemplo, la madera puede reusarse como elemento de seguridad, embalaje, tabloncillos de andamios o incluso para encofrados posteriores hasta agotar sus propiedades mecánicas. Los elementos arquitectónicos pueden tener uso posterior en procesos de rehabilitación o edificación y los pequeños elementos pueden completar detalles con otros del mismo tamaño o, luego de ser triturados, como material de relleno.

Por su parte, la función principal del reciclaje es la transformación (flujo de energía y de materiales) de residuos para la fabricación de nuevos productos destinados a usos similares a los originalmente planeados o diferentes. A nivel de RCD, se dice que el reciclaje en América es relativamente nuevo debido a que los estudios aún no corroboran una situación global de desarrollo en ese tema, aunque existan casos aislados con éxito. Muchos de ellos reflejan lo que viene ocurriendo en Europa hace algunos años con las nuevas reglamentaciones de rellenos sanitarios y la constante lucha por ganar terreno a la incineración, por parte de la reutilización y el reciclaje. Debido a ello, hoy en día, existen políticas gubernamentales para favorecer el reciclado en diferentes países, alrededor del mundo y empezar a mejorar las cifras de tratamiento de RCD y transformación en nuevos productos como, por ejemplo, áridos reciclados. Bustillo (2010) divide estas medidas en: regulaciones directas, incentivos al mercado y políticas educativas. Las primeras incluyen objetivos de reciclado, control de vertidos legales en rellenos sanitarios, requerimientos de porcentajes de concreto reciclado válidos y construcción sostenible. Como incentivo al mercado, se hace incidencia en el aspecto económico para lograr diferenciar la técnica del reciclaje como una opción rentable y hacer promoción de ello. Por último, las políticas educativas vienen realizándose mediante trabajos de concientización que incluyen campañas globales y creación de guías completas donde se resalte la necesidad e importancia del reciclaje partiendo de la escala local (Bustillo, 2010, p. 222-223). Para Gálvez-Martos (2018), las técnicas actuales de procesamiento y reciclaje de RCD pueden considerarse bien establecidas y su implementación es común en toda Europa. Además, menciona que el producto final es aún diferido en

el mercado a causa de la variedad de la naturaleza de los materiales secundarios finales (Gálvez-Martos, 2018).

A su vez, existen factores ajenos a los puntos económicos, mercantiles y políticos que condicionan las tasas de reciclado y Chochran et al. (2007) los denomina psicológicos. Estos son la principal razón de resistencia natural del ser humano a introducir cambios en costumbres y el reciclaje no es la excepción a esta condición. Para este caso particular, si se analiza el caso del concreto reciclado existe una corriente muy conservadora que va contra su desarrollo para diseños de mezclas muy sofisticadas. Es decir, la producción de concreto convencional viene de muchos años atrás; por tanto, dejar de utilizar material proveniente de canteras vírgenes por empezar a trabajar en maquinaria de reciclado que permita obtener áridos para nuevas mezclas de concreto resulta ajeno a las prácticas y lleva a desaprobarlo. Por ende, se genera la disminución del interés por buscar afinar este tema en muchos de los países donde la investigación es escasa y más aún cuando presentan condiciones particulares como la sismicidad. El caso de los países sísmicos representa una batalla a parte debido a que los profesionales en el área no aprueban el uso de estos porcentajes de reciclado en mezclas estructurales. En este punto, existe una brecha de investigación que debe ser copada y que países europeos ya tienen la delantera. Gálvez-Martos (2018) afirma que el destino final de la producción de áridos reciclados es la sustitución de materiales vírgenes e incluso sitúa sus usos. Él concluye que, así como sus aplicaciones se logran en baja calidad como materiales base o sub base para carreteras y rellenos, también hay potencial de aplicaciones de mayor calidad como, por ejemplo, nuevos agregados estructurales y no estructurales.

De acuerdo a lo expuesto, el principio jerárquico es fundamental en los planes de gestión de RCD donde siempre lo idóneo será la reducción y prevención, seguido de la reutilización, el reciclaje y, en última instancia, el uso de rellenos sanitarios legales. Las razones para apostar por darle prioridad a las tres primeras se centran en beneficios medioambientales (menor generación de impactos ambientales), empresariales (nuevas oportunidades y empleo) y económicos (ahorro largo plazo). Sumado a ello, logrando responsabilizar a los *stakeholders* y siempre segmentando la correcta disposición secuencial, por separado, tanto para los residuos de construcción como para los de demolición (Figuras 7 y 8) se conseguirá implementar un correcto Plan de Gestión de RCD en un determinado país.

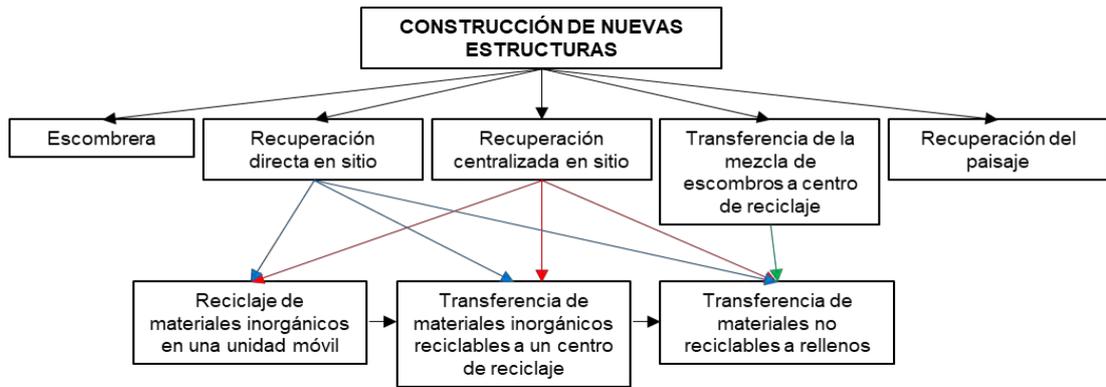


Figura 7: Diagrama de disposición de residuos de construcción de nuevas estructuras

Fuente: Adaptación de Koumpanis, B. et al., 2008

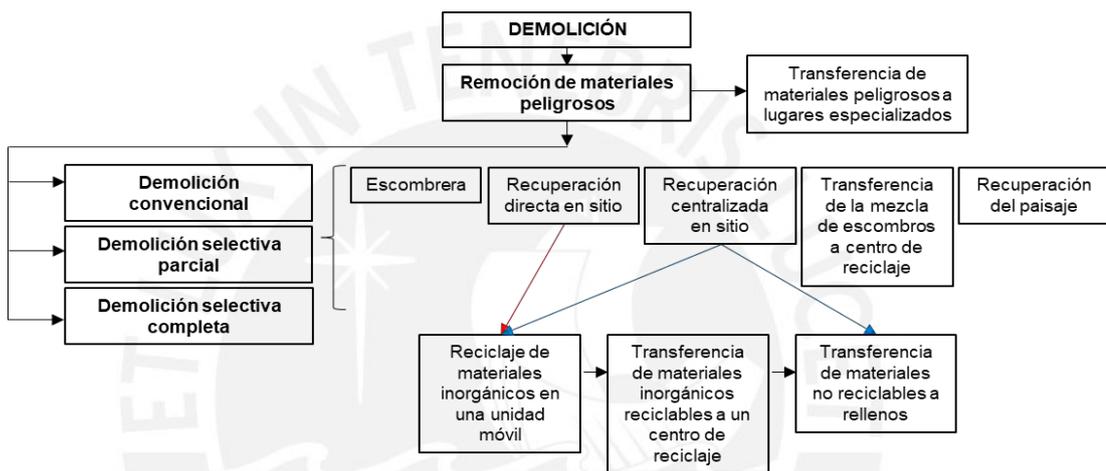


Figura 8: Diagrama de disposición de residuos de demolición

Fuente: Adaptación de Koumpanis, B. et al., 2008

2.1.1.2. Los áridos reciclados provenientes de RCD

El acápite anterior permitió entender los escenarios ideales dentro de la implementación de planes de gestión de RCD en base al desarrollo sostenible; es decir, considerando lo social, económico y ambiental. Para ello, en esta investigación se optará por el reciclaje porque la hipótesis conlleva la transformación de materiales; es decir, de RCD a áridos reciclados para obtener nuevas mezclas de concreto.

A su vez, la priorización de este tratamiento queda evidenciado en el alto potencial de reciclaje para el hormigón por la razón principal de que este representa el 40% de la composición de RCD (Figura 9). En ese sentido, se hace más factible obtener nuevas mezclas de mejor desempeño de uso por la alta calidad del material original.

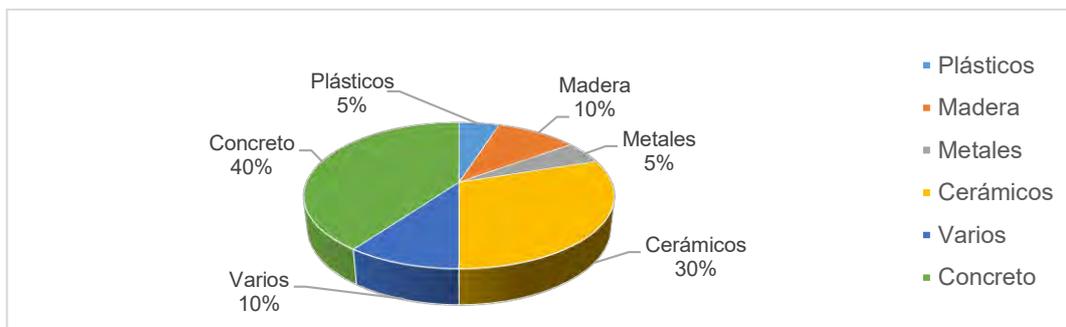


Figura 9: Composición básica de residuos de construcción y demolición

Fuente: Oikonomou, Recycled concrete aggregates, 2005

Los áridos reciclados son aquellos que resultan del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción (UNE prEN, 2002). Es decir, los RCD obtenidos pasan por un procesamiento de cribado, machacado y limpiado de impurezas orgánicas dando lugar a lo que se conoce como “árido reciclado de hormigón”. No obstante, se debe considerar que estos escombros que actúan como materia prima de los áridos reciclados tienen una composición heterogénea debido a que pueden provenir de hormigón (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones), albañilería, cerámicos, etc. (ACHE, 2006). En ese sentido, su falta de uniformidad es causal principal para especificar las diferencias entre tipos de áridos reciclados y sus funciones como material sostenible (Tabla 7).

Tabla 7: Clasificación de áridos reciclados de acuerdo a su composición

| <u>ARIDO</u> | <u>RECICLADO DE CONCRETO</u> | <u>RECICLADO CERÁMICO</u> | <u>RECICLADO MIXTO</u> |
|--------------------|-------------------------------|--|---|
| PROPIEDADES | | | |
| BASE | Hormigón | Cerámico | Hormigón y materiales pétreos |
| % DE BASE | 90% mínimo | 85% mínimo | 50% mínimo |
| DENSIDAD | Mayor a 2.1 tn/m ³ | Mayor a 1.6 tn/m ³ (*) * Norma holandesa | Mayor a: 2.1 tn/m ³ / 1.6 tn/m ³ (*) * Norma holandesa |
| USOS | Estructurales | rellenos o para capas en carreteras, etc. | |

Fuente: “Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural”, adaptación de Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural (ACHE), 1era ed., 2006.

Tal y como se mencionó antes, en muchos países aún existen restricciones para los áridos reciclados de uso estructural debido a la falta de normativa e investigación en el tema acentuándose más cuando se trata de territorios sísmicos. Todo lo contrario ocurre con los áridos reciclados no estructurales debido a sus diferentes usos para los que son implementados. Según Rodrigues et al. (2013), Medina et al. (2014), entre otros; en naciones desarrolladas el agregado reciclado es el reemplazo ideal de los agregados naturales para caminos, rellenos y obras de arte en edificios.

Para León y Ramírez debido a que los agregados constituyen entre el 70% y 80% del volumen de la mezcla de concreto, es importante conocer sus características pues tienen influencia en el comportamiento mecánico del concreto producido (2009). La forma, textura y gradación impactan en la trabajabilidad, en el acabado, exudación y en la segregación del concreto fresco. Asimismo, afectan la resistencia, rigidez, retracción, densidad, permeabilidad y durabilidad del concreto sólido (Quiroga, 2003). Por lo tanto, algún cambio en la proporción o la sola elección de reciclado de al menos uno de los áridos tendrá consecuencias en las propiedades del hormigón producido. Por un lado, la similitud en propiedades entre los agregados gruesos reciclados y vírgenes llevan a obtener una mezcla de concreto con comportamiento mecánico muy cercano al convencional (Silva et al., 2014). Sin embargo, los agregados finos reciclados tienden a absorber mayor agua que los naturales; por tanto, esto afecta las propiedades del concreto (Evangelista y De Brito, 2007; Rodrigues et al., 2013). Esta situación escala a diversos tamaños en finos ocasionando problemas en adherencia con la pasta de cemento; en consecuencia, se perjudica la manejabilidad, resistencia y la contracción, aumentando el riesgo de sedimentación y agrietamiento por contracción en seco del hormigón (ACHE, 2006). Por ende, para obtener concreto reciclado con propiedades mecánicas similares a su análogo convencional, la misma fuente recomienda limitar el tamaño mínimo de finos a 4 mm (2006). A su vez, existen especificaciones de las normas belgas, inglesas, RILEM, alemanas y recomendaciones de Hong Kong que establecen un límite de finos que va entre 2 y 5% en árido reciclado. Por consiguiente, el uso de los áridos finos reciclados se especifica en sub-bases y otros variados de menor importancia estructural debido a la gran cantidad de limitaciones y falta de información en su aplicación (FHWA, 2004).

A nivel global, el empleo de porcentajes de agregado reciclados se ha manejado de forma desigual por continentes siendo el contexto gran influyente para las normativas. Se puede decir que el caso de EE.UU. ha sido el más representativo de América; mientras que, en Europa, Alemania, Reino Unido, entre otros guardan gran similitud en porcentaje de reciclado según fuentes como EPA y EUROSTAT, respectivamente. El *CSI Initiative Recycling Concrete*, detalla algunos valores; por ejemplo, un estudio de la *National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)* en EE. UU, concluyó que hasta un 10% de agregado reciclado es adecuado como sustituto (WBCSD, 2009). Por otro lado, en Reino Unido, según Oblak et al., las investigaciones llevan a indicar que hasta 20% de agregado de concreto reciclado es válido en mezclas de hormigón. El caso de Alemania varía debido a su contexto y a

su diferente factor sísmico; según la norma DIN, se permite un máximo de 45% en condiciones especiales y 30% sin que esto afecte su trabajabilidad ni sus propiedades mecánicas. Por su parte, en Oceanía, Australia aprueba hasta un 30% en contenido de áridos reciclados para concreto estructural (Clark, Australian Guide).

Se debe hacer especial énfasis en que la calidad en los procedimientos de producción de los áridos reciclados será importante para disminuir diferencias con los agregados vírgenes; tanto para gruesos reciclados (AGR) como para finos (AFR). Esto debido a que las características de los agregados reciclados siempre dependerán del material de proveniencia y podría afectar su desempeño en mezcla. En primera instancia, Katz afirma que las *distribuciones granulométricas* de AGR obtenidos de hormigones con edades entre 1 a 28 días con diferente resistencia y grado de hidratación son semejantes (2003). A su vez, Buttler (2003) lo confirma e indica que la cantidad de AFR (partículas < a 4.75mm) generado es mayor entre 25 a 30%, independientemente de la resistencia del hormigón original. Además, estudios concluyen que su *módulo de finura* es mayor que el máximo requerido para concreto estructural, incluso por encima que el de los agregados finos naturales (Buyle – Bodin y Hadjieva – Zaharieva, 2002). Esto refuerza la limitación de tamaño de las partículas para obtener nuevas mezclas de concreto con propiedades mecánicas adecuadas. La *densidad* es otra propiedad importante en la que difieren agregados naturales y reciclados, y Zega (2008) lo atribuye a la composición de estos últimos, específicamente, a la mayor porosidad del mortero presente en los AGR. Así, concluye la disminución de densidad de los AGR en el orden de 6 – 15% con respecto a los naturales.

Tal cual lo mencionado, la *absorción de agua* es una característica muy importante en los agregados gruesos reciclados que condiciona su comportamiento reflejándolo en cambios en la dosificación de concreto reciclado. Para el último autor mencionado, la alta porosidad de los áridos reciclados, la gran cantidad de material fino y la tendencia a la segregación son puntos importantes que llevan a ubicar diferencias de hasta 5% en absorción y la necesidad de mayor cantidad de agua en mezcla (2008). La alta *porosidad*, recientemente mencionada, ostenta valores muy elevados con respecto a los agregados naturales y, principalmente, se debe al mortero de cemento presente en los áridos reciclados. Vázquez y Barra (2002) coloca a estos últimos en valores entre 12.5 – 16%, mientras que a los naturales en el intervalo entre 0.3 – 3%. El *desgaste “Los Ángeles”* es otra característica cuyas variaciones también se deben a la presencia del mortero en los AGR; por tanto, resulta evidente que la calidad del material proveniente condicionaría estas diferencias. Hansen y Narud (1983), en su

momento, afirmaron que el porcentaje de desgaste aumentaba a medida que la calidad del reciclado disminuía (mayor a/c). Por ende, se necesita condicionar la *presencia de mortero adherido* a los áridos; así, Limbachiya et al. (2000) propuso solucionarlo aumentando el tamaño máximo nominal y limitando el tamaño de finos. Para la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE), este último valor se debe mantener siempre por debajo del 1% (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2003); sin embargo, esta limitación seguirá las características zonales de producción. Por su parte, la *durabilidad por precipitación de sales de sulfatos* es un factor negativo en los agregados reciclados. Buyle y colegas (2002) afirmaron encontrar una pérdida significativa de 26.4%, mientras que para los naturales de 3.8%. Esto se debe a la porosidad elevada de los reciclados y, para controlarla, se deben realizar los ensayos pertinentes e implementar limitaciones en los mismos.

Por último, tanto el *índice de lajas y elongación* como el *contenido de cloruros y sulfatos* resultan ser características positivas para los agregados reciclados frente a los naturales; no obstante, las limitaciones son necesarias para mejorar su calidad.

Para Metha, la industria de concreto emplea 10 billones de toneladas de agregados en su producción y genera 1 billón de toneladas de RCD al año (2002), lo cual expone un problema de sobreexplotación de recursos y afecciones al medioambiente. Entonces, al cumplir los límites establecidos por las normativas del mundo, se podrán producir agregados reciclados de calidad y, a su vez, generar nuevas mezclas de concreto reciclado logrando mitigar los impactos negativos producidos por el sector.

2.2. Concreto Reciclado

Debido a la problemática producida por el agotamiento de recursos y el costo creciente de materia prima (Fastofski et al., 2017), muchos investigadores han implementado mejoras como la producción de hormigón reciclado y sostenible o también llamado hormigón verde con propiedades mejoradas (Petrillo et al., 2016). Para fines de esta investigación, el concreto reciclado es el material de construcción resultado de la mezcla de cemento, agua y cuya base es el uso de áridos reciclados provenientes de residuos de concreto y demolición.

2.2.1. Procesos de producción de áridos reciclados para nuevas mezclas

Según el capítulo 5 de la norma 555R-01 del ACI, el proceso de producción de hormigón reciclado se centra, en primera instancia, en el procesamiento de RCD para la fabricación de áridos reciclados. Para ello, este reporte detalla 6 puntos a tener en

cuenta: sitio, operación de planta, diseño de planta, machacadoras, procesamiento y beneficio, y gradación de productos chancados (pp. 18-19, 2001). En cuanto al sitio, la producción de los agregados reciclados inicia con las labores de demolición donde se usan equipos y maquinarias para obtener los escombros necesarios. Luego, el concreto demolido es transportado en camiones a las plantas de reciclado para su posterior procesamiento. Una vez llegado a la planta, se inician las operaciones en la tolva de recepción donde se da la primera separación manual de impurezas de gran tamaño como papel, madera, vidrio, etc. Después, se realiza el primer cribado vibrador o precibado con una maquinaria que recibe el nombre de “Vibrating Grizzly Feeder” para, posteriormente, iniciar el trabajo de las machacadoras; siendo la principal y primera la de mandíbula. En el camino a conseguir el tamaño ideal post-cribado y triturado, se debe hacer uso de separadores magnéticos que permitan separar los residuos metálicos sobrantes. Finalmente, las continuas separaciones de impurezas orgánicas que se puedan observar pueden ser extraídas de forma manual o mecánicamente; lo cual dependerá del diseño de la planta para, finalmente, obtener los áridos reciclados listos para su próxima mezcla de concreto. El diseño de las plantas de tratamiento de RCD es de suma importancia debido a que, dependiendo de ello, se podrán usar diversos tipos, teniendo en cuenta las diferencias en la cantidad de procesos intermedios al producto final. Según la Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural, las plantas pueden dividirse en fijas y móviles (pp. 22, 2006), mientras que según ACI en su normativa 555R-01 las dividen en plantas de primera (con sistema abierto y cerrado) y segunda generación (pp.19, 2001). En cuanto a la primera división, las plantas móviles son aquellas que se transportan hasta el lugar de la demolición y su capacidad de producción es de, aproximadamente, 150 – 200 toneladas / hora. Estas cuentan con una única entrada de alimentación, una cinta transportadora, una machacadora y una o dos cribas, además del separador magnético. Por otro lado, las plantas fijas tienen una capacidad de producción de 500 toneladas / hora a más y se encuentran alejadas del centro de la ciudad, en zonas donde puedan instalarse de forma permanente. A su vez, esta planta cuenta con cintas transportadoras, varias cribas y dos a tres tipos de trituradoras, separadores magnéticos y sistemas de separación manual y mecánico de impurezas. Debido a su ubicación, los residuos de demolición deben llevarse hacia sus instalaciones para la fabricación de los áridos reciclados (ACHE, 2006).

Con respecto a la división brindada por el ACI, las primeras instalaciones son mucho más pequeñas que la segunda generación y también se pueden subdividir en las que cuentan con sistema abierto (b) o cerrado (a). Para este caso, el sistema cerrado es

el preferido debido al control superior que se tiene sobre el tamaño de partícula (ACI, 2001) siendo posible mayor uniformidad en el producto final (Hansen, 1986). La diferencia principal con las de segunda generación, además de sus dimensiones, es la especialización en el procesado. Estas plantas de mayor procesamiento cuentan con mayor equipamiento y maquinaria haciéndolas capaces de remover materiales inadecuados en los residuos mediante separadores en seco de corriente de aire, vía húmeda y separadores magnéticos (ACI, 2001). A juicio del lector, se debe hacer una reflexión al contrastar los procesos de estos 4 tipos asemejando las de primera generación con las móviles (Figura 10) y las de segunda (Figura 11) con las plantas fijas.

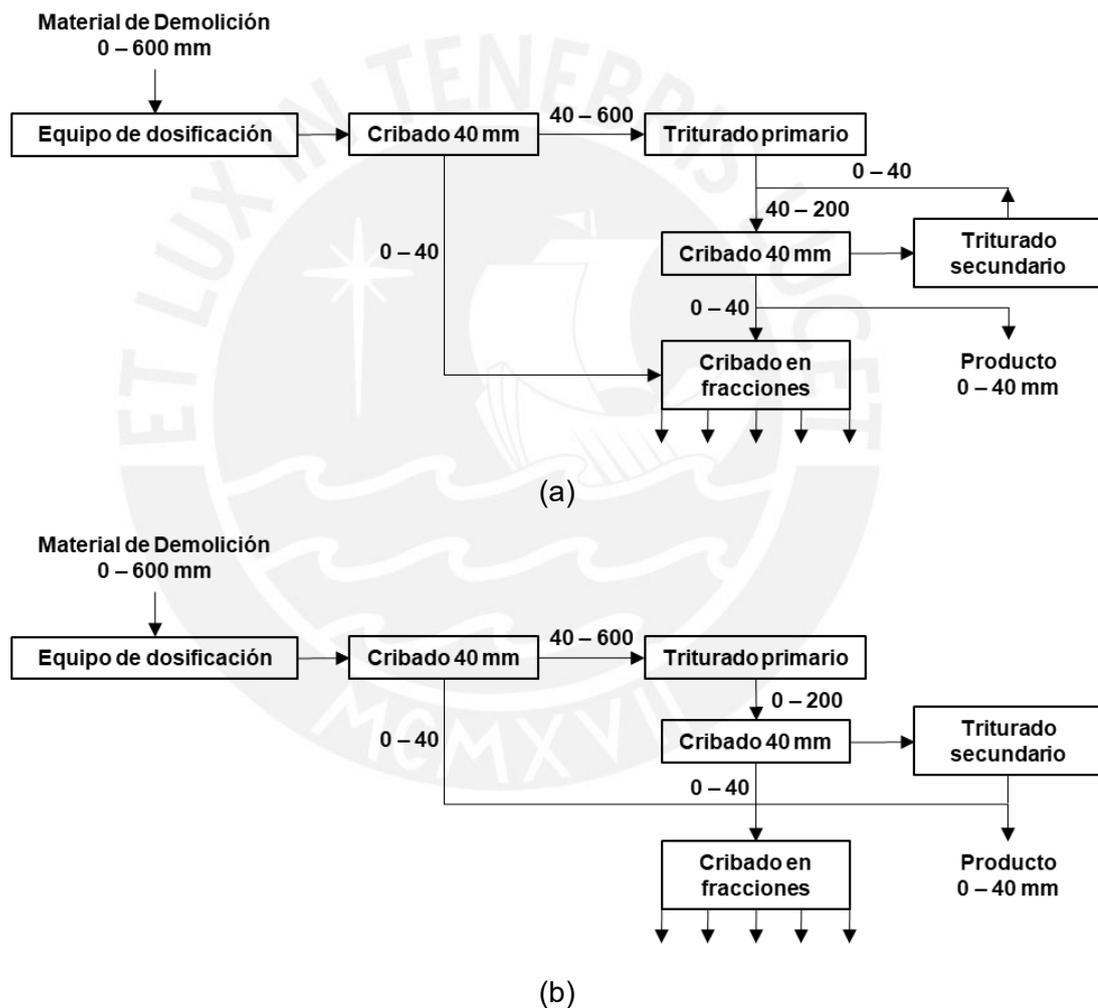


Figura 10: Diagramas de flujo de plantas de primera generación (a) sistema cerrado, (b) sistema abierto.

Fuente: Adaptación de 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete. Chapter 5 – Production of Concrete from Recycled, 2001.

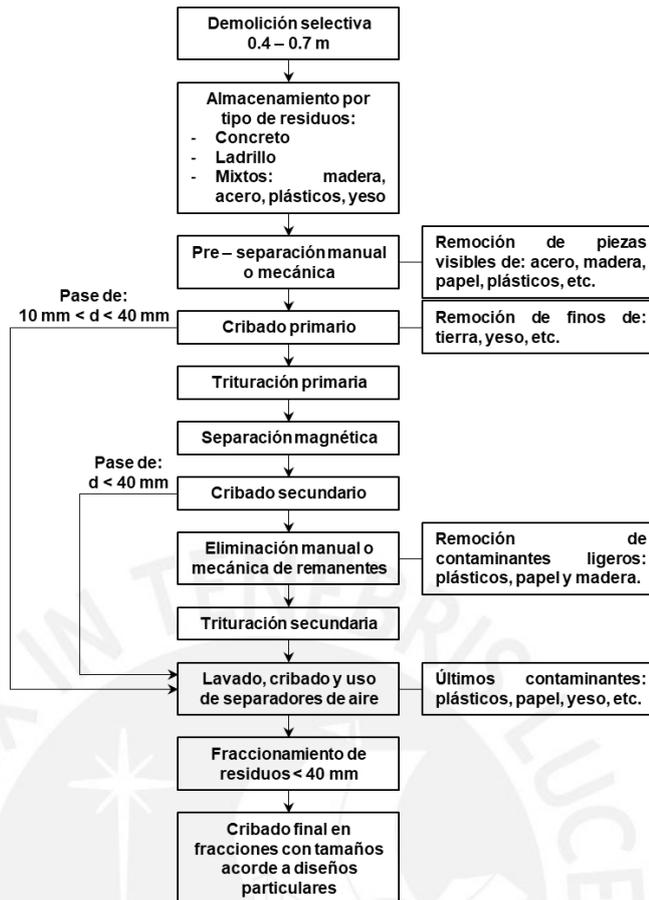


Figura 11: Diagrama de flujo de plantas de segunda generación

Fuente: Adaptación de 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete. Chapter 5 – Production of Concrete from Recycled, 2001.

Luego de tener en cuenta el tipo de operación y el diseño de planta, se debe ser mucho más minucioso en el tipo de maquinaria que se va a utilizar. Tal cual lo mencionado, los procesamientos atraviesan varios cribados (entre 2 y 3) y también diversos tipos de triturados. Por ende, esta vez, se debe hablar de las machacadoras. Existen tres tipos de trituradoras utilizadas para diversos fines: de mandíbula, de impactos y de conos. Las *machacadoras de mandíbulas* producen áridos con buena distribución de tamaños para su uso en concreto estructural debido a su cantidad reducida de finos que produce (<10%). Aparte de proveer al agregado de adecuada calidad, el único factor a considerar sobre ello es que forma partículas más angulosas (ACHE, 2006). Por otro lado, las *trituradoras de cono* son utilizadas para machacados secundarios debido a que el tamaño máximo de escombros de alimentación es de 200 mm (8"). De esa forma, se puede obtener un producto final de características adecuadas con una cantidad media menor al 20% de finos (ACHE, 2006). En última instancia, se tienen las *chancadoras de impacto* cuyo producto final es el más adecuado para construcción de carreteras y rellenos (ACI, 2001). El principal

inconveniente de esta maquinaria es el gran desgaste que sufren los áridos con los impactos generando alta producción de hasta un 40% de finos (ACHE, 2006). Por lo tanto, el tipo de triturada se elegirá considerando tanto el nuevo uso que se le dará al material reciclado como las tasas de producción en porcentaje de finos en mezcla. El penúltimo punto a considerar es el procesamiento y beneficio donde el comité ACI advierte de la importancia de la eliminación de impurezas durante el proceso de tratamiento de los escombros (ACI, 2001, pp.20). Principalmente, durante la demolición se debe evitar incorporar cantidad de contaminantes visibles como maderas, plásticos, yeso, papel; de modo que, se clasifiquen antes de ingresar a la tolva de alimentación. Los separadores magnéticos forman parte de la maquinaria especializada que permite separar metales de los residuos; sin embargo, la ACHE sugiere utilizar también separadores en seco por aire, vía húmeda o separadores por corrientes de Foucault (ACHE, 2006, pp. 26-27). Esto dependerá del origen de los residuos obtenidos post-demolición y del nivel de tratamiento de la planta diseñada haciendo mucho énfasis en la contaminación por presencia de impurezas en el árido reciclado. Como último factor a considerar, el comité ACI implica que los cribados vibradores son muy importantes pues determinarán los tamaños máximos con los que se trabajará (ACI, 2001, pp.19). En general, ACHE recalca que se recomienda contar con agregados de tamaño mayor a 4 mm y la menor cantidad de finos posibles (ACHE, 2006, pp. 29); por ende, resulta conveniente realizar, únicamente, la sustitución de agregado grueso reciclado por natural en la mezcla.

2.2.2. Propiedades del hormigón con agregados reciclados

Los hormigones con agregados reciclados tienden a mantener sus propiedades mecánicas cuando la suplantación de agregados reciclados no supera el 20% en mezcla en peso, de acuerdo a la norma que se seguirá en su dosificación. No obstante, antes de denotar los principales puntos importantes de las propiedades en concreto reciclado debe verificarse el cumplimiento de las propiedades del árido reciclado. El comité ACI sugiere el cumplimiento de la granulometría, forma y textura superficial, densidad y absorción, coeficiente de los ángulos, contenido de sulfatos y contaminantes e impurezas especificados en su normativa 555R-01 (ACI, 2001, pp. 20). Luego, para efectuar la dosificación del concreto reciclado, se deben tener en cuenta varios puntos. En cuanto al contenido de agua, el ACI y el ACHE siguen los lineamientos de Mukai et al, donde se sugiere entre un 5 y 10% más de agua para conseguir similar trabajabilidad (pp. 23, 2001). Según Knight, resulta importante adecuar un incremento de cemento que oscile entre el 5 y 6% para porcentajes de hasta 50% de árido reciclado en lugar de natural (1998). La relación agua/cemento

es un tema muy importante dentro de la dosificación de mezclas de concreto con presencia de áridos reciclados. La ACHE afirma que solo para sustituciones por encima del 50% se debe ajustar la relación agua/cemento mediante ensayos correspondientes (ACHE, 2006, pp. 63). En este proyecto se desea obtener calidades de similar relación agua/cemento para ambos casos de concreto e igual resulta válido tomar como límites los lineamientos expuestos por Hansen en 1986 (Anexo A.1).

Además de adicionar agua a la mezcla original, se pueden trabajar dos nuevas alternativas para la dosificación del concreto reciclado (Sánchez de Juan, 2005). La primera y más reciente sería aceptar el uso de aditivo superplastificante; sin embargo, es más costoso, falta regulación en el tema y se debería realizar un estudio previo de composición química para tomar en cuenta su influencia en las propiedades mecánicas del concreto. Por otro lado, la presaturación de agregados es un método bastante experimental, pero probado a nivel técnico. Debido a que los agregados reciclados tienen un alto coeficiente de absorción como característica esencial, presaturar la piedra permitiría que el agua de mezcla no se reduzca; por tanto, la relación w/c se mantendría constante. Hoy en día, se ha demostrado que en el caso de mezclas de concreto con relación agua/cemento baja, utilizar esta técnica para controlar el contenido de agua en mezcla es beneficiosa para el aumento de la resistencia a compresión (Vidaud, 2015, p. 26). Por lo tanto, para fines técnicos de esta investigación, resultará conveniente utilizar la saturación de agregados antes de la mezcla como técnica válida para mantener constante la cantidad de agua y cemento del caso original. Para este caso, los agregados reciclados deberán considerarse con condiciones de humedad diferentes a los casos convencionales; de modo que, ahora se consideren saturados con superficie seca antes de la mezcla (Sánchez de Juan 2005, p. 131). Así, no se añadiría agua a la mezcla y la humedad total es igual a la absorción potencial. Según las normas técnicas peruanas, los agregados gruesos tienen un valor de absorción que oscila entre 0.2 – 4%; mientras que, su contenido de humedad libre radica entre 0.5 – 2% (NTP 400.021, 2013). Por su parte, el agregado fino mantiene valores entre los intervalos de 0.2 – 2% y 2 – 6% de ambas propiedades mencionadas, respectivamente (NTP 400.022, 2013). Para el caso de los agregados reciclados, estos valores cambian con ligereza, de acuerdo al tratamiento que se dé durante su procedimiento. Cuando se han realizado procesos sucesivos de trituración, la calidad de árido reciclado mejora y la absorción desciende (Yagishita et al., 1993). Asimismo, los áridos procedentes de mezclas de concreto convencional de gran resistencia permiten obtener menor absorción en agregados reciclados (Kikuchi et al., 1998). Por ello, recogiendo ambos requisitos para trabajar

con hormigones de calidad con agregado grueso reciclado, resultará más conveniente trabajar con el máximo porcentaje de absorción de 5% impuesto por normativa española (Sánchez de Juan 2005, p. 49).

Un punto importante a recalcar es la verdadera composición de los áridos reciclados luego de su proceso de producción como escombro o RCD. Según Etxeberria y colegas (2006), la cantidad de agregados y agregados con mortero adherido es mayor a 90% tal cual se puede mostrar en la Figura 12. Es decir, cuando existan sustituciones en mezcla de, por ejemplo, 20% de agregado reciclado, la cantidad real de AGR será afectada por un factor ligeramente mayor a 90% para reducir las variadas impurezas que pudieran afectar la calidad del concreto final.



Figura 12: Composición de árido grueso reciclado

Fuente: Adaptación de Etxeberria et al., 2006.

Por último, el porcentaje de finos en la mezcla debe ser controlado durante el proceso de obtención del concreto reciclado. De acuerdo a ello, resulta conveniente seguir las recomendaciones de la RILEM y especificaciones de Hong Kong que limitan a 5% el contenido de partículas inferiores a 4 mm en el árido grueso reciclado. Es decir, la producción de árido grueso reciclado trae consigo un porcentaje definido por el diseño de agregado fino que debe ser descontado de la cantidad inicial (ACHE, 2006). A su vez, la proporción de arena/agregado será la misma tanto para el hormigón reciclado como para el caso de dosificación convencional con agregado virgen (ACI, 2001).

Desde otra perspectiva, las propiedades del hormigón reciclado podrían verse afectadas debido al uso de agregados con materiales de origen heterogéneo, generando así alteraciones según el porcentaje de sustitución de agregados gruesos. Para empezar, la *resistencia a compresión* es una de las propiedades principales que deben verificarse debido a que define el diseño de la mezcla y su función. En general,

según la ACHE, se puede afirmar que existe una tendencia de decrecimiento en la resistencia a compresión con la misma relación agua/cemento a medida que aumenta el porcentaje de sustitución (pp. 77, 2006). Así, por ejemplo, cuando se sustituye el 100% de AG, se pierde entre 20 y 30% de resistencia, mientras que para una sustitución del 50%, se verifican pérdidas de entre 2 a 15%. La misma fuente hace especial hincapié en las pequeñas pérdidas de 5% cuando la sustitución se limita al 20-30% (ACHE, 2006). Por su parte, el comité ACI del reporte 555R-01 confirma la misma tendencia citando investigaciones e informes experimentales de diversos autores especialistas (pp. 21, 2001). Según Hansen, Narud se encuentran similares resistencias a compresión tal cual el concreto original, siempre y cuando ambos provengan de la misma materia prima (1983). Del mismo modo, Bernier et al. (1978) corroboran la similitud en resultados, salvo cuando existe concreto de alta resistencia comparado con otro que proviene de RCD de baja resistencia y se aprecian diferencias en, aproximadamente, 39%. En ese sentido, queda claro que todo aquel concreto que sea dosificado con residuos provenientes de diversas fuentes y diferentes concretos tendrán mayor variabilidad que aquellos que fueron diseñados con RCD provenientes de una misma fuente. De ahí, la importancia en uniformizar lo más que se puedan los áridos reciclados y tener en cuenta las fuentes antes de ser considerados para diversas mezclas y funcionalidades.

El *módulo de elasticidad* es un indicador que se ve afectado por la presencia de un porcentaje de mortero adherido al residuo y le provee un módulo de elasticidad menor haciendo que el valor global del escombro sea inferior al caso convencional (ACHE, 2006). Según ACI 555R-01, existe un comité japonés que investigó este hecho (Buildings Contractors Society of Japan) dando importancia a su variante de acuerdo al tipo de árido que se desee reciclar. Es decir, cuando se incorporaba agregado fino y grueso reciclado, el indicador variaba entre 25 a 40%, mientras que cuando solo se trabajaba con árido grueso reciclado, esta propiedad varía entre 10 a 30% (pp. 22, 2001). A su vez, podría tomarse la relación a/c como referencia para incidencias en valor del módulo de elasticidad y diseñar la mezcla de forma adecuada (Anexo A.2).

El *creep* es un factor delicado debido a que se considera como uno de los mecanismos de deformación capaces de inducir a la falla en el tiempo. El valor de esta propiedad es directamente proporcional al contenido de pasta y mortero en el concreto; por tanto, el hormigón reciclado contará con mayor tasa de fluencia. Esto se debe a la composición heterogénea compuesta por porcentajes de mortero del

uso original (Hansen, 1986) y conlleva a un aumento en 30 a 60% en fluencia. Aquí se recalca la búsqueda constante de homogeneidad y cuidado del material de origen.

Por su parte, la *retracción por secado* es un indicador que varía de acuerdo al tipo de material reciclado en la mezcla de concreto. Es decir, aquellas mezclas que contengan únicamente áridos gruesos reciclados, según Building Contractors Society of Japan, tendrán entre un 20 y 50% mayor retracción que el caso convencional. Sin embargo, los que tengan tanto árido grueso como fino reciclado, evidentemente, sus valores ascenderán a 70-100% (1978). La *resistencia de tracción y flexión* tiene el mismo caso pues para la primera situación mencionada, se halla el mismo o un máximo de 10% de reducción en la resistencia de tracción. Para el caso de áridos gruesos y finos reciclados, se tiene una reducción que fluctúa entre 10 a 20% (Hansen, 1986).

La *permeabilidad* es una propiedad cuyo valor en concreto reciclado varía de acuerdo a su alta absorción de agregados y, si fuera el caso, diferencias visibles en resistencia. Por ello, la normativa ACI 555R-01 suscribe lo mencionado por Hansen respecto a que las mezclas de concreto reciclado con relación agua/cemento (*a/c* o *w/c* en inglés) entre 0.5 y 0.7 cuentan con de 2 a 5 veces mayor permeabilidad que las de agregado virgen (1984). Así, se sugiere que para poder controlar ello, aparte de los límites de absorción como propiedad de áridos reciclados, se podría reducir en 0.05 o 0.10 la relación *a/c* (Rasheeduzzafar, 1984).

Para el caso de la *resistencia ante heladas y deshielo*, el comité ACI 555R-01 centra los trabajos realizados por estudiosos japoneses y norteamericanos para explicar las diferencias en propiedades. Si se evalúa como uso en carreteras y rellenos, Hansen afirma la gran similitud en resistencia ante estos eventos tanto para áridos vírgenes como reciclados (1986). No obstante, para concreto de baja y alta calidad, los japoneses sugieren que las mezclas con árido grueso reciclado y fino virgen la resistencia ante heladas y deshielo es comparable con la del concreto convencional (Building Contractors Society of Japan, 1978). A su vez, Hasaba et al. (1981), comenta sobre la posibilidad de incluir aire a las mezclas con áridos reciclados y resulta que tras su investigación se puede afirmar que esto ocasiona una reducción en la resistencia siendo ligeramente perjudicial para estos fines.

Por último, se optó por incluir la evaluación literaria de propiedades químicas que resultarán muy útiles para fines de esta investigación; la *carbonatación*, *penetración*

de cloruros y la corrosión de armaduras. En cuanto a la primera propiedad mencionada, un estudio japonés afirmó que la tasa de carbonatación de concretos con árido reciclado es 65% mayor que el caso con áridos vírgenes (BCSJ, 1978). Sin embargo, según ACHE, el factor predominante en la carbonatación es la permeabilidad y el origen del residuo. Dicho de otro modo, si el árido reciclado es más permeable que el mortero nuevo, la profundidad de carbonatación será mayor que el caso convencional y será visible por la coincidencia de los picos irregulares con los áridos porosos (pp. 119, 2006). Esto lleva a estudiar la permeabilidad del concreto de origen y trabajar para conseguir un valor similar o inferior a la del mortero nuevo obteniendo misma distancia de carbonatación. Por otro lado, otra solución para este indicador sería la reserva alcalina de la mezcla sostenible. Es decir, si se aumenta entre 5 a 6% de cemento en la dosificación del hormigón reciclado, esa cantidad de pasta provoca disminución en la velocidad de avance de carbonatación (ACHE, 2006). De acuerdo a lo expuesto, el porcentaje de sustitución y el origen del residuo serán los principales responsables del valor de profundidad (ACHE, 2006, pp. 121). Para la ACHE, la *penetración del ion cloruro* en el hormigón se debe a la zona de transición entre la nueva pasta y el árido reciclado a través del mortero anterior, haciendo necesario disminuir la permeabilidad de uno de los tres medios para controlar esto (ACHE, 2006, pp. 121). Actualmente, los estudios concluyen que, a mayor sustitución de árido reciclado, se encontrarán mayores variaciones. Sin embargo, tras la revisión de gráficos y tendencias, se afirma que con 20% de árido reciclado en mezcla, se obtendrán valores similares que el concreto convencional (ACHE, 2006, pp. 122). Por último, *la corrosión de armaduras* va a depender de la permeabilidad, profundidad de carbonatación, ataque por sulfatos, velocidad de difusión de cloruros, origen de RCD y longitud de recubrimiento. De ese modo, va a resultar importante buscar la forma de reducir el impacto de estos problemas generados por la suplantación de áridos vírgenes por reciclados. Entre las soluciones, se encuentran utilizar un tipo de cemento adecuado como el V (cemento Portland para obras que requieren resistencia a sulfatos) o IP (cemento Portland puzolánico para exposiciones marítimas). Además, Rasheeduzzafar (1984) afirma la posibilidad de controlar ello mediante la reducción en la relación agua/cemento, lo cual puede ser graficado en el Anexo A.3 por parte de Hansen (1986). En suma, lo que se puede decir es que cualquier adición o aditivo que se requiera agregar a la mezcla con áridos reciclados, debe tener previamente impuesto un estudio de sustancias químicas para prever cualquier mecanismo de falla.

2.2.3. Medidas de optimización de mezclado: TSMA (Two Stage Mixing Approach en inglés)

Un adecuado control de las propiedades mecánicas del concreto reciclado llevará a conseguir mezclas óptimas que puedan ser utilizadas para cualquier funcionalidad; por ende, cualquier otra medida que aporte a ello será eficiente. En ese sentido, existe un nuevo método de mezclado experimental desarrollado por Tam et al. (2005) que divide el proceso de mezclado en dos partes. Es decir, fracciona proporcionalmente el agua requerida en dos momentos, después de mezclar tanto el agregado fino como el agregado grueso y reciclado, tal cual explica el Anexo B.1 (Tam et al., 2007). A diferencia del caso normal de mezclado que solo agrega agua en una etapa, este procedimiento experimental prevé de calidad al árido reciclado. De forma sencilla, permite una mejor saturación del AGR y se consigue una adecuada adherencia entre los áridos y la pasta. Es decir, con esta técnica se reviste la partícula de árido con la pasta de cemento dando uniformidad y resistencia en la zona de transición interfacial (Chauveinc, 2011). Esto ocasiona mejoras en la resistencia de incluso 21.19% en mezclas de 20% de AGR y muchas otras que permiten asegurar un hormigón reciclado con propiedades mecánicas controladas (Tam et al., 2005).

En pocas palabras, Chauveinc afirma que, durante la primera etapa de mezclado, se usa la mitad de agua permitiendo la formación de una capa delgada de cemento líquido. A continuación, esta capa penetra en el antiguo mortero adherido del concreto de origen muy poroso, llenando todos los vacíos y fisuras para después, completar todo el procedimiento usando la otra mitad de agua restante (Chauvenic, 2011, pp. 22). En definitiva, la estructura del árido reciclado mejora, atacando directamente sus propiedades débiles como la alta absorción de agua, la alta porosidad y la débil zona de relación interfacial entre los mismos y la pasta de cemento en nuevas mezclas. A su vez, Tam et al. (2007) concluye, tras ensayos de laboratorio, gráficos y tendencias una serie de ventajas en la durabilidad de las nuevas mezclas de concreto al utilizar la técnica de optimización TSMA que serán especificadas claramente en la Tabla 8.

Tabla 8: Ventajas en durabilidad de concreto reciclado utilizando la técnica de optimización TSMA

| <u>PROPIEDADES DE CONCRETO RECICLADO</u> | <u>VENTAJAS EN DURABILIDAD MEJORA DE HASTA:</u> |
|---|---|
| Contracción | 68.1% con sustituciones de hasta 100%, luego de 14 días de curado |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Creep | 46.4% con sustituciones de hasta 100%, luego de 14 días de curado |
| Absorción de agua | 35.4% con sustituciones de hasta 100%, luego de 126 días de curado |
| Permeabilidad de aire | 51.8% con sustituciones de hasta 20%, luego de 56 días de curado |
| Permeabilidad al ion – cloruro | 30.0% con sustituciones de hasta 100%, luego de 126 días de curado |

Fuente: “Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach”, adaptación de Tam, V. W. Y., & Tam, C. M., 2007.

Por lo tanto, esta técnica de optimización dota de forma efectiva de grandes mejoras en durabilidad a las nuevas mezclas de concreto llegando a trabajar con máximas tasas de reciclado. Además, previamente se demostró la mejora que hay en resistencia considerando los porcentajes de agregado reciclado en mezcla (Anexo B.2), incluso en sustituciones de hasta 30% de árido grueso reciclado. Por lo tanto, la evidencia permite amplificar el alcance e invitar a la continuidad de desarrollo e investigación de técnicas de optimización como TSMA.

2.3. Análisis de Ciclo de Vida como herramienta ambiental

Así como es importante estudiar los procesos de obtención de los agregados reciclados y con ellos la producción de una nueva mezcla de concreto, también es necesario utilizar una herramienta efectiva para evaluar su impacto ambiental (Farina et al., 2020). De ese modo, se podría corroborar si la aplicación de concreto reciclado en el Perú resulta favorable tanto en la parte técnica como ambiental generando menores emisiones de GEI e impactos ambientales que el concreto convencional. En ese sentido, al cuantificar los impactos ambientales producto del contraste de mezclas de concreto basadas en agregado reciclado y concreto convencional, se podrá llegar a una conclusión mucho más precisa que englobe análisis cualitativo y cuantitativo. Por ende, varios autores han creído conveniente utilizar un ACV como herramienta ideal para llegar a una respuesta final (Gursel et al., 2014; Kim y Tae, 2016; Faleschini et al., 2016; Ding et al., 2016; Turk et al., 2015) y este proyecto no será ajeno a ello.

Según Wrisberg et al. (1997) el ACV es una herramienta para la gestión ambiental que permite identificar el foco de un problema en todo el ciclo de vida de un producto; esto llevará a la optimización de los recursos y a la gestión de los residuos, incluso cuando no se analice completamente todo el producto o sistema. Entre todos sus usos, esta herramienta permite analizar comparativamente dos o más productos o sistemas de la misma funcionalidad utilizando una unidad funcional. Entre otras definiciones, esta metodología permite analizar un producto o sistema con la finalidad

de evaluar los impactos ambientales generados durante todo su ciclo de vida; es decir, desde la obtención de la materia prima hasta su disposición final (Klöpffer, 1997). De forma esquemática, para comprender lo que refiere al ciclo de vida de un producto, se seguirá un ejemplo similar al expuesto por el libro de Matthews (2013).

Todo proceso inicia con la extracción de la materia prima de canteras vírgenes y el suelo como el petróleo, madera u otros insumos. Segundo, la etapa de procesamiento de material es aquella que transforma toda la materia prima en materiales básicos como, por ejemplo, bloques de construcción, metales, plásticos o combustible. Todos estos materiales pasan a ser manufacturados para obtener productos como cemento o automóviles. Una vez listos, estos productos deben ser fletados y transportados a las diversas distribuidoras y tiendas para su respectivo uso por fábricas o consumidores. La etapa de uso es la que prosigue a ello y donde, incluso, el producto puede adjudicar mayor carga ambiental debido a que se puede dar el caso de que necesite energía para su funcionamiento o materiales extras como agua. En sí, esto tiene una duración de diseño hasta que el producto deja de ser utilizado y llega el fin de su vida útil y donde se debe decidir el método de disposición final, o si simplemente es eliminado o incinerado.

Se dice que el primer ACV fue realizado en el año 1969 por el *Midwest Research Institute* (MRI) para Coca Cola. En ese año, la premisa fundamental fue disminuir el consumo de recursos y con ello las emisiones al medioambiente (Matthews et al., 2013); por tanto, se puede percibir su importante influencia en la toma de decisiones. Así, las empresas iban utilizando esta herramienta hasta que, en 1993, la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), principal organismo activo en la investigación científica del Análisis de Ciclo de Vida, formuló el primer código internacional aplicable: Código de Prácticas para el ACV (Rodríguez, 2003). Desde ese momento, se siguieron implementando investigaciones en el tema con la finalidad de homologar los trabajos; posteriormente, la *International Organization for Standardization* (ISO) logró establecer un documento base metodológico. A partir del cual, se definió ACV como una “técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” (ISO 14040, 2006). A su vez, mediante sus diversas promulgaciones, entre las principales desde la ISO 14040 hasta la ISO 14044, se estandarizó la estructura del mismo. Es

decir, se insertaron 4 fases en la metodología del ACV (Figura 13): Objetivo y alcance de estudio, Análisis del Inventario (ICV), Análisis del Impacto e Interpretación (ISO 14040, 2006).

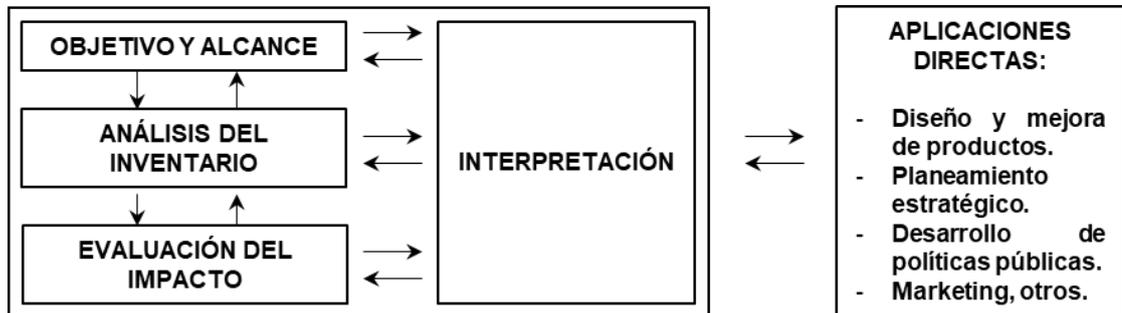


Figura 13: Fases en la Metodología del ACV

Fuente: Adaptación de ISO 14040, 2006.

La primera fase, como su nombre lo dice, engloba la definición de los rasgos generales del producto a analizar junto con su respectivo alcance de evaluación y aplicación. Esto permitirá definir los límites del sistema dentro de su cadena de producción; es decir, de acuerdo al alcance, se podrá determinar el punto máximo a analizar y hacia quién va dirigido. Debido a las facilidades comparativas de esta herramienta, también se deberá elegir una unidad funcional en común que permita establecer las diferencias entre los productos a evaluar y proceder al siguiente punto.

En cuanto al Análisis del Inventario, la ISO 14044 explica que el ICV está compuesto de la recopilación y la cuantificación de las entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) para los productos a través del sistema y sus límites elegidos (2006). He de decir que, en este punto, se necesita tomar datos cualitativos y cuantitativos de bases de datos conocidas en el tema como *Ecoinvent v.3*, *US Life Cycle Inventory Database*, entre otras. A su vez, los cálculos se harán asignando cargas ambientales y refinando los límites del sistema, si así fuera el caso (ISO 14041, 2006).

Una vez determinado ello, se procede a la Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida (LCIA) el cual trata de entender y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos ambientales generados (ISO 14042, 2006). Para ello, se deberán definir cierta terminología inserta en esta fase de la herramienta de gestión ambiental: categorías de impacto y métodos para la categorización. Según Garraín, una categoría de impacto representa las consecuencias ambientales generadas por los límites establecidos y el sistema de un producto (2009). SETAC, por su parte, los

divide en tres grupos principales: consumo de recursos naturales, impactos al ecosistema y daño a la salud (1993). Cada categoría de impacto debe tener consigo un método para la caracterización el cual describirá las consecuencias ambientales en números de determinado producto. La operación matemática será la multiplicación del resultado del inventario por el factor de categorización de la categoría de impacto a la que pertenece, dando lugar a los resultados por categoría.

De igual forma, las categorías de impacto también pueden determinar el uso de las metodologías de evaluación de impactos ambientales. Entre estas últimas se tienen a Eco Indicator 99, Impact 2002+, USEtox, IPCC 2006 y ReCiPe. Estas dos últimas son las más utilizadas y cada una cuenta con sus propias categorías de impacto. Según PRé, ReCiPe fue desarrollada en el año 2008 con la cooperación de RIVM, Radboud University Nijmegen, Leiden University y PRé Sustainability, y su idea principal es transformar el ICV en una cantidad manejable de impactos ambientales (2016). A su vez, la misma fuente afirma que esta metodología considera 18 categorías de impacto ambiental *midpoint* y 3 categorías de impacto ambiental *endpoint* que dependerán de tres perspectivas culturales: individualista (corto plazo), jerárquica (modelo consensuado) e igualitaria (largo plazo) (2016). Para el caso de la metodología *midpoint*, la respuesta es más sólida debido a la cuantificación de impactos ambientales con menos incertidumbre, pero con dificultad de comunicación al público. Además, se debe mencionar que cada categoría de impacto *midpoint* arroja valores particulares y no comparables entre sí. Mientras que, para la metodología *endpoint* se realizan modelos más complejos con mayor incertidumbre, pero resumidos en tres niveles más altos: efectos sobre la salud humana, biodiversidad y escasez de recursos (ReCiPe, 2016).

Por otro lado, la metodología de evaluación de impactos ambientales desarrollada por el *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* centra sus esfuerzos a través de la caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2020). Stocker (2014) afirma que sus resultados finales de esta categoría se basan en la contribución de estos gases a la temperatura del planeta y, si bien comparte la categoría de cambio climático con ReCiPe, IPCC tiene mayor certeza. Para obtener los resultados luego de la obtención de los indicadores por categoría, se debe apoyar en herramientas de modelamiento; de este modo, se primará el orden, la obtención de gráficos sectorizados y el mayor entendimiento de los resultados. Hoy en día, existen herramientas como TEAM, ATHENA, BREEAM, GBTool, EcoEffect, LCExplorer, BEES, EcoQuantum, SimaPro, etc; para Trusty

(2000) su elección particular dependerá del tipo de análisis y las características generales de los productos a analizar o comparar. Para esta investigación, resulta provechoso utilizar SimaPro debido a las facilidades que brinda la interfaz en comparaciones; además, se optará por trabajar con la base de datos EcolInvent pues considera datos actualizados de diversos países e inventarios de ciclos de vida diversificados (2018). De la misma forma, este software se apoya entre otras bases en USLCID, ELCD, Agri – footprint, etc; de gran uso para otros enfoques (PRé, 2016).

Por último, la Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida es una fase muy importante debido a que conlleva todo el análisis, las conclusiones y recomendaciones acorde a los resultados obtenidos del modelamiento en software como SimaPro. De igual manera, en esta fase es posible brindar limitaciones del estudio y oportunidades de mejora como medidas de mitigación que permitirán aliviar el problema apreciado luego del ACV. A su vez, se debe recalcar que esta fase lleva su mención en la ISO 14040 con detalle; sin embargo, aún existen pendientes en su definición como la falta de estandarización de los métodos de evaluación de impacto.

En general, el método ACV es una herramienta de gestión ambiental de suma utilidad debido a su aplicación en una amplia gama de tópicos con la finalidad de colaborar en la toma de decisiones y dar conclusiones acerca de los productos a evaluar. Sin embargo, aún cuenta con limitaciones producto de falta de regulaciones ambientales u otras como afinación de inventarios a la situación específica que se desea incluir en el inventario de ciclo de vida. Por lo tanto, se necesita continuar trabajando con la presión creciente de las empresas para establecer una constante aplicación de la legislación internacional. Así, el continuo interés por continuar alimentando las bases de datos de software como SimaPro o el avance en herramientas y normas voluntarias permitirá contar con mayor información, obtener resultados más precisos y plantearse nuevos proyectos; ejemplo claro: el ecoetiquetado en la Unión Europea.

Bajo preceptos de esta investigación, el punto inicial del pensamiento de ciclo de vida ocurre tras la decisión de disposición final teniendo las alternativas del tratamiento del residuo o su eliminación. En ese sentido, esta herramienta permitirá llevar el progreso de esta investigación bajo lineamientos de desarrollo sostenible y apoyado en los resultados tras la evaluación de impactos ambientales. Por tanto, la conclusión final no solo se centrará en la aprobación técnica del reciclado de agregados para la obtención de mezclas de concreto, sino también en los resultados que arroje el SimaPro producto de una evaluación ambiental realizada.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

La tecnología en la construcción ha ido mejorando en el tiempo con respecto a buscar siempre beneficios estructurales y económicos; sin embargo, el punto ambiental muy poco se ha tomado en cuenta para la toma de decisiones respecto a la elección de los mismos. Los materiales secundarios han cambiado; sin embargo, hasta el día de hoy desde 1824 (Otazzi, 2017), se sigue usando el concreto con ligeros cambios en el tipo de cemento, pero con los mismos componentes base: agregados (grueso y fino), agua y cemento.

El concreto está en todas partes debido a que se trata del segundo material más consumido después del agua (CSI, 2009); por tanto, siempre está en constante movimiento debido a que la cantidad de obras que lo requieren continúan avanzando a pasos agigantados. No obstante, los componentes del mismo representan, a su vez, una gran problemática y oportunidad de mejora; es decir, surge la gran duda en referencia a sus fuentes naturales no renovables y su disponibilidad en el futuro. El agua es un recurso cuya cantidad en peso, varía entre 9 y 11% en mezcla de concreto; por tanto, es el menor insumo de todos los materiales utilizados y debido a su ciclo natural se puede seguir utilizando. Por su parte, el cemento es un material conglomerante cuya producción es un proceso relevante desde el punto de vista ambiental pues es responsable del 5% del total de emisiones de dióxido de carbono antropogénico y del 7% de uso industrial de combustible (Boesch, 2010). Sin lugar a dudas, se trata de un gran material contaminador con un proceso muy complejo de producción debido a que envuelve un gran número de materiales, técnicas de piroprocesamiento y fuentes de combustible (Van Oss y Padovani, 2002). A pesar de ser ello, es el tercer material de mayor abundancia en lo que refiere a peso en mezcla y aun así es el mayor contaminador de los 4 insumos. Por ello y debido a sus fuentes centradas, básicamente, en caliza surge una oportunidad de mejora no solo para cuidar los recursos naturales, sino también para reducir su gran impacto negativo. Por último y no menos importante, se encuentran los agregados en la mezcla. Estos representan la mayor parte en peso de mezcla de todos los insumos, aproximadamente, 60 a 70% en peso; por tanto, justificadamente requieren un análisis. Según La Vanguardia, se registra la producción anual de 53 mil millones de toneladas entre arena y grava (2017) lo cual representa un gran agotamiento de los recursos naturales de donde provienen estos agregados para el concreto. En sí, el principal problema se centra en el cuidado de los recursos y su preservación asegurando el futuro en su disponibilidad y la no afectación al medioambiente.

En el camino a conseguirlo, surge la necesidad por buscar reemplazar estas fuentes por otras que no provengan de canteras vírgenes, sino de otros orígenes que permitan ser utilizadas y obtener calidades similares. Aquí se puede introducir, entonces, el uso de escombros provenientes de actividades de construcción y demolición como materia prima para la producción de agregados con comportamiento similar. Mediante este proceso, se aliviaría en gran cantidad la explotación de canteras y se podría aliviar la carga ambiental en la producción de concreto un porcentaje que habría que investigar y entender mediante los resultados del modelo.

Los escombros provenientes de las actividades de construcción y demolición son conocidos, a nivel general, como residuos sólidos y, a nivel mundial, toleran una gran cantidad de lineamientos y políticas para su adecuado tratamiento. Alrededor del mundo, los niveles actuales de generación de residuos sólidos son de aproximadamente 1300 millones de ton/año y se espera que para el 2025, se aumente a 2200 millones de toneladas. Es decir, esto se traduce en un aumento de 0.22kg de generación de desechos per cápita subiendo de 1.2 a 1.42 en los siguientes 15 años. (World Bank: What a Waste, 2012). Sin embargo, resulta más conveniente analizar las estadísticas por región o incluso por país debido a la relación mencionada del sector ambiental con el desarrollo económico y la tasa de urbanización. Para fines de investigación, se clasificarán los países por regiones y por ingresos. En primera instancia, se ubicarán: África (AFR), Asia Oriental y Pacífico (EAP), Asia Oriental y Central (ECA), América Latina y el Caribe (LAC), Medio Oriente y Norte de África (MENA), Organización de Cooperación Económica y Desarrollo (OECD) y Asia Sur (SAR). Por otro lado, se puede clasificar los países por ingresos como: Ingresos bajos (LI), Ingresos bajos – medios (LMI), Ingresos Medios – Altos (UMI) e Ingresos Altos (HIC).

Tabla 9: Generación de residuos per cápita por regiones

| REGION | Generación de Residuos Per Cápita (kg/cápita/día) | | | |
|--------|---|-----------------|----------|------------|
| | Límite inferior | Límite Superior | Promedio | Porcentaje |
| AFR | 0.1 | 3.0 | 0.7 | 8.6 |
| EAP | 0.5 | 4.3 | 1.0 | 12.6 |
| ECA | 0.3 | 2.1 | 1.1 | 14.6 |
| LAC | 0.1 | 5.5 | 1.1 | 14.6 |
| MENA | 0.2 | 5.7 | 1.1 | 14.6 |
| OECD | 1.1 | 3.7 | 2.2 | 29.2 |
| SAR | 0.1 | 5.1 | 0.5 | 6.0 |

Fuente: adaptación de The World Bank, 2012

Para el primer caso, se muestran los límites inferiores y superiores de las mediciones con sus respectivos promedios. Se observa que la Organización de Cooperación Económica y Desarrollo obtiene el mayor promedio de residuos/cápita con un 2.2 kg/cap/día. Estos países generan 572 millones de ton/año de residuos sólidos (The World Bank, 2012) equivalente a 1.1 a 3.7 kg/cápita/día, situándose como los responsables del 29.14% de la generación de residuos sólidos del mundo. Asia Oeste y Central, Este Medio y Norte de África y los países de América Latina y el Caribe obtuvieron un 1.1 kg/cápita/día como promedio y son los que le siguen al mayor generador. Las naciones que pertenecen al grupo LAC generan 160 millones de toneladas/año (PAHO's Regional Evaluation of Solid Waste Management, 2005) lo que equivale a 0.1 a 14 kg/cápita/día y los hace responsables del 14.57% de la generación de residuos sólidos mundial.

Tabla 10: Generación de residuos per cápita por regiones

| Nivel de Ingresos | Generación de Residuos Per Cápita (kg/cápita/día) | | | |
|-------------------|---|-----------------|----------|------------|
| | Límite inferior | Límite Superior | Promedio | Porcentaje |
| HIC | 0.7 | 14.0 | 2.1 | 44.8 |
| UMI | 0.1 | 5.5 | 1.2 | 25.6 |
| LMI | 0.2 | 5.3 | 0.8 | 16.9 |
| LI | 0.1 | 4.3 | 0.6 | 12.8 |

Fuente: adaptación de The World Bank, 2012

Si se analiza la generación de residuos per cápita de acuerdo al nivel de ingresos de las naciones, la Tabla 10 confirma que los países que tengan mayor desarrollo económico son, a su vez, los que producen la mayor cantidad de residuos sólidos/cápita/día. Los estados que pertenecen a HIC contribuyen con el 44.8% de la tasa de generación de residuos sólidos, mientras que le siguen los que pertenecen a UMI con 25.6%. Además, de acuerdo a la metodología utilizada por el Banco Mundial del año 2012, las proyecciones para el 2025 llevan a considerar que los países de LAC tendrán 1.6 kg/cáp/día de residuos sólidos, mismo valor proyectado para los países de UMI. El punto interesante de los datos estadísticos mencionados es que Perú se encuentra en los grupos de países de LAC y UMI; por tanto, se encuentra atravesando una importante alza en el promedio de la tasa de generación de residuos sólidos y esto valida su inminente crecimiento económico.

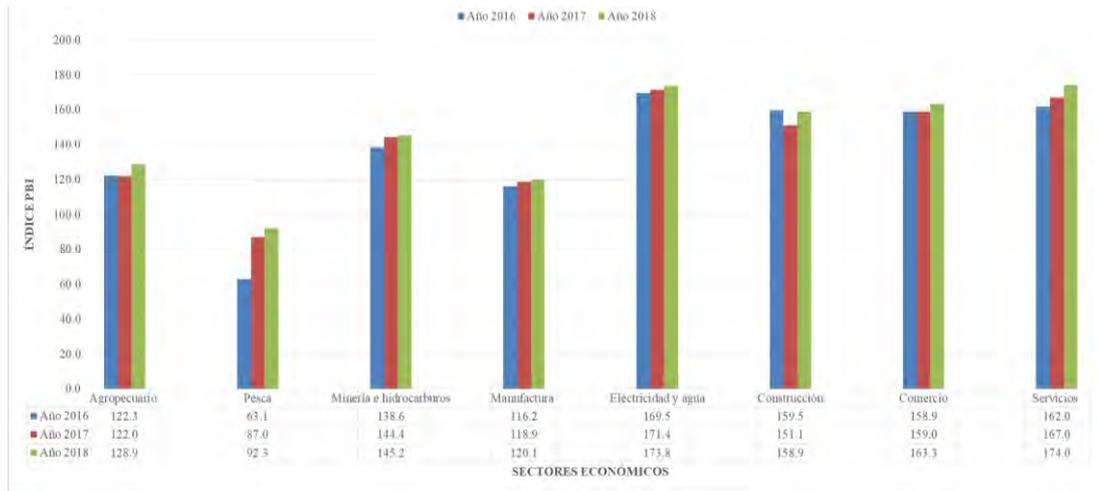


Figura 14: Índice de PBI por sectores económicos (Primeros tramos 2016-2018)

Fuente: adaptación del BCRP, 2018

A nivel nacional, los sectores de producción han continuado mostrando una tasa de crecimiento sostenida en los últimos años, viéndose esto reflejado en el índice de Producto Bruto Interno, magnitud macroeconómica que expresa la ganancia o recesión de un país (GESTIÓN, 2018). En ese sentido, los sectores más productivos como electricidad y agua, servicios, comercio y construcción también deberían llevar consigo tasas de generación de residuos sólidos a considerar (Figura 14). Debido a ello, en cada país existen planes para gestionar estas altas tasas de residuos alrededor del mundo y tablas de frecuencias que permiten controlar variaciones que puedan afectar el ambiente.

Japón, por ejemplo, es un país con gran conciencia de reciclaje y donde las políticas públicas, conocimiento impartido a la población y leyes han jugado un rol importante en el cambio de parecer de la población. Hacia el año 1980, se tenían aproximadamente 214 millones de toneladas de residuos generados en la isla nipona y una muy pobre clasificación para su adecuada gestión (Mansouri, 2017). A su vez, se tenía una sociedad consumista donde además de los problemas por altas tasas de generación de residuos sólidos, la incineración como proceso de fin de vida útil era muy común (Ministry of the Environment, 2014). La gran diferencia llegó en el paso del siglo 20 al inicio del 21 con la llegada de la nueva ideología como “sociedad de ciclo en los materiales utilizados”. Así, la aparición de documentos como “Waste Management and Recycling in Japan Opportunities for European Companies SMEs focus” (EU-Japan Centre for Industrial Cooperation, 2015) empiezan a proseguir con el cambio en la mentalidad de la sociedad japonesa. Mediante este manual, tratan el tema de la jerarquía de la pirámide invertida 3R's del cuidado de los residuos sólidos

tras su fin de vida útil y la posibilidad de introducir el concepto de ACV a ello. Es decir, este documento importante para la cooperación industrial de Europa y Japón pone por delante el pensamiento de ciclo de vida llamándolo como un “aspecto importante para las estrategias relacionadas tanto al uso sostenible de las fuentes naturales como para la prevención y reciclaje de residuos” (pp. 20,2015). En palabras sencillas, en el gigante asiático no solo se incentiva y se forma conciencia mediante la generación de conocimiento en *Waste Management*, sino que también se imparten metodologías sostenibles. De esa manera, se consiguieron cambios importantes como reducción en la generación de residuos sólidos, una adecuada clasificación y gran aumento en porcentajes de reciclado.

Por otro lado, España que es el país con un mejor planeamiento a largo plazo de tratamiento de residuos de los últimos años en Europa, también cuenta con un documento que certifica el adecuado tratamiento de residuos sólidos. De esta manera, el país hispano ha logrado incorporarse a las normas comunitarias relacionadas con la gestión y transporte de residuos a nivel mundial (BOE, 2009). En ese sentido, el nuevo documento titulado “Plan Nacional Integrado de Residuos” que comprende el periodo de 2008 a 2015, tiene novedades en cuando a legislación de suelos contaminados, residuos agrarios e industriales, RCDs, etc. Además, cuenta con estrategias de reducción de vertidos de residuos biodegradables tal que se logre reducir a lo máximo posible la reducción de GEI (pp. 3, 2015). En pocas palabras, es un país que ha construido su política de reciclado y que, actualmente, cuenta un plan muy bien marcado y encaminado que el resto de países debería imitar.

Por su parte, en cuánto a los países latinoamericanos, las situaciones son muy similares, pero a menor escala respecto a los países europeos y asiáticos. México cuenta con su propio Plan de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal (PGIRS) publicado y dado a conocer para su respectivo cumplimiento en toda generación de residuos (Gaceta Oficial, 2010). En él se pueden encontrar valores importantes a considerar como 11722 toneladas/día en generación de residuos en lo que hoy en día es Ciudad de México.

Mientras tanto, en Chile la Comisión Nacional del Ambiente (CONAMA) detalló un total de aproximadamente 20 millones de toneladas de residuos sólidos traducidos en 384 kg de residuos municipales/habitante (2009). Actualmente, la suscripción de una nueva Ley 20.920 permitió aclarar conceptos relativos al manejo de residuos (Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático, 2016) pues esta otorga

responsabilidad extendida del productor e incentiva el reciclaje frente a estos escenarios.

En otra instancia, Colombia cuenta con una generación de 3.6 millones de toneladas de residuos/día; sin embargo, su porcentaje de reciclado de 17% es muy bajo en relación a países desarrollados (MINAMBIENTE, 2017). Por tanto, hay pendientes para lograr mejorar ese bajo número enfocadas en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la OCDE. La idea nacional colombiana es generalizar el incentivo del paso a la economía circular donde no se paguen estímulos por llevar residuos a los rellenos, sino que los reciclen, traten y generen alternativas de materia prima (MINAMBIENTE, 2017).

De forma similar, Perú no es la excepción del caso, puesto que también cuenta con un Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos (2016-2024), donde se albergan estadísticas sobre la generación de residuos en el ámbito nacional. En función de ello, se pueden obtener diversa data como, por ejemplo, en el año 2014, se generó un total de 7.50 millones de toneladas de residuos urbanos municipales, de los cuales tan solo 21.4% son re aprovechables y 6.8% reciclables. Mientras que, en el año 2013, se registraron un total de 1.03 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos no municipales (MINAM, 2013). En ese sentido, también existe una brecha de economía circular y una valorización para el reciclaje debido a que incluso los porcentajes son mucho más bajos que los propios colombianos o chilenos, comparando países de la región de Sudamérica. En sí, este documento permite enfatizar el avance en el documento PLANRES y las leyes a las que se acogen desde un contexto global como al nacional. Las deficiencias que detalla este plan no solo son en data, sino también en tecnología y emplazamientos especiales para la disposición final de los residuos. El país necesita un total de 190 infraestructuras para esta actividad final; no obstante, la data encontrada solo arroja un total de 11 rellenos sanitarios autorizados al 2014 y 10 instalaciones para disposición de residuos no municipales (MINAM, 2014).

Sin embargo, a pesar que el desarrollo de políticas y tecnología para el tratamiento adecuado de los residuos sólidos generados por todas las actividades económicas a nivel mundial se ha ido acrecentando mediante sus planes de gestión de residuos, aún existe un vacío importante sobre el principal residuo para esta tesis. Los RCD, tal cual se ha mencionado antes, provienen del sector productivo de la construcción y, a decir verdad, encuentran una base legislativa solo en algunos países muy

desarrollados a nivel mundial o que ya cuentan con un avance en ello.

De acuerdo a lo dicho, España dentro de su documento PNIR (Plan Nacional Integrado de Residuos) cuenta con un anexo referente al tema, el cual es el número 6. Éste recibe el nombre de II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición y detalla el diagnóstico de la situación de estos residuos en España, su marco legal y la financiación para conseguirlo. Por si fuera poco, este país realiza mucha investigación en la rama y en ella participan diversos actores, no solo entidades públicas, sino también organizaciones particulares. Por ejemplo, según el Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrivos (GERD), al año 2003 se tenían 38.5 millones de toneladas de RCD en España (ACHE, 2006). El mismo Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) basado en las comunidades autónomas (CCAA) especifica un crecimiento de 24.21 millones de toneladas de RCD a 34.85 millones de toneladas, evidenciando un promedio de 790 kghabitante/año al 2005 (PNIR Anexo 6, 2007). En breves palabras, este país cuenta con información (estadística local), organización y sobre todo marco teórico y legislativo (Ley 10/1998 de residuos) que permite impartir, como Japón, una política pública de reciclaje sostenida. Evidentemente, esto depende de la legislación de la ciudad en la que se encuentren; sin embargo, tras lograr regular, unificar e incentivar este tipo de prácticas, el crecimiento en España se ha mantenido continuo con el pasar de los años. El anexo 6 del PNRCD incluye lineamientos obligatorios como infraestructuras necesarias para la gestión de los RCD y permite mostrar las diferentes instalaciones necesarias para la propagación de estas tecnologías. El uso de plantas fijas y móviles para el tratamiento de reciclados y posible reciclaje, vertederos controlados y plantas de transferencia son los mostrados por este documento (pp.410, 2007). En lo que refiere a planificación, cuenta con presupuesto, seguimiento, revisión, entre otros, instrumentos suficientes que podrán servir como una política a largo plazo para lograr que España, en algún momento, se encuentre entre los de mayor eficiencia en reciclaje a nivel de Europa. En ese sentido, hoy en día, se plantea como el ideal para conseguir que el nivel de reciclado de RCD aumente. Las estadísticas lo reafirman, esperando que esto siga en aumento; que pase del 25% obtenido en el 2006 (ACHE, 2006) al 40% registrado al 2015 (Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2014-2015) y así sucesivamente.

De manera similar, Alemania, considerado en su momento y hasta la actualidad como uno de los de mayor grado de eficiencia en la gestión de RCD (García Temoltzi, 2014)

ha construido su historia con este tipo de residuos tras su cierre con la 2da guerra mundial. Debido a la catástrofe de la época, García Temolzi señala que Berlín se encontraba en una necesidad de construcción de viviendas enorme y a razón de su carente fuente de materia prima, los ingenieros de la época certificaron el gran volumen de residuos generados (García Temolzi, 2014, pp. 1). Así, hasta el día de hoy, se sigue mejorando el tratamiento que se les da y continúan promulgándose leyes a favor de ello. En ese sentido, al año 2014, la Tabla 11 detalla el crecimiento del marco legal en el país.

Tabla 11: Marco legislativo para RCD en Alemania

| ANO | LEY | FUNCION |
|------|---|--|
| 1972 | Primera Ley de Eliminación de Residuos | Disposición controlada e introducción a los conceptos de prevención y separación. |
| 1986 | Prevención y Eliminación de Residuos | Principios de reciclaje e introducción a la gestión de residuos. |
| 1993 | Instrucciones Técnicas para Residuos Urbanos | Requisitos específicos para el tratamiento, reciclado y depósito de residuos. Metas establecidas para reducir la toxicidad y permitir el reciclaje. |
| 1996 | Ley de reciclaje y gestión de residuos. Ley de Promoción de Sustancias Cerradas. Ciclo de gestión de residuos y garantía de compatibilidad medioambiental. Deposito de basura. | Responsabilidad ampliada del productor, concepto de ciclo cerrado de materiales, clasificación de tratamiento de residuos (evitar, reducir, reutilizar, reciclar, depositar). Aumento en poder de cumplimiento. |
| 2003 | Ordenanza sobre Residuos Comerciales | Realizar la separación de los residuos de la empresa para su uso comercial como requisito legal. |
| 2003 | Ordenanza sobre Residuos de Madera | Requerimientos para el reciclaje o el uso de la madera vieja como energético y la prohibición de depósito en tiraderos. |

Fuente: Adaptación de Boletín sobre Buenas prácticas en el manejo de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2014.

Bélgica es otro de los países muy interesados en el desarrollo de tecnologías que favorezcan el reciclado de residuos de concreto y demolición, tal que en su informe sobre C&DW Belgium, al 2006, contaban con aproximadamente 3000 millones de toneladas de agregados en Europa (UEPG, 2006) y se posicionaban como décimos cuartos en el área. Los trabajos se basaron en la estadística firme que, de acuerdo a EUROSTAT, en EU25 se producen 3 toneladas de residuos por persona por año y que los residuos de construcción representan 1 tonelada/persona/año (2002). En suma, esto concluyó la necesidad de plantear políticas de aprovechamiento frente a la realidad del reciclado de residuos provenientes del sector construcción.

Debido a la incursión de sistemas legales respecto a la gestión de residuos, impulso del conocimiento de las 3R's y ACV; las cantidades de reciclaje en Japón no solo se han mejorado, sino que también se ha especializado. Los residuos de concreto y demolición no son excepción a la regla. Hacia los años 1995, estos representaban el 20% del total de residuos sólidos y en el año 1999, fueron reconocidos como la representación del 70% de agregado ilegal en botaderos (Ministry of the Environment, 2014). A su vez, luego de extender las responsabilidades a todos los actores participantes de trabajos de construcción y demolición, se pudo conseguir que el porcentaje de reciclado continúe en crecimiento. Una encuesta en Gestión de la Construcción por Productos lleva a afirmar, durante el 2008, que la proyección de reciclaje de residuos de construcción es 94%; mientras que, la del reciclaje de bloques de asfalto y concreto se programa en 98% a más (2008). Por lo tanto, se apunta a que estas ratios se mantengan y se regulen, adecuadamente.

Los países latinoamericanos tienen una realidad muy distinta en lo que confiere a tratamiento específico de RCD. México, mediante la publicación de tasas de generación de residuos de demolición arroja valores locales en Ciudad de México de, aproximadamente, 7000 toneladas / día (Gaceta Oficial, 2010). La norma ambiental para el distrito federal NADF-007-RNAT-2013 establece clasificación y especificaciones de manejo para RCD como un tipo de residuo especial. Chile, por su parte, clasifica los RCD como residuos peligrosos e industriales. Así, el CONAMA afirma que, del total de residuos industriales generados, el 56% provienen a residuos de construcción, mayor sector productivo aportante (2009). Asimismo, sugiere el desenlace de este tipo de residuos de acuerdo a sus características, hacia la minería en tanques de relaves, uso de áridos reciclados en construcción, entre otros (Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático, 2016). Colombia cuenta con diversos documentos nacionales que avalan el reciclaje de residuos de concreto y demolición; sin embargo, el hecho es que estos porcentajes aún son muy bajos para sus altas tasas de generación de residuos. Por ejemplo, en Bogotá, se producían cerca de 15 millones de toneladas anuales de RCD traducido a 2000kg.habitante / año (2013), valores muy por encima de sus realidades. A su vez, las tasas de 5 a 10% de reciclaje que se manejan en esa ciudad conllevan a cuestionar el manejo por parte de las autoridades y ellos respondieron de una forma particular. Según la Secretaría de Ambiente distrital, para esta ciudad se obliga a las constructoras a utilizar el 5% inicial de sus residuos y que gradualmente vaya aumentando 5% por año hasta llegar a 25%. Cualquier medida incumplida significaba una sanción de

2800 mil dólares en el 2012; en definitiva, gran oportunidad para el incentivo de reciclaje y cambio de pensamiento en la sociedad colombiana.

En Perú, la situación es un poco diferente debido que hay deficiencia de información unificada a nivel nacional lo cual ajusta las ratios de reciclaje y las cantidades aproximadas. Según el MINAM, la producción anual de RCD proveniente de residuos municipales bordea los 5.03 millones de toneladas, valor que crecería sustancialmente luego de completar la data debido a la falta de integración de residuos no contabilizados. A partir de ahí, el valor de 0.7 millones de toneladas recicladas en el país queda corto; por tanto, la tasa de reciclaje de RCD del Perú de 14% (2014) cambiaría ligeramente tras la actualización en la investigación. En el país, mediante el DS N° 003-2013-VIVIENDA, se aprobó el Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de Construcción y Demolición. El objetivo principal de la inserción de este manual es mejorar en cuanto a la toma de datos sobre estas generaciones y controlar la disposición final que se le dé. Mediante el amparo del Artículo N°8 de la Ley N° 27314 de la Ley de Residuos Sólidos se logró entonces regular el funcionamiento y extender las responsabilidades desde el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento hacia el sector privado. Asimismo, en el Artículo 7 del DS se concluyó una clasificación general de los mismos en: residuos peligrosos y no peligrosos (2013) insertando base legal y mecanismos de coordinación regulados para su adecuado funcionamiento (MINAM, 2016). Luego, en el año 2014 se revisó y aprobó una Norma Técnica Peruana elaborada desde el 1999 titulada “Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción”. Esta norma permitió adoptar una adecuada caracterización y clasificación especializa de los RCD (excedentes de remoción, excedentes de obra, escombros y otros residuos) tomando como base la legislación suiza y alemana. Además, la NTP consiguió que dentro de los escombros exista una sub-clasificación de acuerdo al origen: concreto de demolición, material no bituminoso, material de demolición no clasificado y mezcla asfáltica de demolición (2014). Finalmente, en el año 2016, se adoptó un último DS que modifica el Reglamento de Gestión y Manejo de los RCD con el número 019-2016-VIVIENDA. Su único objetivo de no desligar del todo al Ministerio de Vivienda y de incentivar a la práctica regulada del reciclaje permitiría empezar por adoptar un nuevo comportamiento como sociedad. Dentro de ello y tras una breve definición en su publicación como Decreto Supremo en el año 2013, se insertó por primera instancia en el Perú, el concepto de concreto reciclado.

El concreto reciclado es referido como un avance en el área de uso de materiales sostenibles debido a que su reciclaje puede radicarse en el cemento o en los agregados. El uso de áridos reciclados en mezclas de concreto, caso conocido e importante para esta investigación, ha continuado mejorando con el pasar del tiempo. Si bien, para algunos países este tema es relativamente nuevo, para el comité del American Concrete Institute (ACI) es un tema conocido con amplia investigación en los años 1900. Existe diversa literatura de autores como Hasen, Kasai, Mukai, Rasheeduzzafar, entre otros, quienes publicaron diversas investigaciones sobre la posibilidad de uso de mezclas de concreto con áridos reciclados e incluso certificando las diferencias en propiedades mecánicas. Todo ello fue recogido por el comité 555 de ACI y publicado en un manual titulado "Removal and Reuse of Hardened Concrete" con la finalidad de reunir todas las investigaciones de la época y brindar datos referenciados a los interesados (2001).

Asimismo, en los últimos 5 años, la comunidad científica ha cumplido un rol muy activo en el crecimiento de literatura sobre el tema, planteando el uso de RCD en agregados gruesos reciclados y encontrando grandes ventajas ambientales y económicas por encima de sus similares convencionales. Por ejemplo, según la USGS el precio de cada tonelada de AGR se encontraba en el rango de 1 a 18 dólares, según sus áreas (2000); hoy en día, produce un ahorro de 60% por su uso en lugar de AGN (Environmental Council of Concrete Organization, 2018). De igual manera, en el ámbito técnico, se han continuado desarrollando investigaciones científicas basadas en ensayos comparando las propiedades mecánicas de los agregados naturales junto a sus pares agregados reciclados. Esto se realizó con la finalidad de disminuir cualquier afección causada por bajas en resultados de propiedades mecánicas y mejorar su calidad con diversas estrategias. Verian et al. (2018) propuso, por ejemplo, compensar los puntos débiles del uso de agregados reciclados con el uso de materiales cementosos suplementarios (SCM): ceniza volante (fly ash), cemento de escoria, humo de sílice y metacaolín; entre otros. De la misma forma, planteó utilizar técnicas de optimización de mezclado como el enfoque de mezcla de dos etapas, enfoque de mezcla de mortero, enfoque de mezcla envuelto en arena (2018). Por último, brindó recomendaciones más sencillas como reducir el mortero en los AGR, modificar el diseño de mezcla para agregar cemento y agua, y limitar el porcentaje de AGR en las mezclas de concreto (Verian et al., 2018). Entre otras, se pudieron encontrar el uso de puzolana o el recubrimiento de superficies de AGR con polvo puzolánico (Shi, 2018), la tecnología de modificación de superficies (Choi et al., 2016), el agregado de concreto reciclado autoreparable

de Gesoglu et al., (2015), la presaturación del agregado grueso (Pickel et al., 2017) y la incorporación de fibras variadas en las mezclas de concreto reciclado (Katkhuda y Shatarat, 2017). Por lo tanto, existen muchos planteamientos para apostar por el uso de agregados reciclados en mezcla; de modo que, se puedan enfrentar sus posibles bajas en propiedades mecánicas.

Por su parte, el uso de herramientas de gestión ambiental como el ACV para la determinación de impactos ambientales en la producción de concreto reciclado se ha venido facultando, incluyendo cada vez más procesos al sistema a evaluar como las trituraciones en su producción y el transporte. Tal es el caso de una reciente investigación en Francia, donde se cuantificaron los contaminantes para tomar una decisión de uso sobre la importancia de los residuos de concreto y demolición en la producción de nuevos agregados reciclados por encima de los convencionales (Serres et al., 2016). Los resultados de la misma concluyeron que los indicadores de impacto del concreto con AGR son significativamente inferiores a las mezclas con AGN y muy cercanos a las muestras de hormigón con agregado mixto: AGR + AGN. (2016). De forma similar, en Italia también se utilizó el ACV para comparar diversos casos de estudio entre el reciclaje de residuos de concreto y demolición como AGR en nuevas mezclas de concreto versus su almacenamiento en rellenos sanitarios. En esta investigación, se demostró que la simulación más contaminante fue el escenario con el material completamente almacenado en el relleno sanitario. A su vez, los resultados destacaron que a mayor AGR en mezcla, el impacto aumentaba sin llegar a superar a su similar de concreto convencional (Farina et al., 2020).

Del mismo modo, en Perú se han realizado investigaciones relacionadas en el ámbito ambiental; particularmente, sobre prácticas sostenibles en el sector de la construcción. En el 2014, se realizó una tesis en la que posibilitó el uso de concreto estructural en mezcla, mencionando casos de emplazamientos demolidos para nuevas edificaciones y evidenciando la existencia de materia prima para su uso en posteriores mezclas de concreto (Montoya, 2014, pp. 54). Incluso, la autora luego de su debida revisión de la literatura, comprobó que, aunque existan normativas extranjeras y regulaciones que condicionan las cantidades máximas de AGR en concreto reciclado estructural, se debería promover su investigación y uso pertinente; no sin antes realizar una evaluación ambiental para determinar sus impactos frente a su disposición en botaderos informales, como el caso capitalino (Montoya, 2014, pp. 54). Posteriormente, en el 2017, se llevó el uso de concreto reciclado como caso de estudio a la Región Piura, norte del Perú, utilizando un modelo basado en agentes

(MBA); de modo que, se identifiquen todos los stakeholders que intervienen en las decisiones tomadas en el sector de la construcción para su aplicabilidad en el contexto de la región norteña (Portocarrero, 2017). Como parte de las conclusiones, el modelo corroboró que aplicar campañas de concientización enfocadas solo a formuladores de proyectos junto con pequeñas diferencias de precio sobre su similar concreto convencional, sería suficiente para activar la demanda de concreto reciclado en los proyectos de construcción (2017). Sin embargo, según Portocarrero los resultados aún evidencian limitaciones en información de recolectores, reputación de los tomadores de decisiones y condiciones económicas del sector (Portocarrero, 2017). Así como, la viabilidad ambiental del uso AGR en nuevas mezclas se condiciona por la cercanía entre las plantas de tratamiento de RCD y las plantas de concreto (Vieira et al., 2016). Recientemente, Tocto (2020) realizó una investigación utilizando el ACV para analizar las emisiones de otro material ecoamigable frente a su par convencional; en su revisión literaria, logró identificar resultados de análisis de escenarios en procesos de varios sistemas en los que el uso de materiales ecoamigables como cemento con fibras de vidrio, ladrillos artesanales y adoquines reciclados resultaban ventajosos (2020). Entre ellos, 2 estudios en los que el concreto reciclado resultaba favorable. En la primera investigación realizada en EEUU, se concluyeron reducciones en 16% de acidificación, 17% de formación de smog y 37% en impacto de transporte hacia la planta de producción frente al uso de su par natural; siempre y cuando, se incluyan en el sistema convencional los impactos evitados de transporte al vertedero y el proceso de vertido de RCD a botaderos luego de la demolición (Yazdanbakhsh et al., 2017). Por su parte, el segundo escenario también incluyó en el sistema del concreto reciclado, los impactos evitados en los procesos de eliminación de RCD; así como, el proceso de recuperación de chatarra de acero (Knoeri et al., 2013). De esa forma, se obtuvieron reducciones por el uso de concreto reciclado en 70% de los impactos ambientales, aproximadamente, usando la metodología de Ecoindicador 99 (2013).

En Perú, existen algunas empresas dedicadas a la investigación y producción de materiales sostenibles; entre ellas, CICLO, quienes ofrecen Adoquines Tipo I y II, Ladrillo KK 18H, bloques de concreto y agregados reciclados, (2021); y CAJAS ECOLÓGICAS, quienes primero ofrecen la gestión integral de residuos, entre ellos, los RCD; y luego la construcción de pistas, veredas y losas deportivas de baja resistencia (CICLO, 2021). Sin embargo, aún existe la brecha en investigación y data en concreto estructural. Como base científica, se han establecido estándares de regulación en porcentajes máximos de AGR en mezcla para conservar sus

propiedades mecánicas. Por ejemplo, la normativa española (EHE), belga (CEN), inglesa (BS 8500-2, 2006), holandesa (CEM) y el RILEM (1994) exponen como máximo un 20% en peso. Por su parte, la australiana permite hasta un 30% en mezcla (WBCSD, 2009) y la alemana 25% en volumen (DAfStb, 1998). Mientras tanto, la de EEUU lo limita a un 10% (NRMCA, 2007) e igualmente la japonesa (Malešev, 2014) quienes, debido a su situación sísmica, restringen un poco más el tema. Por lo tanto, de ahí surge la brecha de conocimiento aún en porcentaje máximo permitido para normas peruanas y resulta importante investigar en el área hasta estandarizar el rubro mencionado y apostar por el concreto estructural con AGR provenientes de RCD, en un contexto local.



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la metodología de este proyecto se rige bajo la siguiente hipótesis: la aplicación de concreto reciclado en el Perú resulta factible en la parte técnica y favorable ambientalmente, generando menores emisiones de GEI e impactos ambientales que el concreto convencional, incluso para fines estructurales, con porcentajes de agregado reciclado menores a 20%. De acuerdo a ello, el objetivo general de la presente tesis es contribuir con la implementación de materiales sostenibles como el concreto con niveles variados de agregado reciclado demostrando su eficiencia ambiental frente a procesos de producción del concreto convencional. Para llevar a cabo dicha tarea, se tendrán en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Efectuar una comparación entre normativa internacional y legislación peruana sobre residuos sólidos para la elaboración de concreto reciclado.
- Aplicar la legislación e informes técnicos previamente revisados para concluir tres casos de porcentaje de agregado reciclado (10%, 15%, 20%) y compararlo con tres calidades similares en concreto convencional.
- Evaluar ambientalmente mediante la metodología del ACV cada caso de concreto reciclado y su respectivo análogo de concreto convencional. Es decir, se centrarán los esfuerzos en calcular los impactos ambientales generados por la producción tanto del concreto reciclado como convencional.
- Proponer medidas de reducción de emisiones para cada caso de porcentaje de agregado reciclado en concreto.
- Plantear opciones de mejora y optimización para el concreto mediante el uso de agregados reciclados y enfocarlo en políticas públicas vinculadas al sector.

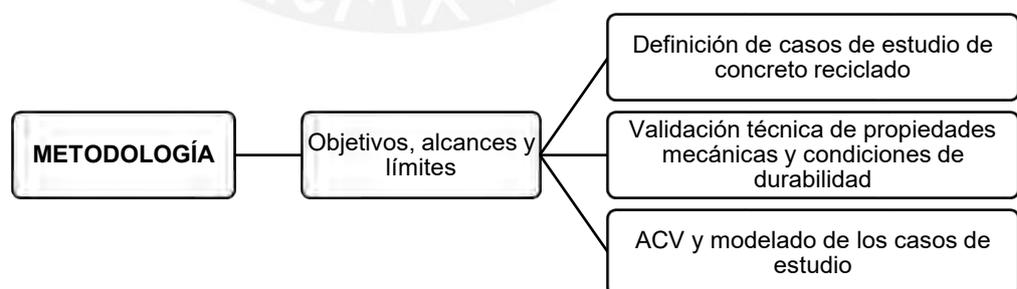


Figura 15: Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

4.1. Descripción de los casos de estudio

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en el contexto peruano, aún se tiene mucho por trabajar respecto a legislación y normativa específica que rija el uso de concreto con distintos porcentajes de agregado reciclado. Por tanto, acorde a la normativa europea y al contraste nacional realizado en los capítulos anteriores, se ha procedido a limitar los tres casos de estudio que se evaluarán en la presente investigación:

Tabla 12: Casos de estudio de la presente investigación

| CASOS DE ESTUDIO | DOSIFICACIÓN EN PESO DE AGR Y AGN | | RESISTENCIA y TIPO DE CEMENTO | USO |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 10% Árido grueso reciclado (AGR) | 90% Agregado grueso natural (AGN) | 280 kg/cm ² Cemento Puzolánico IP | Hormigón estructural expuesto a condiciones de ataque de cloruros y sulfatos. |
| 2 | 15% Árido grueso reciclado (AGR) | 85% Agregado grueso natural (AGN) | 210 kg/cm ² Cemento Tipo I | Hormigón estructural |
| 3 | 20% Árido grueso reciclado (AGR) | 80% Agregado grueso natural (AGN) | 140 kg/cm ² Cemento Tipo I | Carreteras, terraplenes y rellenos |

Fuente: Elaboración propia

Para explicar la elección de estos tres casos de estudio, se debe recurrir a los datos obtenidos por la comparación entre normativas tanto de generación de RCD como de porcentajes de agregados reciclados en mezcla. Entre los datos principales, se han tomado en consideración 09 países incluido el Perú, los mismos que justificaban su elección en base a los siguientes factores primordiales:

- (a) Representatividad en el continente en el que se encuentran
- (b) Producción anual de RCD
- (c) Porcentaje reciclado

Estos dos últimos factores representados en millones de toneladas y expuestos en la Figura 16 y Figura 17 que, a continuación, se presentan. En ese sentido, los países elegidos fueron: Bélgica, Alemania, Francia, Gran Bretaña, Holanda y España (Europa); Estados Unidos y Perú (América) y Australia (Oceanía).

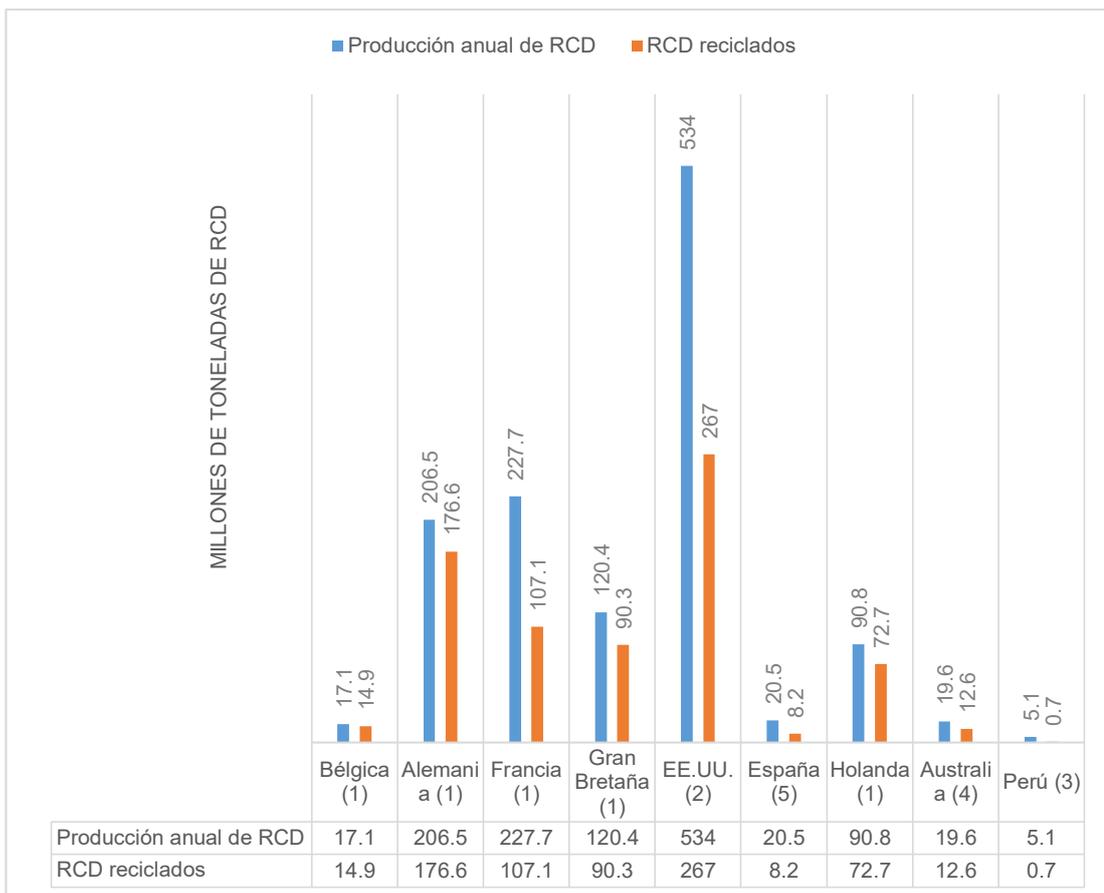


Figura 16: Producción anual y reciclado de RCD en millones de toneladas de países seleccionados

Fuente: Elaboración propia adaptados de: ¹EUROSTAT: Generation of waste by economic activity (2014). ²Environmental Protection Agency 2014). ³Decreto Supremo N° 003-2013-Vivienda: Decreto Supremo que modifica el Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición. ⁴ Departamento de Medioambiente y Energía: Informe de estado de residuos de construcción y demolición (2014-2015). ⁵Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición: Informe de producción y gestión de RCD en España (2014-2015).

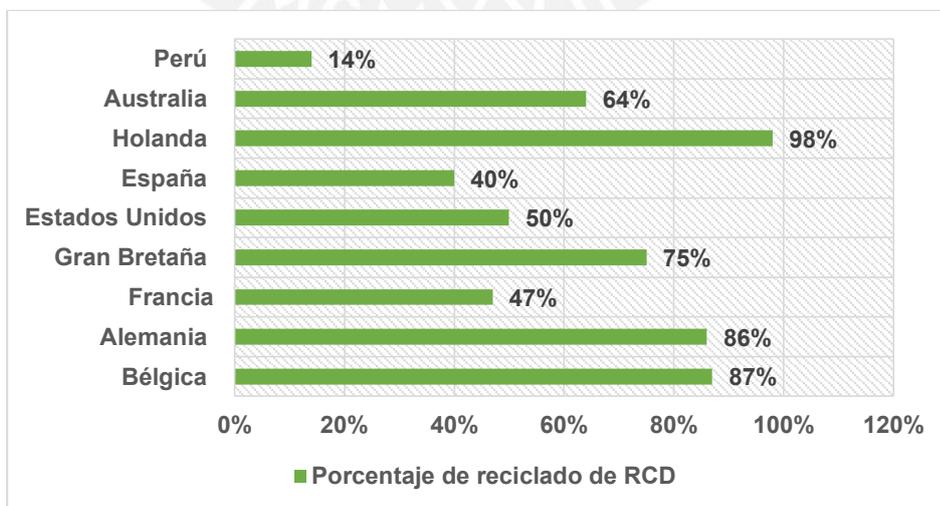


Figura 17: Porcentaje de reciclado de RCD

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, luego de haber seleccionado los países con mayor tasa de generación de RCD y sus respectivos porcentajes de reciclado, se debe considerar la evaluación de sus normativas. Por lo tanto, se optó por corroborar los máximos porcentajes de agregados reciclados permitidos en mezcla de concreto, de acuerdo a los lineamientos particulares; y los resultados se exponen en la Tabla 13.

Tabla 13: Porcentaje máximo óptimo permitido de árido reciclado en peso

| NORMATIVA | Porcentaje máximo permitido de árido reciclado en peso sin afectar sus propiedades mecánicas |
|---|---|
| ESPAÑOLA (EHE) | 20% |
| JAPONESA | 10(con absorción de 7-13%)-15% |
| RILEM (Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción) | 20% |
| BELGA | 20% |
| INGLESA | 20% |
| ALEMANA (DIN) | 35% (ambientes no agresivos) y 25% (altamente agresivos) |
| HOLANDESA | 20% |
| ESTADO UNIDENSE | 10% |
| AUSTRALIANA | 30% |

Fuente: Elaboración propia de norma de cada país.

En definitiva, se evaluaron las normativas referentes a casi todos los países considerados en la Tabla 13, salvo dos importantes a mencionar. Con respecto a Francia, se apeló a su proximidad y a su situación semejante a Bélgica para optar por omitirla e introducir la normativa de un nuevo ente, RILEM. La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción ("*RILEM*" en francés) publicó información valiosa que debe ser incluida en esta tesis. Por su parte, no se consideró la normativa peruana debido a que aún no se tienen ni investigaciones en el tema ni datos suficientes. En lugar de Perú, se referenció la normativa japonesa, principalmente, por la semejanza entre sus factores sísmicos. De forma clara, se puede apreciar una tendencia a establecer como máximo un 20% de agregado reciclado en peso en una mezcla de concreto; por tanto, este valor se ha tomado como último caso de estudio, específicamente, como porcentaje máximo. En cuanto a los otros dos casos, se referenciaron las situaciones de EE.UU. y Japón, situando 10% y 15% como los otros dos porcentajes de árido reciclado a evaluar.

CASO DE ESTUDIO 1: 10% AGR + 90% AGN

El primer caso de estudio es el más exigente dentro de los tres posibles. Se buscó generar este tipo pues también las normativas internacionales como la alemana (DIN) trabajan con porcentajes máximos en ambientes agresivos. Sin embargo, al ajustarlo al debido contexto nacional, se optó por elegir un 10% AGR + 90% AGN.

El uso para el que se propone es referido a un hormigón estructural expuesto a condiciones de ataque de cloruros y sulfatos; es decir ambientes agresivos. Por ende, este caso de estudio se contrastará con un concreto para elementos estructurales de edificaciones (vigas, columnas, losas y placas) de 280 kg/cm². En ese sentido, se optó por utilizar cemento puzolánico IP en la dosificación de concreto para evitar los daños corrosivos al acero por el ataque químico y posible carbonatación.

CASO DE ESTUDIO 2: 15% AGR + 90% AGN

Para determinar este caso de estudio, se ha tomado como referencia el factor sísmico de Japón y su norma, donde exponen un porcentaje máximo permitido de 15-20% de agregados reciclados en mezcla. Por tanto, debido a su similitud de sismicidad, se eligió 15% de AGR + 85% de AGN.

El uso para el que se propone es referido a un hormigón estructural para edificaciones; por lo tanto, su caso de contraste será concreto estructural de edificaciones (vigas, columnas, losas y placas) de 210 kg/cm².

CASO DE ESTUDIO 3: 20% AGR + 80% AGN

Este caso de estudio puso en evidencia el máximo porcentaje permitido contrastado en todas las normativas a nivel mundial; es decir, el 20% de agregado grueso aun asegurando las propiedades mecánicas y las condiciones de durabilidad. No obstante, por factores de seguridad, se pretende lograr un concreto de baja resistencia destinado a carreteras, terraplenes y rellenos. De ese modo, a pesar de tener dos opciones como concreto ciclópeo 1:6 (cemento: hormigón) + 30% de P.G. de cimientos corridos de 140 kg/cm² o un concreto premezclado de la misma resistencia, se elegirá el segundo para uniformizar las condiciones comparativas.

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 previamente nombradas. De acuerdo a ello, esta herramienta de gestión ambiental conlleva cuatro fases de implementación: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados.

4.2.1. Definición de objetivos y alcance

Para enfocar de forma adecuada la evaluación ambiental, a nivel general, se debe tener en cuenta la especificación de objetivos sobre los que se desee trabajar y el alcance hacia donde se pretenda llegar con los resultados obtenidos. Según Matthews, la normativa internacional ISO sugiere que en este primer paso se incluya: (a) la aplicación prevista, (b) las razones para llevar a cabo el estudio, (c) la audiencia y (d) la posibilidad de publicar los resultados de forma comparativa. Por tanto, estos componentes serán respondidos a lo largo del ACV donde incluso se podrá ir completando detalladamente el alcance y los objetivos (pp.81, 2013).

De forma específica, en primera instancia, la definición de la unidad funcional es de suma importancia pues el inventario, modelo y todos los resultados se darán en función a ella y permitirá contrastarlos para todos los casos particulares de estudio. Luego de ello, se deben definir los límites del sistema a estudiar. Estos permitirán conocer qué puntos de todo el proceso se van a tratar pues podrían considerarse sistemas variados como los de cuna a tumba, puerta a puerta, puerta a tumba u otros.

4.2.1.1. Objetivo principal y Alcance

El concreto reciclado, de forma cualitativa, se muestra como una variante favorable que permite a las empresas adoptar medidas ambientalmente adecuadas con su implementación. Sin embargo, los resultados cuantitativos obtenidos, tras el desarrollo de este proyecto, son los que permitirán esclarecer cualquier duda que se anteponga a la toma de decisiones importantes en relación a los materiales de construcción utilizados. Es decir, esto permitirá que las empresas interesadas decidan apostar por el concreto reciclado o continuar trabajando mediante el método convencional de producción de concreto. El capítulo anterior comprobó que la actualidad del concreto reciclado es casi nula debido a la falta de estudios, tecnología, interés y leyes que permitan avalarlo. Si se desearía buscar información al respecto, simplemente se hallaría su definición y la muestra de ser una opción para los decretos supremos, aunque su implementación no sea del todo respaldada. Por ende, se necesita desarrollar investigaciones afines y este proyecto responde a ello.

En ese sentido, el objetivo principal de este estudio es comparar los impactos ambientales generados por la producción y transporte de los materiales constituyentes tanto de las diferentes mezclas de concreto reciclado como las de concreto convencional.

El concreto reciclado es aquel cuyos agregados provienen parcial o completamente de granulados de concreto, gravas y/o arena de reciclaje (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016) y tiene implicancia en otros sectores. Es decir, cualquier medida de implementación de estos materiales sostenibles va a ser antecedente claro y repercutirá no solo en construcción, sino también en minería e hidrocarburos, electricidad y agua, manufactura, comercio y otros servicios.

El alcance de este estudio; según lo expuesto, sería trascendental pues reforzaría la toma de decisiones en favor a los mecanismos que reduzcan los impactos ambientales y su extensión iría más allá de lo económico. En cuanto a la política nacional, la supuesta inversión en concreto reciclado permitiría ampliar el desarrollo de reformas y planes medioambientales en un estado peruano carente de decretos y leyes en ese ámbito.

Por su parte, en caso se demuestre en la presente investigación, la suplantación de agregados convencionales por reciclados permitiría cierta reducción en consumo energético y uso de diésel, menor uso de recursos naturales y creación de empresas interesadas en ello. Además, significaría la creación de una política nacional de reciclaje mucho más desarrollada, cumpliendo sus compromisos plasmados en el acuerdo de París.

4.2.1.2. Función y Unidad funcional

El beneficio del uso de hormigón reciclado deberá ser probado mediante una serie de comparaciones cuantitativas que aseguren su ventaja ambiental, en lugar de un decremento en calidad para cada caso de estudio. Para ello, se tomará en consideración que la unidad funcional escogida para el análisis será un 1 m³ de concreto producido con su específico esfuerzo de compresión. Esto se ampara en que la resistencia a compresión a 28 días (f_c) es la propiedad más apreciada y utilizada en el diseño de elementos estructurales de concreto (Yazdanbakhsh, 2017); por lo tanto, se considerará en las dosificaciones para cada caso de estudio.

Además, la determinación de los resultados se realizará en base a 2 metodologías de evaluación para profundizar el análisis: IPCC 2013 GWP 100a y ReCiPe 2016 Midpoint Hierarchist (H). De esa forma, se podrá visualizar la carga ambiental considerando los límites del sistema, no solo analizando las emisiones de GEI, sino de las otras 17 categorías de impacto que ReCiPe permite especificar.

4.2.1.3. Límites del sistema

El presente estudio resulta ser muy interesante debido a que implica el análisis de dos sistemas de producción por separado que terminan relacionándose para el desarrollo del presente análisis de ciclo de vida comparativo. En primera instancia, se debe tener en cuenta que la base sobre la que se trabajará será el ciclo de vida de una edificación. En ese marco, el sistema que se armará para la posterior evaluación ambiental, iniciará con la demolición de una edificación, luego de haber concluido su tiempo de vida útil. Además, se indicará el uso de los residuos de concreto y demolición (RCD) como áridos reciclados.

La Norma ISO nombra los proyectos de análisis de ciclo de vida, de acuerdo a sus límites; por tanto, si su sistema va desde la obtención de la materia prima hasta su disposición final, se le conocerá como cuna a tumba (*cradle to grave*) (14044, 2006). Para este proyecto, por tratarse de un estudio que, básicamente, se centra en un sistema compuesto por la elaboración de concreto ya sea reciclado o convencional y que va desde la demolición de un edificio hasta la producción misma del material aglomerante, se definirá como cuna a puerta (*cradle to gate*). En palabras sencillas, va desde la obtención de la materia prima hasta la finalización de su mezcla.

Para los casos de estudio del tipo convencional, se trabajará bajo los estándares de producción de agregados pertenecientes de canteras, aplicación de procedimientos convencionales para la obtención de cemento, consumo de agua y mezcla de concreto. Para su caso contrario, se mantendrán los procesos de cemento, agua y agregados finos; sin embargo, no será el mismo para la producción de agregados gruesos debido a que se trabajará con áridos provenientes del reciclaje de los residuos de demolición.

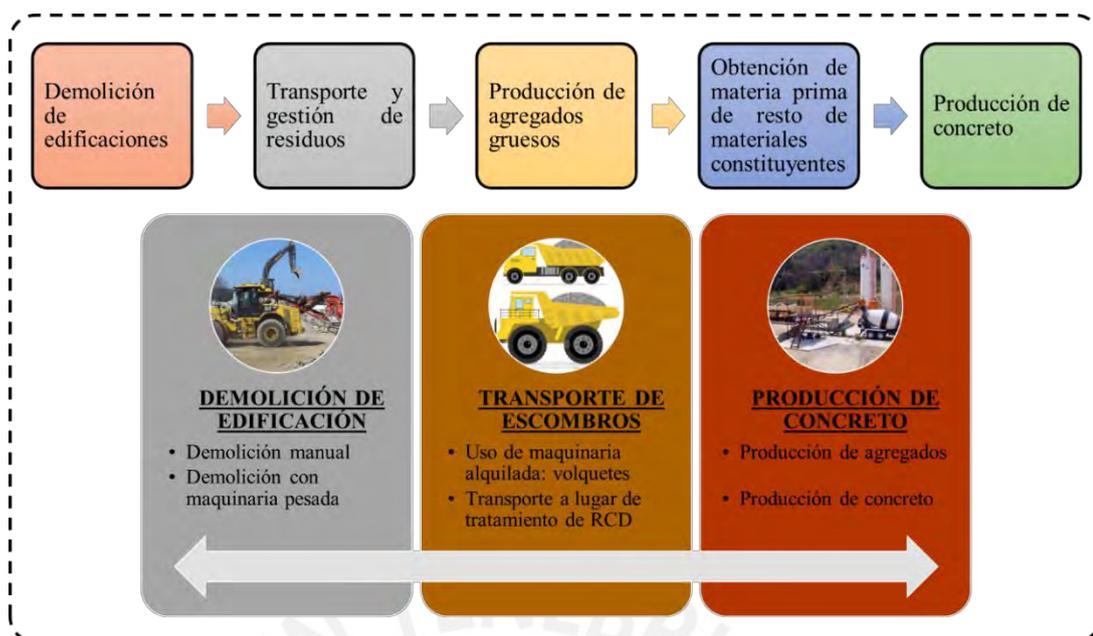


Figura 18: Límites finales del sistema a evaluar ambientalmente

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, los límites del sistema expuestos en la Figura 18 se centran básicamente en tres procesos de suma importancia para la formulación del inventario de ciclo de vida: demolición de edificación, transporte de escombros y producción de concreto. Se apreciará, posteriormente, la incidencia de cada uno en las entradas (combustible, energía, agua) y salidas del sistema (emisiones, consumo de recursos).

4.2.1.4. Recolección de información

Para el desarrollo de este proyecto, se recurrió a diversas fuentes de información que permitieron llegar a los mejores resultados con la finalidad de asumir la menor cantidad posible de datos para evitar dispersión y variación. No obstante, existen otros datos referenciados que fueron determinados haciendo uso de factores de esponjamiento o factores de conversión, densidades, potenciales caloríficos y magnitudes similares en condiciones estándares de trabajo.

Se debe enfatizar que la unidad funcional elegida para el ACV es coherente con las dosificaciones de los casos de concreto reciclado y convencional. Para ambas mezclas, se utilizaron los insumos (agua, agregado fino y agregado grueso) de la base de datos Ecolnvent del software SimaPro. Mientras que, para el caso del cemento, se utilizó como dato su modelo de producción realizado para la investigación "Producción de cemento en Perú: comprensión de los impactos

ambientales relacionados con el carbono y sus implicaciones políticas. Conservación y Reciclaje” por Vázquez-Rowe, et al. (2019). A su vez, para los casos de concreto reciclado, se creó y aplicó el proceso “producción del árido reciclado” en las mezclas.

4.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida (LCI)

La fase de análisis del inventario de ciclo de vida (*Life Cycle Inventory*) es la segunda fase del ACV y considera toda la gama de datos de entrada y salida con respecto al sistema que se ha optado por analizar (ISO, 2006). Según Matthews, la importancia de la definición de la lista exacta de consumo de materia, energía y emisiones se centra en que el análisis no necesita considerar el universo potencial de entradas y salidas (Matthews, 2013, pp. 90). Es decir, la lista de “inputs / outputs” deberá permitirle al lector comprender la razón por la que se eligieron los límites del sistema y unidad funcional e incluso facilita el entendimiento sobre por qué se lleva a cabo el estudio delimitando su alcance (Matthews, 2013).

El mismo autor recientemente mencionado afirma que está implícito en el contenido del análisis del inventario de ciclo de vida la consideración de un gráfico que explique de forma general los flujos de entrada y salida en los límites del sistema (ISO, 2006). Por ende, se procedió a realizarlo en la Figura 19 para el entendimiento de los lectores y asociar de forma debida los valores numéricos a presentar con sus respectivas fases de estudio.



Figura 19: Entradas y salidas en sistema a evaluar

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo mostrado, se necesitarían todos los datos que conlleven a hallar valores cuantitativos que permiten numerar las entradas y las salidas del sistema. Dicho de otro modo, se necesitará ingresar al modelo valores numéricos de kilogramos de diésel, kilogramo de cemento (materia prima) o litros de agua. En contraste con ello, las emisiones obtenidas también serán cantidades de acuerdo a

las categorías de impacto elegidas. De antemano, se pueden obtener de forma más sencilla los de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) como parte del consumo de acetileno y oxígeno de ciertos equipos usados para la demolición. De igual manera, el material particulado, el consumo de electricidad y diésel. En síntesis, la información que se presentará en el inventario será de carácter cuantitativo y significará la base de datos sobre la que se realizará la evaluación de impactos; por tanto, se necesita mucha precisión en su recolección.

Para empezar, se analizarán las fases de demolición de edificación y el transporte de escombros. Para ello, se tomarán en cuenta los datos del edificio demolido del antiguo pabellón B de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ubicada en Av. Universitaria 1801, en el distrito de San Miguel, Lima, Perú. Esta información fue recogida del proyecto de tesis “Análisis de Eco-eficiencia de la demolición de una edificación en Lima” y se usará para complementar esta investigación. El pabellón B se encontraba ubicado, aproximadamente, en las coordenadas UTM: 18L 273639 8664547 y el proyecto fue realizado por Edifica quienes, a su vez, subcontrataron a otras empresas para el transporte de escombros (Aguilar y Loo, 2017, pp. 49). Según la misma fuente, las labores se culminaron en un plazo de 30 días, finalizando el 28 de mayo del 2014 y ocupando 656 m² como área de terreno (Aguilar y Loo, 2017).

Durante la fase de demolición, se utilizaron maquinaria pesada, equipos manuales y equipos de protección personal (EPP); sin embargo, únicamente los dos primeros serán de valor para el sistema por sus necesidades funcionales de combustible y electricidad, respectivamente. Como maquinaria pesada, se trabajó con una excavadora hidráulica CAT 330D L, volquetes Volvo de 17 m³ D11 A370 y camiones cisterna DMC de 5000 gal; los dos últimos con motor EURO3. Asimismo, los equipos manuales usados fueron martillo demoledor eléctrico BOSCH GSH27, equipo de oxicorte para oxiacetileno de espesor 25.4 mm de metal y amoladoras de 9". Así, con la excavadora hidráulica se avanzó de forma descendente rompiendo vigas y losas; mientras que, con los equipos manuales se realizaron cortes focalizados; por ejemplo, el equipo de oxicorte para el acero (Aguilar y Loo, 2017, pp. 51).

Como se mencionó en capítulos anteriores, mantener una homogeneidad en los RCD es vital en su calidad; por tanto, se debe hacer énfasis en que la demolición se hizo por trabajos de remodelación y no debido al final de la vida útil del mismo edificio. Esto permitió separar manualmente puertas, ventanas y cualquier otro elemento potencialmente reutilizable (Aguilar y Loo, 2017, pp. 51). De esa forma, los materiales

separados generarían valor económico para el cliente y permitirían disminuir la cantidad de contaminantes en los residuos finales demolidos.

Por su parte, durante la fase de transporte de escombros, se hizo necesario controlar la generación de polvo por demolición y movilización de escombros mediante el regado directo haciendo uso de 3 cisternas, según datos técnicos, y volquetes. Por lo tanto, la empresa Edifica subcontrató a Volquetes Maquinarias S.A. quienes aportaron con volquetes Volvo de 17 m³ y cisternas DMC de 5000 gal. Entonces, con las cisternas se humedecería el volumen de escombros con la finalidad de minimizar las emisiones de material particulado (Aguilar y Loo, 2017, pp. 51). Una vez recolectados los RCD, se transportarían desde PUCP hacia la planta de reciclaje donde se daría inicio a la fase de producción de concreto. Se debe recalcar que fue necesario buscar datos de potencia, energía, consumo de diésel, oxígeno y acetileno referentes a la maquinaria utilizada para la formulación completa de *inputs* de las dos primeras fases. A pesar de contar con los nombres de la maquinaria, la falta de precisión en los modelos llevó a realizar algoritmos que permitan obtener valores de potencia, consumo de combustible y energía por hora; estos resultados se pueden verificar en la Tabla 14.

Para el caso de la excavadora hidráulica, se consultó en catálogos de la empresa CATERPILLAR siguiendo el nombre de la máquina especificado. Se revisó el dato del modelo CAT 330D L logrando obtener el valor de 200 kW de potencia neta, lo que se traduce a 269 caballos de fuerza (H.P.) (CAT, 2007).

Para el caso de los volquetes, se verificó que la mayoría eran de 17 m³, de modelo FMX 6x4R y usaban motor D11 A370 EURO3. Por ende, al revisar los datos técnicos, se obtuvo el valor de 369 HP y como resultado semejante, 275 kW (VOLVO, 2018). De igual manera, la empresa Volquetes Maquinaria S.A. también contaba con camiones cisterna de 5000 galones de capacidad; sin embargo, las especificaciones técnicas de este modelo no figuraban en el portal informativo de la empresa. Por lo tanto, se buscó asemejarlos a las cisternas Dayun modelo DMC DYX 5250 con motor EURO 3 y se obtuvo la potencia neta de 375 HP o 279.63 kW (VIBROREX, 2017).

Tabla 14: Características generales de los equipos empleados

| <u>Equipo / Maquinaria empleada</u> | <u>Potencia (kW)</u> | <u>Potencia (hp)</u> | <u>Consumo de diésel (galones / hora)</u> | <u>Consumo de oxígeno (m3 / hora)</u> | <u>Consumo de acetileno (m3 / hora)</u> |
|--|----------------------|----------------------|---|---------------------------------------|---|
| Excavadora hidráulica CAT 330D L | 200.00 | 269.00 | 5.24 | - | - |
| Volquetes volvo 17m3 D11 A370 (motor EURO3) | 275.00 | 369.00 | 7.21 | - | - |
| Camión cisterna DMC 5000 galones (motor EURO3) | 279.63 | 375.00 | 7.33 | - | - |
| Martillo demoledor eléctrico BOSCH GSH27 | 2.00 | 3.00 | - | - | - |
| Equipo de oxicorte (para cortar con oxiacetileno espesor 25.4 mm de metal) | - | - | - | 3.93 | 0.029 |
| Amoladora 9" | 2.20 | 3.00 | - | - | - |

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los equipos manuales, se tiene tanto consumo energético eléctrico (kWh) como consumo de oxígeno y acetileno / hora para el equipo de oxicorte para metales. El primer equipo manual utilizado fue el martillo demoledor y, debido a la falta de información de esta herramienta por parte del cliente, se asemejaron sus características a las de uno comercial de la marca BOSCH modelo GSH27. Como las empresas especialistas cuentan con este modelo; se consiguieron los datos para fines de estudio; la potencia neta obtenida fue de 2 kW o 3 HP (SODIMAC, 2018). De igual manera, debido a la falta de datos técnicos de la amoladora utilizada, se buscó asemejar sus características con otra de la marca comercial DeWALT, modelo DWE490 de 9"; la potencia obtenida fue de 2.2 kW y de 3 HP (PROMART, 2018). Para referenciar el equipo de oxicorte, primero se debería definir como un instrumento que consiste en un sistema de soldadura y corte que utiliza un soplete y gases (oxígeno-acetileno u oxígeno-butano) en estado comprimido (GENCAT, 2003). Dado que tampoco se recibieron datos de esta herramienta, se buscó información en otras empresas similares como Finesa; aquí se buscó conseguir aquel modelo que resultaría propicio para cortar espesores medios de acero. De su base de datos, se decidió trabajar con oxiacetileno para cortar metales de 25.4 mm de espesor con boquillas SC-50-A. De la misma fuente, se extrajeron datos de consumo de oxígeno en 3.93 m³/h y 0.029 m³/h en consumo de acetileno (INFRASUR FINESA, 2018).

Luego de reunir los datos mencionados, se procedió a calcular los consumos de diésel y de electricidad para la maquinaria empleada en trabajos de demolición. Se conoce que los trabajos duraron 30 días con un jornal laboral de 8 horas-máquina diarias; es decir, 240 horas-máquina en total para el caso de la excavadora hidráulica, cuyo factor de operación es de 1 por su incidencia directa. Sin embargo, para el caso

de los volquetes y camiones cisternas, se debió tomar en cuenta sus tiempos de viaje obteniendo valores de 843 y 222 horas, respectivamente. En el caso de los equipos manuales, su implicancia en los trabajos de demolición no estuvo dada durante todo el tiempo de trabajo. Por ello, se recurrió a un factor de eficiencia de operación teórico encontrado en Félix (1990), que sugiere que dicho factor lo debería establecer el dueño de la maquinaria; caso contrario, sería válido asumir que el equipo opera 50 minutos de 1 hora posible (Félix, 1990); es decir, opera el 83.3% del tiempo. De igual forma, para el equipo de corte con sistema de oxígeno – acetileno, se sabe, por información del contratista, que opera 3 horas diarias (37.5% del tiempo).

En cuanto a las características del diésel B5, para fines de investigación, se asumió una temperatura de 15°C y una densidad de 850 kg/m³, aproximadamente (INFOCARBONO-MINAM, 2012). Para poder hallar el consumo de combustible en kilogramos, resultó conveniente trabajar con el concepto del poder calorífico promedio en unidades de kilowatts-hora / galones. Por lo tanto, de la biblioteca de la Universidad Nacional de Santa del curso de Termodinámica y Termotecnia, se consiguieron los valores de 42275 kJ/kg como poder calorífico inferior (PCI) del gasóleo y 43115 kJ/kg como límite superior (PCS) (2018). Con estos valores, se procedió a realizar equivalencias entre kilojoules y kilowatts, conversiones sucesivas y se concluyeron valores promedio de poder calorífico del diésel de 10.08 kWh/l o 38.16 kWh/gal. Este valor permitió determinar los consumos de combustible (ver Tabla 14) que serán datos para determinar la cantidad de diésel en kg considerando su densidad para cada maquinaria pesada (Tabla 15).

Tabla 15: Consumo de diésel en kg por maquinaria pesada de demolición y transporte

| Total de días de trabajo (días) | 30 | Jornada laboral (hr/día) | 8 | Tiempo efectivo de trabajo de maquinaria de demolición (hr) | 240 |
|---|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|----------------------|
| Densidad diésel | 0.85 | <i>kg/lt</i> | Densidad diésel convertida | 3.22 | <i>kg/gal</i> |
| Equipo / Maquinaria empleada | Consumo de diésel (galones / hora) | Total de diésel (gal) | | Total de diésel (l) | Total de diésel (kg) |
| Excavadora hidráulica CAT 330D L | 5.24 | 1258 | | 4762 | 4047 |
| Volquetes volvo 17m3 D13A 440 (motor EURO3) | 7.21 | 6075 | | 22997 | 19547 |
| Camión cisterna DMC 5000 galones | 7.33 | 1627 | | 6158 | 5234 |
| | | | | Consumo de diésel total (kg) | 28829 |

Según la Tabla 15, se calculó el consumo de combustible en 28.83 t de diésel; mientras que, para el caso de los equipos manuales se hallará el consumo de energía eléctrica total en kilowatts-hora. Según datos de proveedores, se consideraron 4 martillos demoledores trabajando durante el 83.3% de las 240 horas-máquina totales de trabajo. Asimismo, se trabajó con 1 sola amoladora, según proveedores, con el mismo factor de operación mencionado. Los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Consumo de energía eléctrica por maquinaria de demolición

| | | | |
|---|----------------------|---|--------------------------------------|
| Horas efectivas de trabajo totales de martillos demoledores (hr) | 800 | Horas efectivas de trabajo totales de amoladora (hr) | 200 |
| Rotomartillo (Martillo demoledor eléctrico BOSCH GSH27) | Potencia (kW) | 2 | C.E. (kWh) |
| Amoladora 9" | Potencia (kW) | 2.2 | C.E. (kWh) |
| | | | Consumo eléctrico total (kWh) |
| | | | 2040 |

La Tabla 16 permite concluir 2040 kWh de consumo eléctrico total siguiendo el mismo procedimiento que con la maquinaria pesada. Sin embargo, para el caso del equipo de oxicorte, se trabajó con los gases en estado comprimido de oxígeno – acetileno; por lo tanto, el cálculo se basó en las ratios de consumo por hora de la Tabla 14. Así, se procedió a trabajar con 90 horas efectivas de trabajo con respecto al total, debido a su factor de operación de 0.38 y se consideraron las densidades de 1.43 kg/m³ del oxígeno y de 1.10 kg/m³ del acetileno. Con las conversiones, se concluyó 505.5 kg de oxígeno y 2.90 kg de acetileno como consumo por uso de equipo de oxicorte. El consumo de acetileno demanda también emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂); en ese sentido, resulta de gran utilidad conocer sus factores de emisión. Estos son 0.24 g/kg; 0.005 g/kg; y 2.92 kg/kg; respectivamente (EPA, 2014). Por ende, para determinar las emisiones GEI, se multiplicarán estos factores por el consumo total de acetileno en m³, luego de haberla convertido a kg; se verifica ello en la Tabla 17.

Tabla 17: Emisiones producidas por consumo de acetileno del equipo de oxicorte

| GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) | Factores de emisión EPA (kg/kg gas) | Consumo total de acetileno (kg) | Emisiones (kg) |
|--|--|--|-----------------------|
| CO₂ | 2.92E+00 | 2.87E+00 | 8.38E+00 |
| CH₄ | 2.37E-04 | 2.87E+00 | 6.82E-04 |
| N₂O | 4.70E-06 | 2.87E+00 | 1.35E-05 |

Por último, las labores de demolición consumieron fracción del tiempo de vida de las maquinarias utilizadas y surge la incógnita de conocer estos valores. Según la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO) en su libro “El Equipo y sus Costos de Operación”, maquinarias como retroexcavadoras tienen 10000 horas de vida útil al igual que la amoladora y el equipo de oxicorte. Por otro lado, la herramienta martillo demoledor conlleva un tiempo de vida de 3000 horas. Con estos resultados, la cantidad de equipos utilizados y conociendo las horas efectivas de trabajo de cada maquinaria, se procede a calcular estos factores dividiendo las horas de demolición entre el tiempo de vida de la maquinaria; todo ello expuesto en la Tabla 18.

Tabla 18: Tiempo de vida útil relativo de las maquinarias de demolición

| Tiempo efectivo de trabajo de maquinaria de transporte (hr) | Horas demolición (hr) | Eficiencia de oxicorte 240 Tiempo de vida de la maquinaria (hr) | Eficiencia en operación | |
|---|-----------------------|---|----------------------------|------|
| | | | 0.375 | 0.83 |
| <i>Equipos menores</i> | | | Fracción de tiempo de vida | |
| Martillo demoledor 1 | 200 | 3000 | 0.0667 | |
| Martillo demoledor 2 | 200 | 3000 | 0.0667 | |
| Martillo demoledor 3 | 200 | 3000 | 0.0667 | |
| Martillo demoledor 4 | 200 | 3000 | 0.0667 | |
| Amoladora | 200 | 10000 | 0.0200 | |
| Equipo de oxicorte | 90 | 10000 | 0.0090 | |
| Excavadora hidráulica | 240 | 10000 | 0.0240 | |

En cuanto a las cifras referenciales para el modelo perteneciente a la etapa de ciclo de vida de transporte de escombros, se debe considerar la cantidad total obtenida producto de la demolición, el valor transportado y las distancias totales recorridas. Por tanto, en aras de buscar la máxima precisión posible, se debe especificar el cuadro de áreas para el edificio completo, tal que permita calcular el área total (m²):

Tabla 19: Área de ambientes en Antiguo Pabellón B de la PUCP

| AMBIENTE | AREA (m ²) |
|------------------------------|------------------------|
| Primer Nivel | 433.2 |
| Columnas Primer Nivel | 1.5 |
| Escaleras | 142.7 |
| Segundo Nivel | 610.3 |
| Tercer Nivel | 610.3 |
| Cuarto Nivel | 610.3 |
| Techo Cuarto Nivel | 433.2 |
| TOTAL (m²) | 2841.0 |

Con estos resultados, se procedió a calcular la cantidad de escombros obtenidos de un edificio de semejantes características. Se debe considerar que los datos

numéricos para el proceso de demolición son bastantes limitados y dispersos por no tener factores semejantes (Sheuer et al., 2003). Por ello, se realizaron modelos estimando valores numéricos de escombros en m³ siguiendo el método de Pacheco – Torgal, Tam, Labrincha, Ding y de Brito en *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Esto permite asemejar los m² de área total con un factor de tasas de generación de RCD en volumen (Tabla 20).

Tabla 20: Tasas medidas de generación de RCD en masa (kg/m²) y 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 | 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 |
| 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 | 0.1 | 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 et al., 2013. Manual del hormigón reciclado y residuos de demolición. Elsevier.

De acuerdo a la Tabla 20 y considerando el entorno, se tomó como factor 1.00 a 1.20 tanto de t/m² como de m³ a m²; por tanto, el total de 2841 m² totales de la edificación del antiguo B se vuelve semejante a 3410 toneladas o la misma cantidad de volumen en m³ de escombros. Además, se debe utilizar un factor de esponjamiento de 1.30, tomando como referencia lo expuesto en “Diseño de una metodología para la cuantificación de los Residuos de Construcción y Demolición: aplicación a la plana de Castellón” (Blanco et al., 2012). De ese modo, el volumen de escombros transportados total sería 4433 m³. Con este valor, se calculó la cantidad de viajes teóricos que debieron realizar los volquetes para completar la movilización hacia el emplazamiento de inicio de producción de agregados y concreto. Por lo tanto, se tuvo en cuenta la capacidad de los volquetes Volvo de 17 m³ y la duración total del proceso de demolición de 30 días. Con este modelo matemático y usando las ecuaciones mostradas, se calculó la suma total de viajes teóricos y viajes reales para el modelo de transporte expuestos en la Tabla 21.

$$\text{Viajes teóricos totales} = \frac{\text{Volumen transportado de escombros (m}^3\text{)}}{\text{Capacidad de volquetes (17 m}^3\text{)}}$$

$$\text{Viajes reales diarios} = \text{Redondeo al superior entero (Viajes teóricos diarios)}$$

$$\text{Viajes reales totales} = \text{Viajes reales diarios} \times \text{Duración de la demolición}$$

Tabla 21: Calculo de viajes reales de transporte de escombros a planta de producción

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|--|----------|--------------------------|
| Volumen de RCD obtenido de demolición | 4433 | m ³ |
| Capacidad de cada volquete | 17 | m ³ /volquete |
| Viajes teóricos totales | 261 | viajes |
| Duración de la demolición | 30 | días |
| Viajes teóricos por día | 8.69 | viajes/día |
| Viajes reales por día | 9 | viajes/día |
| Viajes reales totales | 270 | viajes |

En cuanto al kilometraje y tiempo recorrido, se ubicaron los tres puntos de referencia tomando en cuenta los permisos de acceso sin afectar la condición ciudadana. El primero fue el depósito de Volquetes Maquinarias S.A. ubicado en Alameda sur Mza. H-1 lote. 22 Urb. Villa Marina, Chorrillos. El segundo fue el antiguo pabellón B demolido en la PUCP, ubicada en Av. Universitaria, 1801, San Miguel y finalmente, el tercero fue la planta San Juan de UNICON en la Antigua Panamericana Sur 15803. La primera ruta que debieron realizar tanto volquetes como cisternas tiene como punto de partida el depósito de Volquetes Maquinarias S.A. y se debe llegar a la Facultad de Ciencias e Ingeniería PUCP; es decir, al antiguo pabellón del B.

Para ello, de acuerdo a los permisos y por tratarse de transporte de carga pesada, se tomaría la ruta que accede a Circuito de Playas desde la ubicación exacta de la empresa subcontratada. Se tomó la Av. San Aurelio, Los Pinos y su prolongación hasta la Avenida Santa Rosa. Una vez ahí, se entró a Av. Prolongación Defensores del Morro o Huaylas donde se dispuso el camino por toda la Costa Verde hacia Av. Universitaria, hasta llegar a la PUCP (Anexo C.1) completando 20.9 km de recorrido. Debido a la distribución del tiempo, se hará 1 viaje por volquete durante la mañana.

En cuanto a la segunda ruta, se consideró como punto de partida la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la PUCP y el punto de llegada fue UNICON – Planta San Juan como emplazamiento de tratamiento de RCD y producción de concreto. Para este caso, se optó por la ruta que tomaría la Avenida La Marina hasta Faustino Sánchez Carrión, luego se dirige a la Avenida Javier Prado Este. Al llegar allí, direccionarse hacia Panamericana Sur/Carretera 1S hasta Circunvalación en San

Juan de Miraflores donde se conduce hacia Cantera y finalmente a la planta de UNICON (Anexo C.2). El recorrido fue de 21.5 km y, en este caso, habrá viajes de ida y vuelta hasta terminar con el volumen de RCD diario transportado por volquete.

La última y tercera ruta será la de regreso desde el punto de salida de la Planta San Juan de UNICON hacia el punto de llegada del Depósito de Volquetes Maquinaria S.A. Para este caso, se considerará un viaje de regreso diario por volquete desde el emplazamiento de producción de concreto hacia el depósito de la empresa de maquinarias. La ruta seleccionada iniciará tras acceder a Circunvalación hacia Carretera Panamericana Sur. Luego, se entra por Av. El Triunfo y Calle A hacia Av. Velasco Alvarado en el distrito de Chorrillos. Por la misma vía se continúa hacia Av. Cordillera la Viuda y se toma Jirón Carhuarazo, Av. 12 de Octubre y Alameda Los Horizontes hacia San Lorenzo. Desde ahí, se gira hacia la izquierda con dirección a la Avenida Alameda Sur y se llega al destino de Volquetes Maquinarias S.A luego de recorrer 14.4 km de distancia de transporte (Anexo C.3).

Por otro lado, debido a la indiscutible incidencia de la variedad de los tiempos de viaje en Lima, se realizó un modelo para determinar un promedio por ruta considerando holguras en los horarios de partida y concluyendo lo expuesto en la Tabla 22. De ese modo, para la ruta 1 se consideró una holgura de 15 minutos en la partida entre las 6:30 am y las 6:45 am, se escaló cada 5 minutos y se leyó el tiempo tomado en llegar a PUCP, obteniendo un tiempo de transporte de 72 minutos o 1 hora y 12 minutos. Para la segunda ruta, se trabajó con el dato del jornal diario de 8 horas de cada volquete y se escalaron las lecturas por hora desde las 08:00 am hasta las 16:00 pm como horario de partida. El tiempo promedio fue de 85 minutos o 1 hora y 25 minutos. Finalmente, para la ruta 3 o de retorno se siguieron los lineamientos del caso anterior y se tomaron lecturas por hora desde las 09:00 am hasta las 17:00 pm; de modo que, el resultado promedio del tiempo de transporte fue de 42 minutos.

Tabla 22: Cálculo de tiempo promedio por ruta de viaje (Ruta 1, Ruta 2, Ruta 3)

| RUTA | MODELO DE TRANSPORTE | | | TIEMPO PROMEDIO (min) |
|---------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|
| RUTA 1 | Hora | Tiempo de viaje | | 74 |
| | | hora | minutos | |
| | 06:30-07:35 | 01:05 | 65 | |
| | 06:35-07:50 | 01:15 | 75 | |
| | 06:40-07:55 | 01:15 | 75 | |
| 06:45-08:05 | 01:20 | 80 | | |
| | Hora | Tiempo de viaje | | |
| | | hora | minutos | |
| | 08:00-09:00 | 01:40 | 100 | |

| | | | | |
|---------------|-------------|------------------------|----------------|-----------|
| RUTA 2 | 09:00-10:00 | 01:20 | 80 | 85 |
| | 10:00-11:00 | 01:20 | 80 | |
| | 11:00-12:00 | 01:15 | 75 | |
| | 12:00-13:00 | 01:10 | 70 | |
| | 14:00-15:00 | 01:15 | 75 | |
| | 15:00-16:00 | 01:20 | 80 | |
| | 16:00-17:00 | 02:00 | 120 | |
| RUTA 3 | Hora | Tiempo de viaje | | 42 |
| | | hora | minutos | |
| | 09:00-10:00 | 00:45 | 45 | |
| | 10:00-11:00 | 00:40 | 40 | |
| | 11:00-12:00 | 00:40 | 40 | |
| | 12:00-13:00 | 00:40 | 40 | |
| | 14:00-15:00 | 00:40 | 40 | |
| | 15:00-16:00 | 00:40 | 40 | |
| | 16:00-17:00 | 00:45 | 45 | |
| 17:00-18:00 | 00:45 | 45 | | |

Con estos datos, se unifican los cálculos basándose en el jornal diario laboral de 8 hr/volquete y la cantidad reducida a 2 viajes/día por cuestiones de tiempo. Según la Tabla 21, los volquetes realizarían 9 viajes reales/día; es decir, 4 unidades que realicen 2 viajes/día y 1 que solo lleve carga de escombros; en total 5 volquetes trabajan al día. De ello, las 4 unidades mencionadas realizan 1 viaje/día para la primera y tercera ruta y 3 viajes/día para la segunda. Mientras que, el volquete que realiza 1 viaje/día con carga tendría 1 viaje por cada ruta; así, se halló la cantidad total de kilómetros recorridos por los volquetes. Por último, se hallaron las horas totales de viaje considerando los viajes totales por ruta y sus tiempos promedio y; por su parte, el total de toneladas de RCD por kilómetro recorrido. Este último cálculo se halló multiplicando el volumen transportado en m³ afectado por el factor de esponjamiento 1.30 y la cantidad total de kilómetros recorridos. De forma similar, las cisternas viajaron 3 veces de ida y 3 de vuelta por la Ruta 1, sumaron 180 viajes y recorrieron 3762 km en 222 horas de viaje. Todos estos resultados, se exponen de forma más clara en la Tabla 23.

Tabla 23: Cálculo de toneladas de RCD por kilómetro recorrido y tiempo de transporte

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|---|-----------------|---------------------|
| Horas laborables de volquete por día | 8 | hrs/día/volquete |
| Viajes cargados al día por volquete | 2 | viajes/día/volquete |
| Volquetes trabajando al día | 5 | volquetes/día |
| Volquetes que hacen 2 viajes por día | 4 | volquetes/día |
| Volquetes que hacen 1 viaje por día | 1 | volquetes/día |
| Viajes diarios entre PUCP - planta RCD UNICON | 13 | viajes/día |
| Viajes diarios entre Volquete Maquinarias - PUCP | 5 | viajes/día |
| Viajes diarios entre planta RCD UNICON - Volquete Maquinarias | 5 | viajes/día |
| Viajes totales entre PUCP - planta RCD UNICON | 390 | viajes |
| Viajes totales entre Volquete Maquinarias - PUCP | 150 | viajes |

| | | |
|---|---------------|------------|
| Viajes totales entre planta RCD UNICON - Volquete Maquinarias | 150 | viajes |
| Distancia entre PUCP - planta RCD UNICON | 21.5 | km |
| Distancia entre Volquete Maquinarias - PUCP | 20.9 | km |
| Distancia entre RCD UNICON - Volquete Maquinarias | 14.4 | km |
| Kilómetros recorridos con RCD | 8385 | km |
| Kilómetros recorridos sin carga | 5295 | km |
| Kilómetros recorridos totales | 13680 | km |
| Tiempo invertido entre PUCP - planta RCD UNICON | 553 | hr |
| Tiempo de viaje total entre Volquete Maquinarias - PUCP | 185 | hr |
| Tiempo de viaje total entre RCD UNICON - Volquete Maquinarias | 105 | hr |
| Tiempo total de viaje en volquete | 843 | hr |
| Tiempo total de viaje de cisternas (Volquete Maq. – PUCP) | 222 | hr |
| Total de toneladas de RCD transportadas por kilómetro | 193669 | Tkm |

Luego de haber definido las entradas y salidas expuestas más generales, se procedió a cálculos específicos. Las actividades de demolición y transporte de escombros funcionan como fuentes de material particulado (EPA, 2017); por lo tanto, resulta conveniente estimar su magnitud en PM_{2.5} y PM₁₀. Debido a la falta de metodología, se optó por realizar un modelo sencillo basado en literatura especializada en el tema. La EPA (Environmental Protection Agency), cuya misión es proteger la salud humana y el medioambiente (EPA, 2018), identificó 5 actividades principales en las fases mencionadas: demolición de la estructura o desmembramiento explosivo o mecánico, limpieza del terreno, carga de volquetes, transporte y descarga de escombros. Para ello, se trabajará con factores de emisión proporcionados por la base de datos *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors* para aportar idoneidad en la estimación de las emisiones promedio para una actividad determinada (EPA, 2018). Esta se trabaja desde el año 1972 y se considera la compilación principal de factores de emisión de la EPA pudiendo verificarse más de 200 procesos de polución de aire por categorías determinados por pruebas de campo, estudios de balance de materia e ingeniería (EPA, 2016). Para fines de estudio y debido a su disponibilidad, se decidió utilizar los lineamientos de la categoría CALIFORNIA EMISSION ESTIMADOR MODEL (CalEEMod).

Para la primera actividad, CalEEMod sugiere ubicarla como desmembramiento explosivo o mecánico. A pesar que, el Midwest Research Institute concluye la no existencia de un factor AP-42 para esta actividad, se trabajó con la ecuación brindada por la base de datos mencionada para operaciones y colocaciones por lotes, (1988):

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

Donde:

EF_D: factor de emisión (lb PM/ton. RCD)

k: multiplicador por tamaño de partícula. Por defecto, PM₁₀: 0.35 y PM_{2.5}: 0.053 (AP-42).

U: velocidad media del viento. El valor predeterminado es de 5m/s.
M: Contenido de humedad promedio del material. El valor predeterminado es 2%.

Luego, se convierten los valores de EF_D de libras a kilogramos/ ton. RCD y se multiplican por la cantidad total de escombros en toneladas para hallar las emisiones E_D de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Los resultados se verifican en la Tabla 24.

Tabla 24: Cálculo de emisiones de material particulado por demolición de la estructura

| k (multiplicador por tamaño de partícula) | | Otros indicadores | | |
|---|---|---|--------------------------|-----------------------------|
| PM2.5 | 5.30E-02 | U velocidad media del viento (m/s) | | 5.00E+00 |
| PM10 | 3.50E-01 | M contenido de humedad promedio del material (%) | | 2.00E+00 |
| MATERIAL PARTICULADO | EF_D (lb PM/ton escombros) | EF_D (kg PM/ton escombros) | W (ton escombros) | Kg E_D(PM) |
| PM2.5 | 1.70E-04 | 7.69E-05 | 3.41E+03 | 2.62E-01 |
| PM10 | 1.12E-03 | 5.08E-04 | 3.41E+03 | 1.73E+00 |

Para la limpieza del terreno, la *United States Environmental Protection Agency* sugiere tomar como referencia ecuaciones para el sector minero; sin embargo, estas cuentan con niveles de confiabilidad muy bajos por la amplitud en los valores de distancias recorridas y transporte. Por ende, para fines de este estudio; debido a que se optó por seguir los lineamientos del CalEEMod, no se considerará el valor emitido.

Para las actividades de carga y descarga de escombros, se tomó en cuenta el acápite de "Debris Loading" de CalEEMod y se optó por usar el valor del factor de emisión de Partículas Suspendidas Totales (TSP) de 0.058. Este, se multiplicará por el multiplicador por tamaño de partícula por defecto para cada emisión brindado por la AP – 42 y detallado en el procedimiento anterior. Luego, se insertaron estos valores al modelo siguiendo la ecuación general de carga/descarga de escombros en volquetes. De ella, se debe considerar que la expresión "SF*0.046 (ton/ft²)" representa la cantidad de escombros en toneladas que estima CalEEMod. Este valor fue hallado con el factor 1.2 m³/m² de Pacheco-Torgal et al; resultando 3410 t.

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

Donde:

- E_L: emisiones (lb de PM)
- EF_L: factor de emisión (lb PM/ton. RCD)
- SF: metros cuadrados de construcción
- W: tonelaje de escombros

Tabla 25: Cálculo de emisiones de material particulado por carga y descarga de RCD en volquete

| MATERIAL PARTICULADO | k (multiplicador) | EFLTSP (lb PM/ton escombros) | EFL (kg PM/ton escombros) | W (ton escombros) | Kg E _L (PM) |
|----------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|
| PM2.5 | 5.30E-02 | 5.80E-02 | 1.39E-03 | 3.41E+03 | 4.75E+00 |
| PM10 | 3.50E-01 | 5.80E-02 | 9.21E-03 | 3.41E+03 | 3.14E+01 |

Por otro lado, para la actividad de transporte de escombros se trabajó con el acápite “Road Dust”, lo cual permitió hallar las emisiones generadas por el polvo fugitivo al dispersar el sedimento de carreteras producto del paso de vehículos y estableciendo diferencias entre carreteras pavimentadas y no pavimentadas (CalEEMod, pp.27). Se enfatizó la omisión de emisiones relacionadas al desgaste de frenos, neumáticos y gases de vehículos para evitar conteo doble (Aguilar y Loo, 2017, pp. 64). En consecuencia, se utilizó la expresión matemática para carreteras pavimentadas:

$$E_{ext} = ((k * (sL)^{0.91} * (W)^{1.02}) * (1 - \frac{P}{4N}))$$

Donde:

E_{ext}: factor de emisión promedio anual u otro a largo plazo en unidades de “k”

k: multiplicador por tamaño de partículas. Por defecto, PM₁₀: 0.62 y PM_{2.5}: 0.15 (EPA, 1995).

sL: carga de limos presente en el camino (gr/m²)

W: peso promedio en toneladas de los vehículos analizados en carretera.

P: número de días con al menos 0.254 mm (0.01in) de precipitación durante un período promedio.

N: número de días considerados en el período promedio.

Esta fórmula también implica realizar otras consideraciones, en relación a sus componentes. La primera es la diferencia en el valor de “k” con respecto al anterior explicada por las características de la actividad y expuesta en “Compilation o Air Pollutant Emission Factors, Carolina del Norte, Research Triangle Park” (EPA, 1995). En lo que respecta al valor de “sL”, se realizó un análisis para determinar la ruta más crítica; es decir, la que contiene mayor carga vehicular por día. De acuerdo a ello, los resultados arrojaron que las carreteras de la Costa Verde, Javier Prado y Panamericana Sur son las más densas y se ubican entre 5000 a 10000 vehículo/día. Este cálculo se basó en el dato obtenido de El Comercio para una vía de uso similar como la Carretera Central donde se registró una carga de 7000 vehículos por día (2016). Por ende, siguiendo los lineamientos de la EPA y CalEEMod, se tomó el valor de 0.06 g/m² para carreteras ubicadas en el intervalo entre 5000 y 10000 vehículos. El factor (1- P/4N) se redujo a 1 por las condiciones de las precipitaciones de Lima y porque CalEEMod no toma en cuenta precipitación por análisis diario (pp. 28, 2016). En cuanto a los pesos de los vehículos, se deben considerar los de las cisternas y volquetes llenos y vacíos. Según Volvo, el peso de los volquetes radica en 18 toneladas vacío (VOLVO, 2018); mientras que, la cisterna pesó 12.24 toneladas en

las mismas condiciones (VIBROREX 2017). Por su parte, siguiendo los resultados del modelo de transporte, se puede determinar la carga de escombros y agua; por lo tanto, el volquete lleno pesa 21.41 toneladas y la cisterna llena acumula 30 toneladas. Del mismo modo, se recurrió al modelo de transporte previamente realizado para determinar los km. recorridos pues el multiplicador k tiene unidades gramos/VKT. Los volquetes recorren 5295 kilómetros vacíos y 8385 kilómetros llenos; mientras que, para las cisternas se consideraron 3 unidades trabajando por los 30 días de trabajo. Este resultado, producto de multiplicar los 20.9 kilómetros de la Ruta 2 por las 90 unidades vacías y cargadas, determina un total de 1881 kilómetros recorridos. Todos estos resultados se resumen en la Tabla 26, apoyada del modelo de transporte.

Tabla 26: Cálculo de emisiones de material particulado por transporte de escombros

| PM _x | Multiplicador k (g/VKT) | sL (g/m ²) de la EPA | | |
|-------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| PM _{2.5} | 1.50E-01 | 6.00E-02 | | |
| PM ₁₀ | 6.20E-01 | 6.00E-02 | | |
| VEHÍCULO | Km recorridos | W (tn) | Kg PM _{2.5} | Kg PM ₁₀ |
| Volquete vacío | 5.30E+03 | 1.80E+01 | 1.17E+00 | 4.84E+00 |
| Volquete cargado | 8.39E+03 | 2.14E+01 | 2.21E+00 | 9.15E+00 |
| Cisterna vacía | 1.88E+03 | 1.22E+01 | 2.81E-01 | 1.16E+00 |
| Cisterna cargada | 1.88E+03 | 3.00E+01 | 7.00E-01 | 2.89E+00 |

Con todos los resultados de las actividades principales de las 2 fases, se hallan las emisiones de material particulado en 9.38E+00 kg de PM_{2.5} y 5.12E+01 kg de PM₁₀.

La última fase del sistema constará de 2 subprocesos importantes en el análisis, la producción de áridos gruesos reciclados y la producción del concreto reciclado; ambas actividades compartirán el mismo emplazamiento. Una vez lleguen los volquetes a la Planta de UNICON, los RCD pasarán por los procesos referentes a una planta fija de producción de áridos reciclados. Según la norma ACI 555R-01 (2001) y la investigación "Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction" (Eguchi, 2007), la Figura 20 explica un modelo base.

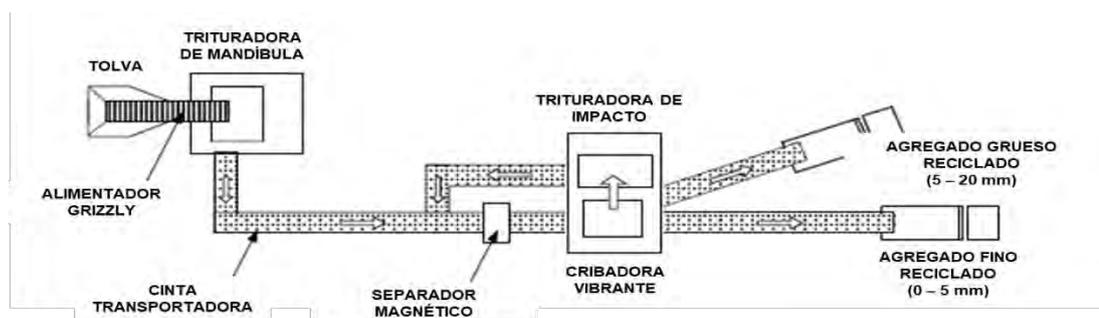


Figura 20: Planta de producción de agregado reciclado, vista en planta.

Fuente: Adaptación de Aplicación de árido grueso reciclado por mezcla a la construcción de concreto, Eguchi (2007)

El procedimiento inició con la descarga de escombros de los volquetes a las tolvas, luego de haber realizado la separación manual y por grúa de elementos contaminantes visibles. Luego, se les realizó el primer vibrado y tamizado para eliminar finos menores a 10 mm como yeso y suelo; la trituradora de mandíbula reduciría los tamaños de máximo 800 mm a 100 mm, aproximadamente. Mediante una cinta transportadora, pasaron por un separador magnético automático el cual removió el acero de refuerzo restante de los residuos y se insertaron a una tamizadora vibradora circular, antes de su segundo chancado. La maquinaria utilizada para este segundo procedimiento va a variar de acuerdo al tipo o uso de mezcla que desee; es decir, se usó chancadora de mandíbula o cónica para los casos 1 y 2, y una de impacto para el caso 3. Para este caso, no se trabajó con secadores por aire o agua; sin embargo, su uso será eficiente para mejorar la calidad del árido. Para finalizar el procedimiento, se tamizó con vibradora para determinar los agregados gruesos reciclados (5 – 20 mm) y agregados finos reciclados (0 – 5 mm).

Debido al conocimiento del origen de los residuos producto de la demolición, el diseño de esta planta de reciclaje de agregados se trabajó considerando 92.6% reciclable del total de RCD transportado; es decir, 3156 toneladas. Se realizó un promedio de las capacidades de los componentes de esta planta fija y, al multiplicarlo por los factores de eficiencia 0.85 y merma de 0.88, se obtuvo 231.1 toneladas/hora como capacidad real de la planta. Esto lleva a indicar que el tiempo de producción de los agregados sería de 13.7 horas divididas por turnos. Con este dato y las potencias de los componentes obtenidos de GREAT WALL CRUSHER (2018), se obtuvo el total de diésel en galones consumido para cada caso (Tablas 27-28).

Tabla 27: Producción de agregados reciclados para los casos 1 y 2

| CASOS 1, 2 | Potencia (kW) | Consumo de diésel | |
|---|----------------------|--------------------------|--------------------|
| | | Tasa (gal/hr) | Total (gal) |
| ALIMENTADOR GRIZZLY | 22 | 0.58 | 7.88 |
| CINTA TRANSPORTADORA | 11.25 | 0.29 | 4.03 |
| TRITURADORA DE MANDÍBULA | 146 | 3.83 | 52.26 |
| CINTA TRANSPORTADORA / LIMPIEZA AUTOMÁTICA CON SEPARADOR MAGNÉTICO | 9.5 | 0.25 | 3.40 |
| TAMIZADORA VIBRADORA CIRCULAR | 37 | 0.97 | 13.24 |
| TRITURADORA DE CONO PY | 160 | 4.19 | 57.27 |
| CINTA TRANSPORTADORA | 11.25 | 0.29 | 4.03 |
| TAMIZADORA VIBRADORA CIRCULAR | 11 | 0.29 | 3.94 |
| TOTAL | 408 | | 146.05 |

Fuente: Elaboración propia con datos de GREAT WALL CRUSHER, 2018.

Tabla 28: Producción de agregados reciclados para el caso 3

| CASO 3 | Potencia (kW) | Consumo de diésel | |
|---|----------------------|--------------------------|--------------------|
| | | Tasa (gal/hr) | Total (gal) |
| ALIMENTADOR GRIZZLY | 22 | 0.58 | 7.88 |
| CINTA TRANSPORTADORA | 11.25 | 0.29 | 4.03 |
| TRITURADORA DE MANDÍBULA | 146 | 3.83 | 52.26 |
| CINTA TRANSPORTADORA / LIMPIEZA AUTOMÁTICA CON SEPARADOR MAGNÉTICO | 9.5 | 0.25 | 3.40 |
| TAMIZADORA VIBRADORA CIRCULAR | 37 | 0.97 | 13.24 |
| TRITURADORA DE IMPACTO | 146 | 3.83 | 52.26 |
| CINTA TRANSPORTADORA | 11.25 | 0.29 | 4.03 |
| TAMIZADORA VIBRADORA CIRCULAR | 11 | 0.29 | 3.94 |
| TOTAL | 394 | | 141.04 |

Fuente: Elaboración propia con datos de GREAT WALL CRUSHER, 2018.

Una vez obtenidos estos valores totales y convertidos a litros de consumo de diésel, con su densidad de 0.85 kg/l; se determinó que 469.9 kg de diésel se utilizaron para la producción de los áridos reciclados de los casos 1 y 2. Por su parte, para el caso 3, se obtuvo un valor de 453.8 kg de consumo de diésel en la producción de áridos.

El último procedimiento previo a la producción del concreto reciclado fue el secado de los áridos producidos, debido a que se optó por presaturarlos para no aumentar ni la cantidad de agua ni la de cemento. Por lo tanto, el secado de superficie se realizó mediante exposición al aire libre hasta lograr el estado “parcialmente seco”; de modo que, se disminuye consumos eléctricos por acción de algún horno mufla. Como se mencionó en capítulos anteriores, se producirán tres casos de concreto convencional (Tabla 29); por tanto, para su dosificación se consultó la Tabla de Dosificaciones y Equivalencias de UNACEM para 1 m³ de concreto (pp.4, 2013). A esta fase se le conoce como obtención de materia prima del sistema a evaluar, tanto para los casos de concreto convencional como para sus análogos reciclados.

Tabla 29: Dosificaciones para cada caso de estudio de concreto convencional

| CONCRETO CONVENCIONAL | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|--------|---------------|
| | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| <u>CONCRETO DE 140 kg/cm² (HUSO 57 piedra 1", w/c 0.69)</u> | AGUA (litros) | 196 | 1.0 | 196 |
| | ARENA (kg) | 640 | 1.0 | 640 |
| | PIEDRA (kg) | 1205 | 1.0 | 1205 |
| | CEMENTO TIPO I (bolsas) | 6.7 | 42.5 | 284.75 |
| <u>CONCRETO DE 210 kg/cm² (HUSO 67 piedra 3/4", w/c 0.61)</u> | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| | AGUA (litros) | 235 | 1.0 | 235 |
| | ARENA (kg) | 780 | 1.0 | 780 |
| | PIEDRA (kg) | 955 | 1.0 | 955 |
| <u>CONCRETO PUZOLÁNICO DE 280 kg/cm² (HUSO 67 piedra 3/4", w/c 0.5)</u> | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| | AGUA (litros) | 230 | 1.0 | 230 |
| | ARENA (kg) | 655 | 1.0 | 655 |
| | PIEDRA (kg) | 924 | 1.0 | 924 |
| | CEMENTO TIPO IP (bolsas) | 10.8 | 42.5 | 459 |

Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de UNACEM, 2013.

Para los casos de concreto reciclado (Tabla 30), se mantuvo la relación agua/cemento. A su vez, según Zega, C; los procesos de trituraciones y la presencia de pasta en los áridos reciclados, llevan a reducir su densidad en, aproximadamente, 9% respecto a la del árido natural (2008). Por lo tanto, se multiplicará su diferencia respecto al 100% por el porcentaje de sustitución de cada caso y se obtendrá la cantidad de agregado grueso reciclado. Por último, se redujo la cantidad de AFN en mezcla en 5% la cantidad de árido grueso reciclado, debido a los finos adheridos.

Tabla 30: Dosificaciones para cada caso de estudio de concreto reciclado

| CONCRETO RECICLADO | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|--------|---------------|
| | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| <u>CONCRETO 20% AGR + 80% AGR</u> | AGUA (litros) | 196 | 1.0 | 196 |
| | ARENA (kg) | 640 | 1.0 | 629.03 |
| | PIEDRA NATURAL(kg) | 964 | 1.0 | 964 |
| | AG RECICLADO (kg) | 241 | 0.91 | 219.31 |
| | CEMENTO TIPO I (bolsas) | 6.7 | 42.5 | 284.75 |
| <u>CONCRETO 15% AGR + 85% AGN</u> | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| | AGUA (litros) | 235 | 1.0 | 235 |
| | ARENA (kg) | 780 | 1.0 | 773.48 |
| | PIEDRA NATURAL (kg) | 811.8 | 1.0 | 811.75 |
| | AG RECICLADO (kg) | 143.3 | 0.91 | 130.36 |
| <u>CONCRETO 10% AGR + 90% AGN</u> | CEMENTO TIPO I (bolsas) | 9.1 | 42.5 | 386.75 |
| | RAW MATERIAL | UNIDAD ORIGINAL | FACTOR | kg |
| | AGUA (litros) | 230 | 1.0 | 230 |
| | ARENA (kg) | 655 | 1.0 | 650.8 |
| | PIEDRA NATURAL (kg) | 831.6 | 1.0 | 831.6 |
| | AG RECICLADO (kg) | 92.4 | 0.91 | 84.08 |
| | CEMENTO TIPO IP (bolsas) | 10.8 | 42.5 | 459 |

Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos con ACTHE (2006) y UNACEM (2013).

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Evaluación de impacto de ciclo de vida (LCIA)

El análisis de ciclo de vida de cualquier producto concibe como tercera etapa la evaluación de impacto de ciclo de vida en la que incumbe a todos los datos de entrada y salidas colocados en el inventario. Se espera que los impactos negativos sitúen como conveniente a la alternativa de reciclaje, ligeramente por encima de la opción convencional y que una de las razones críticas sea la distancia de transporte. En definitiva, esto se corroborará una vez culminado el modelo de los 6 casos de estudio.

5.2. Modelación de casos y resultados

La modelación de los casos de estudio se realizó con la ayuda del software SimaPro (2018), tomando en consideración la unidad funcional de 1 m³ de concreto producido, las entradas y salidas del inventario, y los límites del sistema. Como se mencionó en el capítulo anterior, se utilizaron 2 metodologías: IPCC 2013 GWP 100a y ReCiPe 2016 Midpoint Hierarchist (H). De esa manera, no solo se evaluará el impacto generado en el Potencial de Cambio Climático o Calentamiento Global, sino también otras 17 categorías de impacto para determinar diversos efectos al medioambiente. La primera y segunda etapa de ciclo de vida fueron *La Demolición* y *El Transporte*, respectivamente; sin embargo, para efectos de celeridad en la inserción del inventario, se decidió superponer ambos resultados. Por su parte, se debe recordar que el registro de entradas del inventario incluye *Uso de Diésel B5*, *Excavadora hidráulica*, *Electricidad*, *Emisiones por Diésel Motor TIER1*, *Consumo de Acetileno*, *Consumo de Oxígeno* y *Consumo de Agua*. Mientras que, las *Salidas* comprenden el material particulado, las emisiones por combustión del acetileno, diésel y electricidad.

Según la Tabla 31, el mayor incidente en el Potencial de Cambio Climático es el uso de volquetes, cisternas y excavadora hidráulica situando al transporte de RCD como proceso crítico en la búsqueda del concreto reciclado.

Tabla 31: Resultados IPCC y su porcentaje de incidencia de Demolición y Transporte

| Elementos | kg CO _{2eq} / m ³ concreto producido | % incidencia |
|--|--|----------------|
| Salidas (PM, emisiones uso de Acetileno) | 1.90E-03 | 0.02% |
| Uso de Diésel B5 | 5.17E+00 | 58.77% |
| Emisiones Uso de Diésel B5 | 3.05E+00 | 34.70% |
| Excavadora Hidráulica | 8.24E-02 | 0.94% |
| Electricidad | 1.14E-01 | 1.30% |
| Consumo de acetileno | 4.27E-03 | 0.05% |
| Consumo de oxígeno | 1.40E-01 | 1.59% |
| Consumo de agua | 2.32E-01 | 2.63% |
| TOTAL (kg CO_{2eq}) | 8.79E+00 | 100.00% |

A modo de mención, la metodología de evaluación ReCiPe Midpoint H arroja la emisión de 8.93 kg CO_{2eq}, valor coherente al obtenido bajo la metodología IPCC 2013 GWP 100a por tratarse de una categoría de impacto ambiental similar. Además, la Tabla 32 permite adicionar la *Escasez de recursos fósiles*, *Ecotoxicidad Terrestre*, *Uso del suelo*, *Radiación Ionizante* y *Toxicidad humana no carcinogénica* como las otras categorías de impacto que registran valores más altos. Por lo tanto, resultará importante determinar los principales causantes de ello (Figura 21).

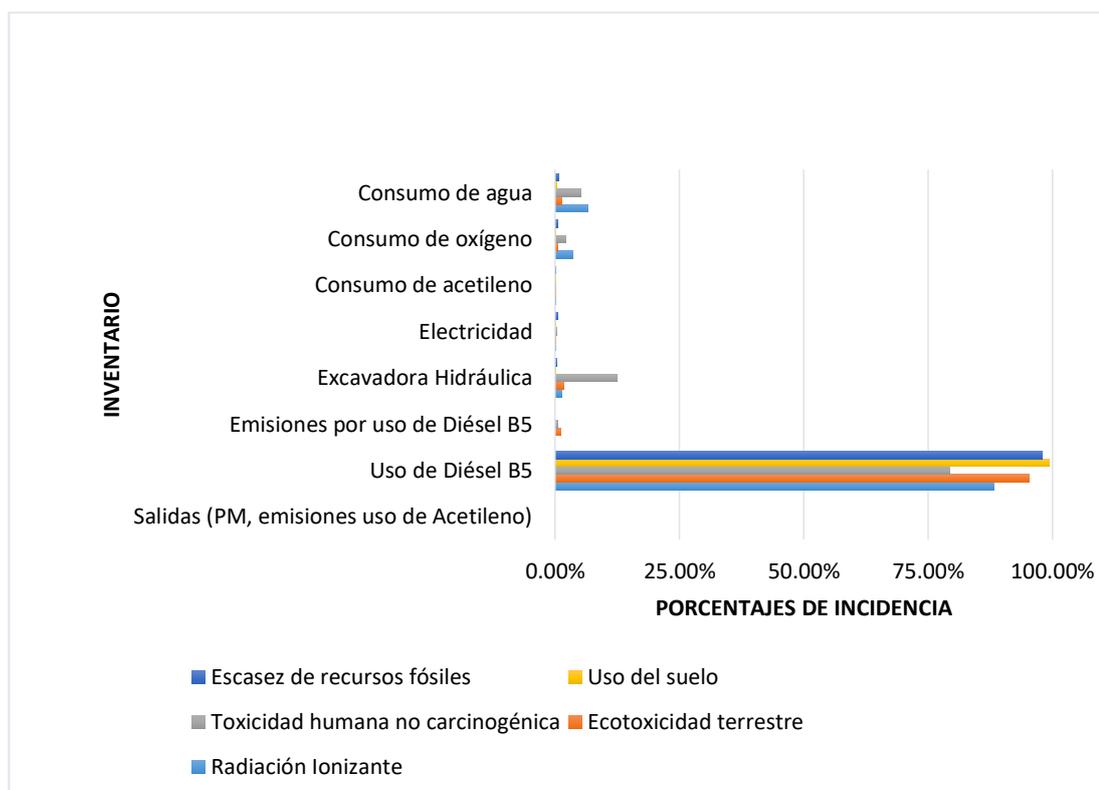


Figura 21: Porcentajes de Incidencia en 5 Categorías de Impacto – ReCiPe Midpoint H
Fuente: Elaboración propia

La metodología de evaluación ReCiPe permite afirmar la gran incidencia que tiene el transporte en este sistema, siendo el principal causante de las emisiones de las 5 categorías de impacto mostradas, cuyos valores registran los puntos más altos entre las 17. Aun así, se debe hacer especial hincapié en los otros actores importantes como la Formación de material particulado fino por incidencia directa de las *Salidas*, el proceso de *cuna a tumba* de la Excavadora hidráulica y el Consumo de agua en la Toxicidad humana carcinogénica o la responsabilidad del Consumo de oxígeno en la Eutrofización de agua dulce. Entonces, será útil obtener los resultados completos de las emisiones de las categorías de impacto (Tabla 32).

Tabla 32: Resultados IPCC de Demolición y Transporte

| Categoría de impacto | Unidad | Total | Salidas (PM, emisiones uso de Acetileno) | Uso de Diésel B5 | Emisiones por uso de Diésel B5 | Excavadora Hidráulica | Electricidad | Consumo de acetileno | Consumo de oxígeno | Consumo de agua |
|--|--------------------------|----------|--|------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| Calentamiento Global | kg CO ₂ eq | 8.93E+00 | 1.90E-03 | 5.30E+00 | 3.05E+00 | 8.40E-02 | 1.16E-01 | 4.36E-03 | 1.43E-01 | 2.36E-01 |
| Agotamiento del ozono estratosférico | kg CFC11 eq | 8.36E-06 | 3.23E-11 | 7.84E-06 | 3.18E-07 | 2.76E-08 | 3.41E-08 | 1.55E-09 | 5.03E-08 | 8.78E-08 |
| Radiación Ionizante | kBq Co-60 eq | 3.01E-01 | 0.00E+00 | 2.65E-01 | 0.00E+00 | 4.18E-03 | 2.79E-04 | 3.34E-04 | 1.06E-02 | 1.97E-02 |
| Formación de ozono, salud humana | kg NO _x eq | 4.88E-02 | 0.00E+00 | 2.01E-02 | 2.76E-02 | 1.97E-04 | 1.08E-04 | 8.76E-06 | 2.75E-04 | 4.99E-04 |
| Formación de material particulado fino | kg PM _{2.5} eq | 2.27E-02 | 2.40E-03 | 1.34E-02 | 5.81E-03 | 1.65E-04 | 7.21E-05 | 9.76E-06 | 3.19E-04 | 5.61E-04 |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | kg NO _x eq | 4.99E-02 | 0.00E+00 | 2.11E-02 | 2.77E-02 | 2.10E-04 | 1.13E-04 | 8.93E-06 | 2.77E-04 | 5.04E-04 |
| Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | 5.73E-02 | 0.00E+00 | 3.59E-02 | 1.95E-02 | 3.51E-04 | 1.16E-04 | 1.51E-05 | 4.87E-04 | 9.19E-04 |
| Eutrofización de agua dulce | kg P eq | 7.40E-04 | 0.00E+00 | 5.15E-04 | 0.00E+00 | 4.19E-05 | 3.06E-06 | 1.95E-06 | 6.23E-05 | 1.16E-04 |
| Eutrofización marina | kg N eq | 6.42E-04 | 0.00E+00 | 6.27E-04 | 0.00E+00 | 2.77E-06 | 3.49E-07 | 1.25E-07 | 4.02E-06 | 7.63E-06 |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB | 2.31E+01 | 0.00E+00 | 2.20E+01 | 2.63E-01 | 3.80E-01 | 3.47E-02 | 4.36E-03 | 9.73E-02 | 3.19E-01 |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB | 6.73E-02 | 0.00E+00 | 4.83E-02 | 1.04E-05 | 9.94E-03 | 3.90E-04 | 8.93E-05 | 2.60E-03 | 5.93E-03 |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DCB | 1.13E-01 | 0.00E+00 | 8.59E-02 | 2.14E-04 | 1.41E-02 | 5.61E-04 | 1.22E-04 | 3.54E-03 | 8.22E-03 |
| Toxicidad humana carcinogénica | kg 1,4-DCB | 1.38E-01 | 0.00E+00 | 1.04E-01 | 6.84E-06 | 1.36E-02 | 6.47E-04 | 1.54E-04 | 4.81E-03 | 1.46E-02 |
| Toxicidad humana no carcinogénica | kg 1,4-DCB | 2.80E+00 | 0.00E+00 | 2.23E+00 | 1.43E-02 | 3.49E-01 | 9.91E-03 | 2.13E-03 | 5.81E-02 | 1.44E-01 |
| Uso del suelo | m ² a crop eq | 1.37E+00 | 0.00E+00 | 1.36E+00 | 0.00E+00 | 2.03E-03 | 1.74E-03 | 4.36E-05 | 1.24E-03 | 3.19E-03 |
| Escasez de recursos minerales | kg Cu eq | 1.03E-02 | 0.00E+00 | 8.16E-03 | 0.00E+00 | 1.26E-03 | 5.69E-05 | 3.35E-06 | 5.88E-05 | 8.04E-04 |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 8.19E+00 | 0.00E+00 | 8.04E+00 | 0.00E+00 | 2.33E-02 | 4.23E-02 | 1.02E-03 | 3.31E-02 | 5.75E-02 |
| Consumo de agua | m ³ | 1.59E-01 | 0.00E+00 | 1.33E-01 | 0.00E+00 | 6.03E-04 | 6.66E-03 | 9.41E-05 | 3.08E-03 | 1.50E-02 |

La tercera etapa es la producción de los insumos de cada uno de los 6 casos de concreto y su respectiva dosificación. Es decir, para los 3 casos convencionales, se evaluarán el agregado grueso, agregado fino, agua de grifo y cemento; mientras que, para los 3 casos de reciclado, los 4 insumos mencionados más la producción del porcentaje de árido reciclado. Para los agregados y agua, se utilizaron los resultados de la base de datos EcoInvent v3.5 del software SimaPro y, para los cementos, se usaron los resultados de un proyecto previo referenciando a las empresas UNACEM y YURA (Vázquez-Rowe et al., 2019). Debido a que la maquinaria para la producción de árido reciclado variaba por cada porcentaje elegido, se consideraron ligeras diferencias en los valores de *Diésel B5* y *Emisiones Diésel Motor Tier1*. Sin embargo, para fines prácticos, se evaluaron las diferencias e incidencias, directamente, en las mezclas de concreto.

Según la Tabla 33, se puede determinar que el mayor responsable de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causantes del Potencial de Cambio Climático es la producción de la Bolsa de Cemento, haciendo énfasis en la diferencia entre un cemento puzolánico como el YURA usado para el caso convencional 1 y una bolsa de cemento Portland Tipo I utilizado para los casos convencionales 2 y 3.

Tabla 33: Resultados IPCC de Casos Convencionales de Concreto

| ELEMENTOS | CASO 1 (*) | | CASO 2 | | CASO 3 | |
|--|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | (kg CO _{2eq}) | % | (kg CO _{2eq}) | % | (kg CO _{2eq}) | % |
| Bolsa de Cemento - YURA (*) / Bolsa de Cemento - UNACEM | 1.87E+02 | 93.05% | 2.91E+02 | 95.56% | 2.14E+02 | 92.93% |
| Arena (Agregado fino) | 3.73E+00 | 1.86% | 9.60E+00 | 3.15% | 2.86E+00 | 1.24% |
| Agua | 7.84E-02 | 0.04% | 8.35E-02 | 0.03% | 6.96E-02 | 0.03% |
| Grava (Agregado grueso) | 1.02E+01 | 5.05% | 3.84E+00 | 1.26% | 1.34E+01 | 5.80% |
| TOTAL (kg CO_{2eq}) | 2.01E+02 | 100.00% | 3.05E+02 | 100.00% | 2.31E+02 | 100.00% |

Fuente: Elaboración propia

De forma similar, la Figura 22 muestra la cantidad de kilogramos de dióxido de carbono equivalente de cada proceso presente, incluyendo la producción de gruesos reciclados en cada una de las mezclas. Entre los resultados, resulta evidente la importancia que persiste del cemento como material predominante ocupando el 93.8%, 96.2% y 94.3% en cada caso, respectivamente. Por su parte, la producción de AGR 10% más la grava en el caso 1 suman un total de 8.71 kg CO_{2eq} (4.38%); en el caso 2, un total de 3.69 kg CO_{2eq} (1.22%) y para el caso 3, suman 10.23 kg CO_{2eq} (4.5%); todos los valores por debajo del total de sus análogos, las 3 mezclas convencionales de concreto.

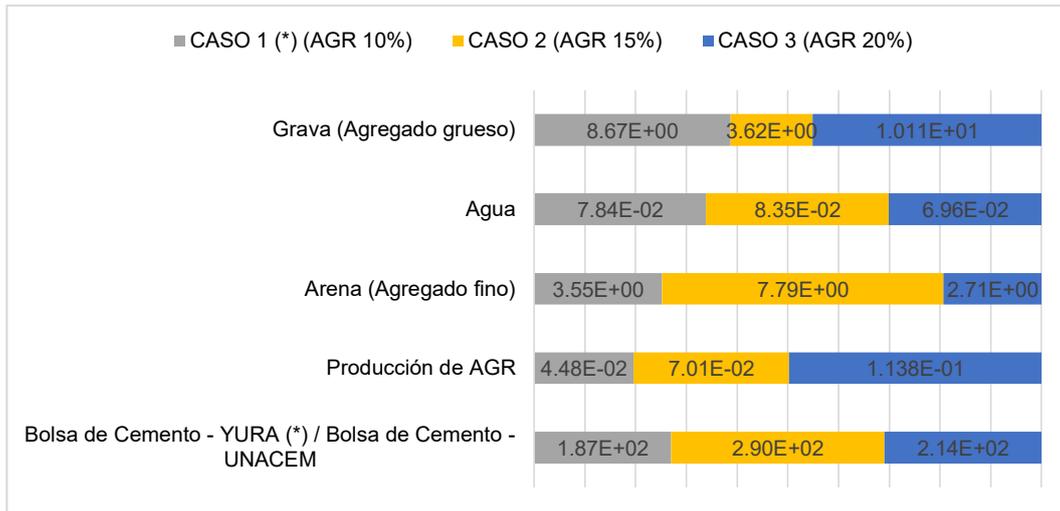


Figura 22: Porcentajes de Incidencia de los casos de concreto reciclado – IPCC GWP 100a

Se debe referenciar que los procesos de *Demolición y Transporte* fueron incluidos en el proceso de *Producción de Agregados Reciclados*; por lo tanto, también tienen incidencia en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Para los casos 1 y 2, la producción de áridos reciclados representa el 0.02%, según la metodología de evaluación IPCC GWP 100a; mientras que, para el caso 3, se obtuvo 0.05% del total de kg CO_{2eq}. Esta variación radica en el tipo diferente de trituradora utilizada entre los dos primeros casos y el último, previo al segundo tamizado, debido a la calidad requerida de RCD. No obstante, por más pequeña parte que represente la *Producción de Áridos Reciclados* en la mezcla, los procesos de *Demolición y Transporte* ocupan, al menos, 90% de ese total.

Por su parte, se debe recurrir a la metodología de evaluación ReCiPe para determinar el impacto del uso de áridos reciclados en cada una de las 17 categorías de impacto. Entre los resultados, se decidió realizar un comparativo del porcentaje de variación entre el uso de agregado grueso natural y el uso de agregado grueso mixto; es decir, la suma de agregado natural y agregado reciclado. Así, se podrá verificar cuánto es el ahorro promedio por optar por el concreto reciclado, frente al uso de concreto convencional y el análisis reflejará las categorías de impacto más favorables (Figura 27).

En cuanto al Caso 1, la Figura 36 refleja un promedio de 14.4% en la reducción de las emisiones referentes a todas las categorías de impacto, siendo las 5 más favorables *Radiación Ionizante, Ecotoxicidad de agua dulce, Toxicidad carcinogénica humana, Escasez de recursos naturales y Consumo de agua*. Por su parte, el Caso 2 refleja una disminución de 4.93% en promedio referentes a las 17 categorías de impacto de ReCiPe situando *Eutrofización de agua dulce, Toxicidad carcinogénica humana, Uso de Tierra, Escasez de recursos naturales y Consumo de agua* como las 5 más favorables, al optar

por la opción de reciclado. Por último, el Caso 3 de estudio lleva a un ahorro de 23.88%, en promedio, y sitúa *Radiación Ionizante*, *Eutrofización de agua dulce*, *Toxicidad carcinogénica humana*, *Escasez de recursos naturales* y *Consumo de agua* como las 5 categorías de impacto más favorables de la metodología de evaluación ReCiPe. De forma análoga, no se debe perder de vista que las 3 categorías de impacto cuya disminución es menor son *Formación de ozono (salud humana)*, *Formación de ozono (ecosistemas terrestres)* y *Escasez de recursos fósiles* (Figura 23).

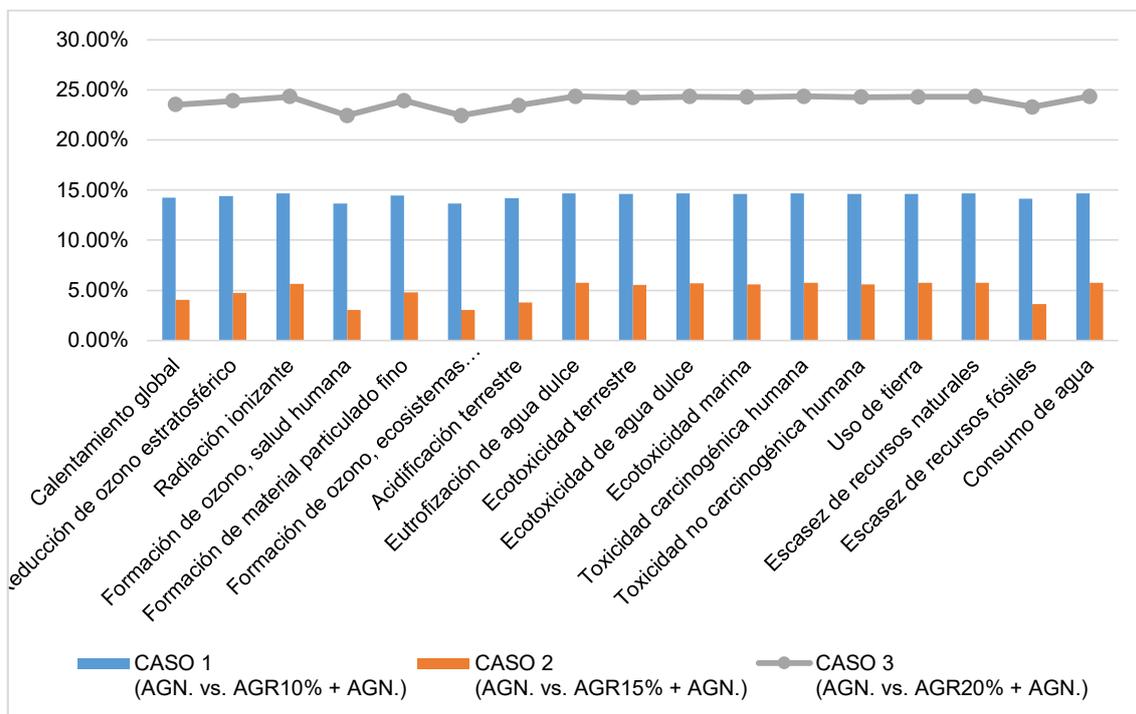


Figura 23: Impacto de la Producción de Áridos Reciclados vs. Uso de Grava de Categorías de Impacto de la metodología de evaluación ReCiPe

Fuente: Elaboración propia

Además, para complementar la presentación de resultados, se optó por mostrar el comparativo de los 3 casos de estudio y el impacto de sus insumos para cada categoría de impacto de la metodología de evaluación ReCiPe en las Tablas 34, 35 y 36, respectivamente. De esa manera, se evidenciarán las disminuciones no solo de Gases de Efecto Invernadero (GEI), sino de otros agentes contaminantes.

Tabla 34: Resultados ReCIPe de Producción de Concreto con 10% de árido reciclado.

| Categoría de impacto | Unidad | CASO 1 CONVENCIONAL | | | | | CASO 1 RECICLADO (AGR 10%) | | | | | |
|--|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| | | Total | Bolsa de Cemento - YURA | Grava (Agregado grueso) | Agua | Arena (Agregado fino) | Total | Bolsa de Cemento - YURA | Producción de 10% AGR | Arena (Agregado fino) | Agua | Grava (Agregado grueso) |
| Calentamiento global | kg CO ₂ eq | 2.01E+02 | 1.87E+02 | 1.03E+01 | 7.99E-02 | 3.79E+00 | 1.99E+02 | 1.87E+02 | 4.51E-02 | 3.60E+00 | 7.99E-02 | 8.81E+00 |
| Reducción de ozono estratosférico | kg CFC11 eq | 2.57E-05 | 1.94E-05 | 4.56E-06 | 3.08E-08 | 1.65E-06 | 2.49E-05 | 1.94E-05 | 1.17E-08 | 1.56E-06 | 3.08E-08 | 3.89E-06 |
| Radiación ionizante | kBq Co-60 eq | 2.46E+00 | 4.01E-01 | 1.60E+00 | 1.16E-02 | 4.52E-01 | 2.20E+00 | 4.00E-01 | 5.04E-04 | 4.29E-01 | 1.16E-02 | 1.36E+00 |
| Formación de ozono, salud humana | kg NO _x eq | 3.30E-01 | 2.75E-01 | 3.60E-02 | 1.77E-04 | 1.97E-02 | 3.24E-01 | 2.74E-01 | 3.62E-04 | 1.87E-02 | 1.77E-04 | 3.07E-02 |
| Formación de material particulado fino | kg PM2.5 eq | 5.53E-02 | 2.92E-02 | 1.93E-02 | 1.51E-04 | 6.66E-03 | 5.21E-02 | 2.92E-02 | 4.49E-05 | 6.32E-03 | 1.51E-04 | 1.64E-02 |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | kg NO _x eq | 3.85E-01 | 3.29E-01 | 3.66E-02 | 1.78E-04 | 2.01E-02 | 3.79E-01 | 3.28E-01 | 3.67E-04 | 1.91E-02 | 1.78E-04 | 3.13E-02 |
| Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | 2.09E-01 | 1.32E-01 | 5.71E-02 | 3.72E-04 | 2.04E-02 | 2.00E-01 | 1.31E-01 | 2.75E-04 | 1.94E-02 | 3.72E-04 | 4.87E-02 |
| Eutrofización de agua dulce | kg P eq | 8.47E-03 | 3.40E-03 | 3.84E-03 | 2.72E-05 | 1.20E-03 | 7.84E-03 | 3.39E-03 | 6.54E-07 | 1.14E-03 | 2.72E-05 | 3.28E-03 |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB e | 3.46E-02 | 2.58E-02 | 6.35E-03 | 2.06E-05 | 2.47E-03 | 3.35E-02 | 2.58E-02 | 5.24E-06 | 2.34E-03 | 2.06E-05 | 5.41E-03 |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB e | 8.55E-01 | 5.12E-01 | 2.54E-01 | 1.08E-03 | 8.75E-02 | 8.12E-01 | 5.11E-01 | 8.51E-05 | 8.31E-02 | 1.08E-03 | 2.17E-01 |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DBC e | 1.26E+00 | 7.71E-01 | 3.64E-01 | 1.53E-03 | 1.27E-01 | 1.20E+00 | 7.69E-01 | 2.19E-04 | 1.21E-01 | 1.53E-03 | 3.10E-01 |
| Toxicidad carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 1.32E+00 | 4.71E-01 | 6.28E-01 | 1.88E-03 | 2.19E-01 | 1.22E+00 | 4.70E-01 | 1.52E-04 | 2.08E-01 | 1.88E-03 | 5.36E-01 |
| Toxicidad no carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 9.72E+02 | 6.32E+02 | 2.50E+02 | 1.09E+00 | 8.85E+01 | 9.29E+02 | 6.30E+02 | 1.37E-01 | 8.40E+01 | 1.09E+00 | 2.14E+02 |
| Uso de tierra | m ² a crop eq | 4.43E+00 | 3.70E+00 | 4.23E-01 | 8.16E-04 | 3.11E-01 | 4.35E+00 | 3.69E+00 | 2.11E-04 | 2.96E-01 | 8.16E-04 | 3.61E-01 |
| Escasez de recursos naturales | kg Cu eq | 2.48E-01 | 1.34E-01 | 8.45E-02 | 8.30E-05 | 2.95E-02 | 2.34E-01 | 1.33E-01 | 2.09E-05 | 2.80E-02 | 8.30E-05 | 7.21E-02 |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 8.67E+00 | 5.18E+00 | 2.49E+00 | 1.82E-02 | 9.76E-01 | 8.25E+00 | 5.17E+00 | 1.41E-02 | 9.27E-01 | 1.82E-02 | 2.12E+00 |
| Consumo de agua | m ³ | 7.71E+01 | 2.71E+01 | 3.77E+01 | 4.57E-01 | 1.19E+01 | 7.09E+01 | 2.70E+01 | 6.48E-03 | 1.13E+01 | 4.57E-01 | 3.21E+01 |

Tabla 35: Resultados ReCIPE de Producción de Concreto con 15% de árido reciclado.

| Categoría de impacto | Unidad | CASO 2 CONVENCIONAL | | | | | CASO 2 RECICLADO (AGR 15%) | | | | | |
|--|--------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| | | Total | Bolsa de Cemento - UNACEM | Grava (Agregado grueso) | Agua | Arena (Agregado fino) | Total | Bolsa de Cemento - UNACEM | Producción de 15% AGR | Arena (Agregado fino) | Agua | Grava (Agregado grueso) |
| Calentamiento global | kg CO ₂ eq | 3.06E+02 | 2.93E+02 | 3.90E+00 | 8.51E-02 | 9.76E+00 | 3.04E+02 | 2.92E+02 | 7.05E-02 | 7.92E+00 | 8.51E-02 | 3.67E+00 |
| Reducción de ozono estratosférico | kg CFC11 eq | 4.69E-05 | 4.09E-05 | 1.69E-06 | 3.27E-08 | 4.31E-06 | 4.60E-05 | 4.08E-05 | 1.83E-08 | 3.50E-06 | 3.27E-08 | 1.60E-06 |
| Radiación ionizante | kBq Co-60 eq | 3.88E+00 | 1.90E+00 | 4.65E-01 | 1.24E-02 | 1.51E+00 | 3.57E+00 | 1.89E+00 | 7.88E-04 | 1.22E+00 | 1.24E-02 | 4.38E-01 |
| Formación de ozono, salud humana | kg NO _x eq | 4.63E-01 | 4.08E-01 | 2.03E-02 | 1.88E-04 | 3.40E-02 | 4.55E-01 | 4.08E-01 | 5.67E-04 | 2.76E-02 | 1.88E-04 | 1.91E-02 |
| Formación de material particulado fino | kg PM2.5 eq | 1.06E-01 | 8.05E-02 | 6.85E-03 | 1.61E-04 | 1.82E-02 | 1.02E-01 | 8.03E-02 | 7.02E-05 | 1.48E-02 | 1.61E-04 | 6.45E-03 |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | kg NO _x eq | 4.89E-01 | 4.33E-01 | 2.06E-02 | 1.90E-04 | 3.46E-02 | 4.81E-01 | 4.32E-01 | 5.75E-04 | 2.81E-02 | 1.90E-04 | 1.94E-02 |
| Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | 3.58E-01 | 2.82E-01 | 2.10E-02 | 3.96E-04 | 5.40E-02 | 3.46E-01 | 2.82E-01 | 4.31E-04 | 4.38E-02 | 3.96E-04 | 1.98E-02 |
| Eutrofización de agua dulce | kg P eq | 1.24E-02 | 7.52E-03 | 1.23E-03 | 2.90E-05 | 3.63E-03 | 1.16E-02 | 7.50E-03 | 1.02E-06 | 2.95E-03 | 2.90E-05 | 1.16E-03 |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB e | 5.43E-02 | 4.58E-02 | 2.54E-03 | 2.20E-05 | 6.00E-03 | 5.29E-02 | 4.57E-02 | 8.21E-06 | 4.87E-03 | 2.20E-05 | 2.39E-03 |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB e | 1.28E+00 | 9.44E-01 | 9.01E-02 | 1.15E-03 | 2.40E-01 | 1.22E+00 | 9.42E-01 | 1.33E-04 | 1.95E-01 | 1.15E-03 | 8.48E-02 |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DBC e | 1.95E+00 | 1.47E+00 | 1.31E-01 | 1.63E-03 | 3.44E-01 | 1.87E+00 | 1.47E+00 | 3.43E-04 | 2.79E-01 | 1.63E-03 | 1.23E-01 |
| Toxicidad carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 2.09E+00 | 1.27E+00 | 2.26E-01 | 2.01E-03 | 5.94E-01 | 1.97E+00 | 1.27E+00 | 2.37E-04 | 4.82E-01 | 2.01E-03 | 2.13E-01 |
| Toxicidad no carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 1.44E+03 | 1.12E+03 | 9.11E+01 | 1.16E+00 | 2.37E+02 | 1.39E+03 | 1.11E+03 | 2.15E-01 | 1.92E+02 | 1.16E+00 | 8.57E+01 |
| Uso de tierra | m ² a crop eq | 5.47E+00 | 4.75E+00 | 3.20E-01 | 8.69E-04 | 4.00E-01 | 5.36E+00 | 4.74E+00 | 3.30E-04 | 3.24E-01 | 8.69E-04 | 3.02E-01 |
| Escasez de recursos naturales | kg Cu eq | 8.80E-01 | 7.70E-01 | 3.04E-02 | 8.84E-05 | 7.99E-02 | 8.61E-01 | 7.68E-01 | 3.27E-05 | 6.48E-02 | 8.84E-05 | 2.86E-02 |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 3.39E+01 | 3.05E+01 | 1.00E+00 | 1.94E-02 | 2.35E+00 | 3.33E+01 | 3.04E+01 | 2.20E-02 | 1.91E+00 | 1.94E-02 | 9.46E-01 |
| Consumo de agua | m ³ | 1.16E+02 | 6.77E+01 | 1.23E+01 | 4.86E-01 | 3.56E+01 | 1.09E+02 | 6.76E+01 | 1.01E-02 | 2.89E+01 | 4.86E-01 | 1.16E+01 |

Tabla 36: Resultados ReCIPe de Producción de Concreto con 20% de árido reciclado.

| Categoría de impacto | Unidad | CASO 3 CONVENCIONAL | | | | | CASO 3 RECICLADO (AGR 20%) | | | | | |
|--|--------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| | | Total | Bolsa de Cemento - UNACEM | Grava (Agregado grueso) | Agua | Arena (Agregado fino) | Total | Bolsa de Cemento - UNACEM | Producción de 20% AGR | Arena (Agregado fino) | Agua | Grava (Agregado grueso) |
| Calentamiento global | kg CO ₂ eq | 2.32E+02 | 2.15E+02 | 1.36E+01 | 7.10E-02 | 2.90E+00 | 2.29E+02 | 2.15E+02 | 1.15E-01 | 2.75E+00 | 7.10E-02 | 1.03E+01 |
| Reducción de ozono estratosférico | kg CFC11 eq | 3.74E-05 | 3.01E-05 | 6.00E-06 | 2.73E-08 | 1.26E-06 | 3.59E-05 | 3.01E-05 | 2.98E-08 | 1.20E-06 | 2.73E-08 | 4.54E-06 |
| Radiación ionizante | kBq Co-60 eq | 3.85E+00 | 1.40E+00 | 2.10E+00 | 1.03E-02 | 3.46E-01 | 3.32E+00 | 1.40E+00 | 1.28E-03 | 3.29E-01 | 1.03E-02 | 1.59E+00 |
| Formación de ozono, salud humana | kg NO _x eq | 3.63E-01 | 3.01E-01 | 4.73E-02 | 1.57E-04 | 1.51E-02 | 3.52E-01 | 3.01E-01 | 9.22E-04 | 1.43E-02 | 1.57E-04 | 3.58E-02 |
| Formación de material particulado fino | kg PM2.5 eq | 8.98E-02 | 5.92E-02 | 2.54E-02 | 1.34E-04 | 5.09E-03 | 8.35E-02 | 5.93E-02 | 1.14E-04 | 4.84E-03 | 1.34E-04 | 1.92E-02 |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | kg NO _x eq | 3.83E-01 | 3.19E-01 | 4.82E-02 | 1.58E-04 | 1.53E-02 | 3.71E-01 | 3.19E-01 | 9.34E-04 | 1.46E-02 | 1.58E-04 | 3.65E-02 |
| Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | 2.99E-01 | 2.08E-01 | 7.52E-02 | 3.30E-04 | 1.56E-02 | 2.81E-01 | 2.08E-01 | 7.00E-04 | 1.48E-02 | 3.30E-04 | 5.69E-02 |
| Eutrofización de agua dulce | kg P eq | 1.15E-02 | 5.53E-03 | 5.06E-03 | 2.42E-05 | 9.15E-04 | 1.03E-02 | 5.54E-03 | 1.66E-06 | 8.69E-04 | 2.42E-05 | 3.82E-03 |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB e | 4.39E-02 | 3.37E-02 | 8.35E-03 | 1.83E-05 | 1.89E-03 | 4.18E-02 | 3.37E-02 | 1.33E-05 | 1.79E-03 | 1.83E-05 | 6.32E-03 |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB e | 1.10E+00 | 6.95E-01 | 3.35E-01 | 9.58E-04 | 6.70E-02 | 1.01E+00 | 6.95E-01 | 2.16E-04 | 6.36E-02 | 9.58E-04 | 2.53E-01 |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DBC e | 1.66E+00 | 1.08E+00 | 4.79E-01 | 1.36E-03 | 9.74E-02 | 1.54E+00 | 1.08E+00 | 5.57E-04 | 9.25E-02 | 1.36E-03 | 3.62E-01 |
| Toxicidad carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 1.93E+00 | 9.37E-01 | 8.27E-01 | 1.67E-03 | 1.68E-01 | 1.72E+00 | 9.37E-01 | 3.86E-04 | 1.59E-01 | 1.67E-03 | 6.25E-01 |
| Toxicidad no carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 1.22E+03 | 8.21E+02 | 3.30E+02 | 9.71E-01 | 6.77E+01 | 1.14E+03 | 8.22E+02 | 3.49E-01 | 6.43E+01 | 9.71E-01 | 2.49E+02 |
| Uso de tierra | m ² a crop eq | 4.29E+00 | 3.49E+00 | 5.56E-01 | 7.25E-04 | 2.38E-01 | 4.14E+00 | 3.49E+00 | 5.36E-04 | 2.26E-01 | 7.25E-04 | 4.21E-01 |
| Escasez de recursos naturales | kg Cu eq | 7.00E-01 | 5.67E-01 | 1.11E-01 | 7.37E-05 | 2.26E-02 | 6.72E-01 | 5.67E-01 | 5.31E-05 | 2.15E-02 | 7.37E-05 | 8.41E-02 |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 2.65E+01 | 2.25E+01 | 3.28E+00 | 1.61E-02 | 7.47E-01 | 2.57E+01 | 2.25E+01 | 3.57E-02 | 7.09E-01 | 1.61E-02 | 2.48E+00 |
| Consumo de agua | m ³ | 1.09E+02 | 4.98E+01 | 4.96E+01 | 4.05E-01 | 9.12E+00 | 9.64E+01 | 4.99E+01 | 1.65E-02 | 8.67E+00 | 4.05E-01 | 3.75E+01 |

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Interpretación de resultados

Luego de culminar la modelación de cada uno de los procesos que se encuentran en los límites del sistema evaluado, se debe proceder a entender los resultados obtenidos y exportados por el software SimaPro. En primera instancia, para el caso de los 2 primeros procesos unificados *Demolición y Transporte*, se tienen el Uso de diésel B5 y las emisiones producto de su combustión como elementos más incidentes, tanto para la metodología IPCC como para ReCiPe. Por ejemplo, en la categoría de impacto *Calentamiento Global* y su similar *Global Warming Potential*, el uso de diésel B5 es responsable del 58.8% y 59.3%, respectivamente, del total de kg CO₂eq. Mientras que, las emisiones de la combustión del diésel ocupan el 34.7% y 34.2% del total de kg CO₂eq, respectivamente. Es decir, solo por el uso de maquinaria durante la generación de escombros producto de la demolición y su posterior transporte, ya se habrá emanado 8.22 kg CO₂eq/ m³ de material demolido, valor a estudiar en la Tabla 37.

Tabla 37: Resultados GWP enfatizados en Diésel B5, según IPCC – Demolición y Transporte

| | Uso de Diésel B5 | | Emisiones por uso de Diésel B5 | |
|-------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| | kg CO ₂ eq | % incidencia | kg CO ₂ eq | % incidencia |
| Volquetes | 3.50E+00 | 39.85% | 2.05E+00 | 23.31% |
| Excavadora | 7.25E-01 | 8.25% | 4.37E-01 | 4.98% |
| Cisternas | 9.38E-01 | 10.67% | 5.63E-01 | 6.41% |

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la cantidad de volquetes es mucho mayor a la de excavadoras y cisternas, su combustible es responsable de 3.50 kg CO₂eq; por su parte, el diésel de las 2 maquinarias restantes ocupa 7.25 kg CO₂eq y 9.38 kg CO₂eq, respectivamente. Por lo tanto, durante estos procesos, se debe tener especial énfasis en la adecuada cantidad y calidad de volquetes, excavadoras y cisternas para procurar reducir al máximo estos valores. Por un lado, la cantidad dependerá de la distancia total incluyendo el viaje desde el emplazamiento del proveedor hasta el lugar de demolición y del volumen de material suelto a eliminar, y por el otro, la calidad del tipo de motor de los vehículos.

De forma análoga, ReCiPe evalúa otras 17 categorías de impacto de las que se analizan los elementos más incidentes en 5 categorías representativas, mediante la Figura 34. Así, la *ecotoxicidad terrestre* producto del Uso de Diésel B5 se sitúa en 22.01 kg 1,4-DCB; la *escasez de recursos fósiles* en 8.04 kg oil eq y la *toxicidad humana no*

carcinogénica en 2.23 kg 1,4-DCB. Por su parte, el *uso del suelo* tiene un valor de 1.36 m²a crop eq; mientras que, la *radiación ionizante* ocupa un valor de 2.65 kBq Co-60 eq.

De los procesos unificados de *Demolición y Transporte*, la *ecotoxicidad terrestre* y la *toxicidad humana no carcinogénica* cuentan con la misma unidad llamada kilogramos 1,4 – Diclorobenceno y tienen los mismos elementos como principales incidentes, el *uso de diésel B5* y la *excavadora* hidráulica. Para la primera categoría de impacto, ocupan 95.3% y 1.64%; mientras que, para la segunda categoría de impacto, 79.4% por *uso de diésel B5* y 12.44% correspondiente a *excavadora hidráulica*. Por su parte, la *radiación ionizante* (kBq Co-60 eq), el *uso del suelo* (m²a crop eq) y la *escasez de recursos fósiles* (kg oil eq) cuentan con los mismos elementos incidentes, tanto el *uso de diésel B5* como el *consumo de agua*. Para la primera de las 3 categorías de impacto ambiental, se obtienen 88.3% y 6.54%; para la segunda, 99.4% y 0.23% y para la última mencionada, 98.1% y 0.70%, respectivamente. En suma, se vuelve a remarcar la gran importancia que cobra el uso del combustible, también en categorías de impacto de ReCiPe que traducen su afección tanto al ecosistema como al ser humano. Por lo tanto, se enfatizarán los resultados por consumo de combustible en la maquinaria utilizada para ahondar más en el entendimiento, con ayuda de la Tabla 38.

Tabla 38: Resultados enfatizados en Diésel B5, según ReCiPe – Demolición y Transporte

| | | Uso de Diésel B5 | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------|--------------|------------|--------------|-----------|--------------|
| | | Volquetes | | Excavadora | | Cisternas | |
| | | Valor | % incidencia | Valor | % incidencia | Valor | % incidencia |
| Radiación ionizante | kBq Co-60 eq | 1.80E-01 | 59.89% | 3.73E-02 | 12.40% | 4.82E-02 | 16.04% |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB | 1.49E+01 | 64.58% | 3.09E+00 | 13.37% | 4.00E+00 | 17.29% |
| Toxicidad humana no carcinogénica | kg 1,4-DCB | 1.51E+00 | 53.84% | 3.13E-01 | 11.15% | 4.04E-01 | 14.42% |
| Uso del suelo | m ² a crop eq | 9.23E-01 | 67.40% | 1.91E-01 | 13.95% | 2.47E-01 | 18.05% |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 5.45E+00 | 66.50% | 1.13E+00 | 13.77% | 1.46E+00 | 17.81% |

Fuente: Elaboración propia

Una vez más, el elemento de Uso de Diésel B5 resulta bastante importante en las emisiones de las categorías de impacto ambiental de ReCiPe; por lo tanto, se recalca que a medida que se vayan controlando los vehículos a usar y la calidad de sus motores, se podrán mitigar los impactos ambientales negativos, a escala global.

El 6.53% restante o 574 g CO₂eq/m³ de material demolido está repartido entre el consumo de electricidad del martillo eléctrico y la amoladora, el consumo de acetileno y

oxígeno del equipo oxicorte, el consumo de agua de las cisternas, el proceso de obtención de la excavadora hidráulica y las salidas (material particulado del proceso y emisiones por combustión de acetileno). De ellos, este proceso llamado *Salidas* tendría un enfoque diferente y mayor incidencia en el total de kilogramos de dióxido de carbono equivalente si variaran sus emisores. Por un lado, el material particulado depende estrictamente de los volquetes y las condiciones de las pistas por donde transitarían; sin embargo, el combustible del equipo oxicorte podría variar. Para esta investigación, se tenía como opciones el uso de oxibutano u oxiacetileno y se optó por el uso del último combustible por ser de carácter común en el mercado. No obstante, se debe hacer hincapié en que esta decisión también define menores emisiones en Potencial de Cambio Climático y en el resto de categorías de impacto de ReCiPe debido a que el uso de butano conlleva factores de emisión EPA mucho mayores que los de acetileno. De igual manera, las cantidades de oxígeno varían poniendo por delante al factor por combustión de butano con 7.21 sobre 3.93 m³/h referente al acetileno; ambos valores considerando el precalentamiento y el uso del combustible especificados en la Tabla 39.

Tabla 39: Diferencia entre uso de oxiacetileno y oxibutano

| | | EQUIPO DE OXIACETILENO | | EQUIPO DE OXIBUTANO | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| | | Consumo de oxígeno | Consumo de acetileno | Consumo de oxígeno | Consumo de butano | |
| | | 3.93 m ³ /h | 0.029 m ³ /h | 7.21 m ³ /h | 0.42 m ³ /h | |
| | | COMBUSTIÓN DE ACETILENO | | COMBUSTIÓN DE BUTANO | | |
| GASES DE EFECTO INVERNADERO | Factores de emisión EPA (kg/kg gas) | Consumo total de acetileno (kg) | Emisiones (kg) | Factores de emisión EPA (kg/gal) | Consumo total de butano (gal) | Emisiones (kg) |
| CO ₂ | 2.92E+00 | 2.87E+00 | 8.38E+00 | 6.67E+00 | 9.99E+03 | 6.66E+04 |
| CH ₄ | 2.37E-04 | 2.87E+00 | 6.82E-04 | 3.10E-04 | 9.99E+03 | 3.10E+00 |
| N ₂ O | 4.70E-06 | 2.87E+00 | 1.35E-05 | 6.00E-05 | 9.99E+03 | 5.99E-01 |

Fuente: Elaboración propia

Luego, tal cual se comentó en el capítulo anterior, el factor de la cantidad de kilómetros recorridos tiene gran importancia en el proceso de *Demolición y Transporte* y aunque su incidencia en las mezclas de concreto reciclado sea de poco menos del 1% del total, resulta importante analizar cuánto variaría si los puntos de llegada disminuirían al 50%. A nivel de GEI, al disminuir las distancias de las 3 rutas planteadas en el capítulo *METODOLOGÍA* a 10.45 km, 10.8 km y 7.2 km, respectivamente, se obtendría un resultado de 5.27E+00 en lugar de 8.79E+00 kg CO₂eq; es decir, se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero en 3.52 kg CO₂eq/m³ de material demolido.

Por su parte, la metodología ReCiPe permite obtener el impacto de la disminución de las distancias de transporte en porcentaje de reducción por cada categoría de impacto ambiental. Además, se debe recalcar que debido a que únicamente disminuyeron los km recorridos a la mitad, los cambios directos se evidencian en la generación de material particulado de *Salidas, Uso de Diésel B5 y Emisiones por uso de Diésel B5*. Todo ello se ve reflejado en la Tabla 40.

Tabla 40: Diferencias por reducción de distancias de transporte al 50%, según las 17 categorías de impacto ambiental de ReCiPe

| Categoría de impacto | Unidad | 100% KM RECORRIDOS | | | | 50% KM RECORRIDOS | | | | % REDUCCIÓN |
|--|--------------------------|--|------------------|--------------------------------|----------|--|------------------|--------------------------------|----------|-------------|
| | | Salidas (PM, emisiones uso de Acetileno) | Uso de Diésel B5 | Emisiones por uso de Diésel B5 | TOTAL | Salidas (PM, emisiones uso de Acetileno) | Uso de Diésel B5 | Emisiones por uso de Diésel B5 | TOTAL | |
| Calentamiento global | kg CO ₂ eq | 1.90E-03 | 5.30E+00 | 3.05E+00 | 8.93E+00 | 1.90E-03 | 3.03E+00 | 1.74E+00 | 5.36E+00 | 40.04% |
| Reducción de ozono estratosférico | kg CFC11 eq | 3.23E-11 | 7.84E-06 | 3.18E-07 | 8.36E-06 | 3.23E-11 | 4.48E-06 | 1.82E-07 | 4.86E-06 | 41.83% |
| Radiación ionizante | kBq Co-60 eq | 0.00E+00 | 2.65E-01 | 0.00E+00 | 3.01E-01 | 0.00E+00 | 1.52E-01 | 0.00E+00 | 1.87E-01 | 37.85% |
| Formación de ozono, salud humana | kg NO _x eq | 0.00E+00 | 2.01E-02 | 2.76E-02 | 4.88E-02 | 0.00E+00 | 1.15E-02 | 1.58E-02 | 2.83E-02 | 41.89% |
| Formación de material particulado fino | kg PM _{2.5} eq | 2.40E-03 | 1.34E-02 | 5.81E-03 | 2.27E-02 | 1.76E-03 | 7.64E-03 | 3.32E-03 | 1.38E-02 | 38.99% |
| Formación de ozono, ecosistemas terrestres | kg NO _x eq | 0.00E+00 | 2.11E-02 | 2.77E-02 | 4.99E-02 | 0.00E+00 | 1.21E-02 | 1.58E-02 | 2.90E-02 | 41.89% |
| Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | 0.00E+00 | 3.59E-02 | 1.95E-02 | 5.73E-02 | 0.00E+00 | 2.05E-02 | 1.12E-02 | 3.36E-02 | 41.44% |
| Eutrofización de agua dulce | kg P eq | 0.00E+00 | 5.15E-04 | 0.00E+00 | 7.40E-04 | 0.00E+00 | 2.94E-04 | 0.00E+00 | 5.19E-04 | 29.83% |
| Ecotoxicidad terrestre | kg 1,4-DCB e | 0.00E+00 | 6.27E-04 | 0.00E+00 | 6.42E-04 | 0.00E+00 | 3.58E-04 | 0.00E+00 | 3.73E-04 | 41.87% |
| Ecotoxicidad de agua dulce | kg 1,4-DCB e | 0.00E+00 | 2.20E+01 | 2.63E-01 | 2.31E+01 | 0.00E+00 | 1.26E+01 | 1.50E-01 | 1.36E+01 | 41.31% |
| Ecotoxicidad marina | kg 1,4-DBC e | 0.00E+00 | 4.83E-02 | 1.04E-05 | 6.73E-02 | 0.00E+00 | 2.76E-02 | 5.94E-06 | 4.66E-02 | 30.79% |
| Toxicidad carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 0.00E+00 | 8.59E-02 | 2.14E-04 | 1.13E-01 | 0.00E+00 | 4.91E-02 | 1.22E-04 | 7.57E-02 | 32.76% |
| Toxicidad no carcinogénica humana | kg 1,4-DBC e | 0.00E+00 | 1.04E-01 | 6.84E-06 | 1.38E-01 | 0.00E+00 | 5.95E-02 | 3.91E-06 | 9.33E-02 | 32.35% |
| Uso de tierra | m ² a crop eq | 0.00E+00 | 2.23E+00 | 1.43E-02 | 2.80E+00 | 0.00E+00 | 1.27E+00 | 8.15E-03 | 1.84E+00 | 34.25% |
| Escasez de recursos naturales | kg Cu eq | 0.00E+00 | 1.36E+00 | 0.00E+00 | 1.37E+00 | 0.00E+00 | 7.78E-01 | 0.00E+00 | 7.86E-01 | 42.60% |
| Escasez de recursos fósiles | kg oil eq | 0.00E+00 | 8.16E-03 | 0.00E+00 | 1.03E-02 | 0.00E+00 | 4.66E-03 | 0.00E+00 | 6.84E-03 | 33.82% |
| Consumo de agua | m ³ | 0.00E+00 | 8.04E+00 | 0.00E+00 | 8.19E+00 | 0.00E+00 | 4.59E+00 | 0.00E+00 | 4.75E+00 | 42.04% |

En cuanto a la *Producción de Áridos Reciclados*, se tomó en cuenta el Diésel B5 necesario para el funcionamiento de la planta de tratamiento de RCD, sus emisiones por quema de combustible y la incidencia del proceso unificado de *Demolición y Transporte* especificado en un factor de 1.09 m³ de RCD/ ton de agregado grueso reciclado producido. En ese sentido, resulta llamativa la razón del resultado por debajo de 1% en emisiones de gases de efecto invernadero; para empezar, se debe tener en cuenta que las cantidades de AGR tienen un valor máximo de 20% de la masa ocupada por el agregado grueso convencional. A su vez, los resultados están en función de 1 m³ de concreto producido y por último, el agregado grueso no es el principal responsable de las emisiones a causa de la producción de concreto, sino la producción del cemento.

No obstante, se debe explicar la razón de las diferencias en porcentajes de incidencia de la producción de agregados reciclados respecto a la producción del concreto reciclado. Se debe recordar que las calidades de los casos de estudio fueron definidos al inicio del proyecto, haciendo énfasis en que tanto el Caso 1 (AGR 10%) como el 2 (AGR 15%) eran concreto estructural con diferente tipo de cemento y el caso 3 (AGR 20%), concreto de rellenos y carreteras. Por lo tanto, para este último se utilizó una trituradora de impacto que produce agregados de mayor tamaño máximo diferentes a los de la trituradora de cono, cuyos estándares son más altos (TM más bajo), tiene mayor potencia y requiere mayor volumen de diésel B5 para su funcionamiento.

Además, se debe considerar que la planta diseñada es una planta fija completa con 2 trituraciones, 3 tamizados, separadores magnéticos y otros componentes para una mejor obtención de agregados con materia prima en RCD. Si esta habría sido una planta móvil, se consideraría uso de diésel B5 para el traslado de los elementos de menor tamaño al emplazamiento de producción de concreto y, definitivamente, el impacto habría sido diferente por las capacidades reales de planta (tn/h), las calidades de AGR obtenidas, la disminución en procesos y los modelos de elementos variables.

Por último, todos lo mencionado anteriormente repercute en el proceso principal del sistema, la *Producción de Concreto*. Hasta este punto, se pudo verificar la gran responsabilidad que conlleva utilizar combustibles fósiles como Diésel B5, la importancia indirecta de las distancias recorridas en el carburante y las variaciones en los componentes de los procesos de obtención de agregados reciclados. En definitiva, surgen muchas medidas de mitigación de impactos que serán tomadas en cuenta, sin antes emplear el comparativo entre los casos convencionales y reciclados.

6.2. Comparación de los resultados con el concreto convencional

El principal objetivo de este proyecto de investigación de carácter técnico-ambiental es comparar los resultados obtenidos de cada caso de estudio, tomando en consideración la unidad funcional de 1 metro cúbico de concreto producido, para determinar la viabilidad del reciclado de los RCD y un posible uso en nuevas mezclas de concreto. Para ello, será útil analizar cada caso por separado y determinar los factores incidentes en cada situación, según la calidad de sus componentes y sus funcionalidades. He de decir que se tomaron algunas consideraciones que deben ser remarcadas en el análisis; por ejemplo, para esta investigación, se optó por mantener las relaciones agua/cemento en todas las mezclas. Es decir, se mantuvo la cantidad de agua sin agregar 5% para brindar trabajabilidad, ni se adicionó 5 o 6% de cemento; en lugar de ello, se presaturaron los áridos reciclados. Aun así, la mayor porosidad del mortero de cemento adherido a las partículas, hace que el peso por unidad de volumen sea inferior en 9% (Zega, 2008); por lo tanto, el valor de AGR en todos los casos se verá afectado por 0.91. Por otro lado, debido a la adherencia de los finos en los agregados gruesos reciclados, se redujo en 5% la cantidad de agregado fino en mezcla para mantener las proporciones de agregados mixtos y cumplir con el criterio de dosificación del concreto reciclado.

Para empezar, el caso de estudio 1 contrastó los impactos ambientales generados en la producción de concreto puzolánico de 280 kg/cm^2 y su análogo de concreto con agregado grueso mixto: 10% de árido grueso reciclado y 90% convencional. Esta mezcla siguió la dosificación recomendada por UNACEM para la resistencia mencionada con piedra de Tamaño Máximo $\frac{3}{4}$ " (Huso 67), $w/c=0.50$ y usando cemento puzolánico YURA. Los resultados producto de la evaluación mediante IPCC arrojaron valores de $201.13 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$ para concreto convencional y $199.08 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$ para concreto reciclado AGR 10%. Mientras que, referencialmente para su similar *Calentamiento Global* de ReCiPe, se obtuvieron valores de $201.45 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$ y $199.38 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$, respectivamente. En cuanto a las 16 categorías de impacto ambiental restantes, todas presentan una reducción de, aproximadamente, 14.43% con respecto al convencional debido al uso de agregado mixto con AGR 10% y a la reducción en 5% de agregado fino, como se puede evidenciar en la Tabla 40. Además, se debe hacer especial énfasis en que, para esta primera situación, las condiciones de exposición son marinas, tal que se necesite un cemento que evite la reacción por cloruros y sulfatos. En ese sentido, el uso del cemento puzolánico brinda lo necesario para cubrir estas solicitudes en la mezcla de concreto convencional de forma holgada. Sin embargo, debido a la carencia de normativa, su uso en concreto reciclado resulta sujeto a las pruebas químicas necesarias que aseguren el cumplimiento de las propiedades mecánicas.

Según los resultados, la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero es de 2.05 kg CO₂eq/m³ concreto producido o 1.02% con respecto al caso convencional y es el 2° caso en diferencias con respecto a sus análogos. Esta cercanía se debe al comportamiento físico y mecánico de la puzolana en la mezcla; esta toba volcánica guarda dos propiedades muy importantes: (a) aptitud para reaccionar con Ca (OH)₂ en presencia de agua y capacidad para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes (Soria, 1983). Es decir, funciona como adición para ahorrar la cantidad de cemento en mezcla; dicho de otro modo, si se usara cemento tipo I, posiblemente el ahorro habría sido mucho menor y las emisiones mayores. Por lo tanto, se puede decir que las diferencias expuestas en la Tabla 33, no se deben únicamente a la medida tomada de reemplazar 10% de convencional por árido reciclado, sino también al uso de la puzolana como opción importante para aligerar la carga ambiental.

En cuanto al caso de estudio 2, se contrastaron la mezcla de concreto convencional estructural de 210 kg/cm² de resistencia con su análogo de concreto reciclado con agregado grueso mixto: 15% de agregado grueso reciclado y 85% de agregado natural. Se debe enfatizar que la mezcla convencional siguió la dosificación recomendada por UNACEM para la resistencia mencionada, piedra ¾" (Huso 67), w/c=0.61 y se utilizó cemento Portland Tipo I. En sus resultados, se pudo apreciar que el uso de este tipo de cemento aumentó las emisiones de GEI, situándolo en el primer caso de los tres con valores de 291 kg CO₂eq para IPCC y 290 kg CO₂eq para ReCiPe; es decir, 95.6% y 96.2% del total de emisiones, solo por el uso del cemento Tipo I, respectivamente. En general, los resultados producto de la evaluación IPCC arrojaron valores de 305 kg CO₂eq para concreto convencional y 302 kg CO₂eq para su análogo con AGR 15%. A modo de referencia, ReCiPe arroja, en su categoría de impacto similar llamada *Calentamiento Global*, valores muy cercanos de 306 kg CO₂eq y 304 kg CO₂eq, respectivamente. En ese sentido, la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero es de 2.60 kg CO₂eq/m³ concreto producido o de tan solo 0.85% con respecto al caso convencional y es el 3° caso en diferencias según IPCC, con respecto a sus análogos. Por su parte, de las 16 categorías de impacto ReCiPe mostradas en la Tabla 40, todas presentan una reducción de, aproximadamente, 4.93% con respecto al convencional debido al uso de agregado mixto con AGR 15% y a la reducción en 5% de agregado fino convencional. Se puede decir que debido a que se trata del 1° caso en emisiones por uso del cemento, teniendo 9.1 bolsas en su dosificación por debajo de las 10.8 del caso 3, existe repercusión en la baja reducción en porcentaje para las categorías de impacto ReCiPe. Entonces, se plantea la curiosidad sobre qué habría

pasado si se utilizaba cemento puzolánico YURA, en lugar de cemento UNACEM Portland TIPO I.

Si se revisa la cantidad de bolsas utilizadas para el caso 1, se obtienen 6.7 bolsas lo que equivale a 285 kg de cemento que accionan y emiten 187 kg CO₂eq de GEI; es decir, su factor potencial emanante es de 0.66 kg CO₂eq/1 kg de cemento puzolánico. Entonces, al utilizar la dosificación de la UNACEM para la resistencia de 210 kg/cm² se obtendría el resultado mostrado en la Tabla 41.

Tabla 41: Análisis de escenario para CASO 2 con cemento puzolánico

| CASO 2 CONVENCIONAL – CON CEMENTO YURA | | CASO 2 RECICLADO – CON CEMENTO YURA | |
|--|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Elementos | (kg CO ₂ eq) | Elementos | (kg CO ₂ eq) |
| Bolsa de Cemento - YURA | 2.54E+02 | Bolsa de Cemento – YURA | 2.54E+02 |
| Arena (Agregado fino) | 9.60E+00 | Arena (Agregado fino) | 7.79E+00 |
| Agua | 8.35E-02 | Agua | 8.35E-02 |
| Grava (Agregado grueso) | 3.84E+00 | Grava (Agregado grueso) | 3.62E+00 |
| | | Producción de AGR 15% | 7.01E-02 |
| TOTAL (kg CO₂eq) | 2.68E+02 | TOTAL (kg CO₂eq) | 2.65E+02 |

De ser ese el caso, la emisión de GEI decrece en 36.78 kg CO₂eq/m³ concreto producido con respecto al Caso 2 original con cemento Tipo I ocasionando una reducción relativa entre ambas mezclas con puzolánico de 2.52 kg CO₂eq o de 0.94%. Esto se debe a las características conglomerantes de la puzolana que permiten la reducción significativa en emisiones del cemento y que junto al uso de agregado reciclado y el decrecimiento de AFN, se logre aliviar la carga ambiental de producción.

Por último, el caso de estudio 3 plantea la comparación entre la mezcla de concreto convencional de 140kg/cm² de resistencia con su análogo de concreto reciclado con agregado grueso mixto: 20% de agregado grueso reciclado y 80% de agregado natural. Se debe enfatizar que la mezcla convencional siguió la dosificación recomendada por UNACEM para la resistencia mencionada, piedra 1" (Huso 57), w/c=0.69, cemento Portland Tipo I y se caracteriza por ser concreto pobre destinado a rellenos y carreteras. Los resultados de la evaluación mediante IPCC arrojaron valores de 231 kg CO₂eq para concreto convencional y 227 kg CO₂eq para concreto reciclado AGR 20%. Mientras que, referencialmente para su similar *Calentamiento Global* de ReCiPe, se obtuvieron valores de 232 kg CO₂eq y 229 kg CO₂eq, respectivamente. En cuanto a las 16 categorías de impacto ambiental restantes, todas presentan una reducción de, aproximadamente,

23.9% con respecto al convencional debido al uso de agregado mixto con AGR 20% y a la reducción en 5% de agregado fino, como también se evidencia en la Tabla 41.

Según estos resultados, la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero es de 3.24 kg CO₂eq/ m³ concreto producido o 1.40% con respecto al caso convencional y es el 1° caso en diferencias con respecto a sus análogos. Definitivamente, ya se puede marcar una tendencia de crecimiento en la que se afirma que mientras mayor sea la cantidad de agregado grueso reemplazada en mezcla, mayores serán las diferencias y decrecimiento en emisiones; sin embargo, esto ocurriría a costa de la calidad de la mezcla. Dicho de otro modo, se encontrarán mejores resultados para concretos más pobres; mientras que, para casos estructurales luego de realizados los ensayos respectivos, las disminuciones serán menos perceptibles. En este caso, resulta evidente que el uso de cemento puzolánico pasa a ser condicionado por un factor económico, pero podría trabajarse con la puzolana como adiciones para aliviar la carga ambiental.

Se optó por dejar la interpretación de resultados de la metodología de evaluación ReCiPe para el final, debido a que los 3 casos de estudio repiten más de una categoría de impacto ambiental en orden decreciente con disminuciones en emisiones por uso de árido reciclado. Por ejemplo, el Caso 1 de concreto con cemento puzolánico de 280 kg/cm² presenta sus mayores reducciones en *Consumo de agua*, *Eutrofización de agua dulce* y le sigue un empate de 3 categorías: *Escasez de recursos minerales*, *Toxicidad carcinogénica humana* y *Radiación Ionizante*. El Caso 2 de concreto con cemento UNACEM Portland Tipo I de 210 kg/cm² sitúa sus máximos decrecimientos en *Consumo de agua*, *Eutrofización de agua dulce*, *Uso de la tierra*, *Escasez de recursos minerales* y *Toxicidad carcinogénica humana*. Por su parte, el Caso 3 de concreto de 140 kg/cm² enfoca sus reducciones máximas en *Consumo de agua*, *Eutrofización de agua dulce*, *Escasez de recursos minerales*, *Toxicidad carcinogénica humana* y *Radiación Ionizante*.

La primera categoría de impacto ambiental cuyos resultados son positivos para el uso del reciclado es el *Consumo de agua*, valor referido en m³ al uso del agua evaporada, incorporada a otros productos, transferida a otras cuencas hidrográficas o eliminada al mar (Falkenmark et al., 2004). El beneficio de reducir el *Consumo de agua* con alternativas permitiría reducir las vías de daño como la escasez de agua de irrigación, la reducción de diversidad en flora (Pfister et al., 2009) y el cambio en los afluentes de río (Hannafiah et al., 2011). Para esta investigación, el uso del concreto reciclado permite obtener una reducción producto del mayor uso de agua y desviaciones mayores de ríos del proceso convencional de producción de agregados naturales, desde la

extracción y disipación de material particulado en las canteras vírgenes. En lugar de ello, la minimización de material particulado con control de agua en cisternas y la presaturación de agregados mixtos de un porcentaje de áridos gruesos resulta conveniente frente al problema. Entonces, las reducciones obtenidas son de 5.53 m³ para el caso 1, 0.706 m³ para el 2 y 12.08 m³ para el caso 3, reafirmando la hipótesis de que a medida que más agregado reciclado tengo en mezcla, tengo posibilidad de mayor ahorro de agua.

En segundo lugar, para todos los casos, se encuentra la *Eutrofización de agua dulce*, categoría de impacto ambiental que evalúa la descarga de nutrientes en el suelo o en las masas de agua dulce, situación que trae como efecto la elevación de los niveles de nutrientes; específicamente, de fósforo y nitrógeno (National Institute for Public Health and the Environment, 2016). Asimismo, la fuente específica que la cadena de afecciones lleva al aumento en la absorción de nutrientes por organismos autótrofos como las cianobacterias y algas, y heterótrofos como peces e invertebrados que habitan en agua dulce, llevándolas a su desaparición. Así, el fósforo se transmite del suelo al agua dulce originando fracciones potencialmente desaparecidas (PDFs) y zonas muertas por el largo tiempo de concentración de nutrientes (2016). El principal responsable de esto es la generación de hipoxia por actividades antropogénicas como ganadería, agricultura, residuos urbanos, industrias, actividad forestal y contaminación atmosférica. Para esta investigación, se puede deducir que el menor uso de combustible, el decrecimiento en agotamiento de canteras vírgenes por usos de reciclados y la reducción en deforestación contribuyen a reducir la emisión de fósforo y nitrógeno. En ese sentido, para el caso 1, la disminución en la generación de fósforo equivalente se encuentra en 5.64E-04 P eq, para el segundo está en 7.08E-05 Peq y para el último caso, en 1.23E-03 Peq.

En tercera instancia, se encuentra la *Escasez de recursos minerales*, categoría de impacto ambiental medida en kilogramos de cobre equivalente (kg Cu_{eq}) cuya repercusión afecta directamente a la disponibilidad de recursos naturales. A modo de resumen, según el Reporte I de ReCiPe 2016, la cadena causa – efecto indica que el decrecimiento en la extracción del mineral, lleva a disminuir su capacidad de producción y las extracciones futuras (National Institute for Public Health and the Environment, 2016), haciendo énfasis en que los factores de caracterización llevan a contrastar la extracción de un mineral “X” con la de 1 kg de Cobre, para facilidades de resultados. Para esta investigación, al aumentar el uso de reciclados en mezcla, se observa menor cantidad de canteras vírgenes intervenidas; por lo tanto, disminuyen las áreas de

yacimientos minerales para la producción de agregados pétreos y materiales silíceos, caliza y minerales de hierro para el cemento. En ese sentido, para el caso 1, el tipo de cemento IP llevó a tener una reducción mayor de $1.24E-02$ kg Cu eq por la presencia de la puzolana más el AGR10%. Para el segundo caso, el AGR15% llevó a una disminución menor por ser cemento tipo I de $1.74E-03$ kg Cu eq y para el último caso, el AGR20% permitió una gran reducción de $2.71E-02$ kg Cu eq.

La cuarta gran disminución se centró en la categoría de impacto ambiental *Toxicidad carcinogénica humana*, medida en kg 1,4-DBC eq, cuya cadena de formación inicia por emisiones de químicos y culmina por contacto o exposición con seres humanos, originando daños a su salud, a corto y largo plazo, que podrían condicionarse como cancerígenos. La producción de cemento y agregados pétreos son procedimientos donde intervienen gases tóxicos; por ejemplo, durante la explotación de canteras vírgenes de caliza y roca dura, se usan explosivos con base de nitroglicerina, compuesto cuyo contacto prolongado por inhalación se vuelve tóxico para los trabajadores del área. Asimismo, los procedimientos post extracción de materia prima, durante la producción de Clinker en hornos, suele incluir exposiciones a metales pesados como cadmio, mercurio, berilio, cromo hexavalente y otros posibles cancerígenos. Entonces, cualquier reducción en los procedimientos de combustión y trabajos en hornos por producción de Clinker resultan convenientes para aliviar, tanto la carga ambiental como la salud humana. Por lo tanto, el empleo de cemento puzolánico y AGR10% del caso 1 permiten aliviar las emisiones de kg 1,4-DBC eq en $9.21E-02$; para el caso 2, el uso de cemento tipo I y AGR15% llevan a reducir el impacto en $1.29E-02$ y en el caso 3, la presencia de AGR20% llevó a una reducción de $2.01E-01$.

Por último, se encuentran la *Radiación Ionizante* y *Uso de la tierra* como categorías de impacto ambiental cuyas reducciones han sido más importantes frente a las 17 categorías restantes. Para la primera mencionada, el Informe ReCiPe 2016, afirma que el principal responsable es el ser humano en la emisión de un radionúclido al medioambiente. Este se dispersa y se expone a la población mundial produciendo daños a la salud humana por incremento en enfermedades cancerígenas y otras enfermedades genéticamente hereditarias por daños en las moléculas del ADN (National Institute for Public Health and the Environment, 2016). De acuerdo a los posibles causantes del mismo informe mencionado, en esta investigación se denotan reducciones por disminución del ciclo del combustible en actividades como explotación de canteras vírgenes, uso de residuos, reducción de eliminación de desechos y menor uso de combustibles fósiles. Así, los decrementos se dieron en $2.34E-01$ kBq Co-60 eq para el

primer caso, $2.64E-02$ kBq Co-60 eq para el segundo caso y $5.11E-01$ kBq Co-60 eq para el tercero, reafirmando la importancia del uso de puzolana, la necesidad de reducción de obtención de clínker, la búsqueda de energías limpias y la presencia de reciclados en el sector, específicamente, en mezclas de concreto.

En cuanto al *Uso de la tierra*, ReCiPe especifica su cálculo en la pérdida relativa de especies mediante modelos específicos (De Baan et al., 2013; Elshout et al., 2014) debido al uso local de tierra, cubriendo procesos de transformación, ocupación y relajación (Köllner et al., 2007). Es decir, la pérdida de especies se debe principalmente a dos factores: (a) cambio de cobertura del suelo original y (b) uso real de la nueva tierra; por lo tanto, evalúa su impacto tanto por la afectación directa a ecosistemas originales como por el desgaste producido por el nuevo uso local para futuros hábitats de especies (National Institute for Public Health and the Environment, 2016). Para el caso de esta investigación, el uso del concreto como material predominante del sector construcción viene siendo sostenido en el tiempo; por lo tanto, siempre va a requerir de agregados. Sin embargo, la sobreexplotación de zonas intervenidas lleva a invadir canteras vírgenes, en busca de materia prima para la producción de áridos y caliza para Clinker, lo cual significa una afectación directa al ecosistema local y desgaste del terreno por extracción de roca y caliza, dañando hábitats en el presente y futuro. En respuesta a este problema, el uso de áridos reciclados y alternativas para el cemento permitirían disminuir las intervenciones en hábitats locales de especies, a costa de evitar crear más desechos y disminuir la sobreexplotación de recursos naturales. En ese sentido, en los 3 escenarios de estudio se obtuvieron resultados positivos reduciendo significativamente afecciones al terreno; para el primero, la disminución de $6.19E-02$ m²a crop eq, $1.84E-02$ m²a crop eq para el segundo y $1.35E-01$ m²a crop eq para el tercero.

Por otro lado, también existen 2 categorías cuyos resultados significan los menos afectados por el uso de reciclados y son *Escasez de recursos fósiles* y *Formación de ozono*, tanto para *salud humana* como para *ecosistemas terrestres*. Si bien, el primer resultado se evalúa en kg NO_xeq y el segundo en kg oil eq, se puede adjudicar sus cortas disminuciones a un factor en común, al continuo uso del diésel como combustible principal. Entonces, no se termina de interrumpir del todo la cadena de suministro de diésel B5 para la maquinaria y se forman sustancias NO_x, que reaccionan con compuestos orgánicos volátiles, facultando la formación de ozono e impactando en daños a ecosistemas terrestres y a la salud humana por enfermedades respiratorias. Por su parte, según National Institute for Public Health and the Environment, la escasez de recursos fósiles lleva a un incremento del costo y a una futura extracción de los

mismos (2016). Por ejemplo, cuando se agote todo el petróleo convencional, según Ponsioen et al., se aplicarán técnicas alternativas, como la recuperación mejorada de petróleo, o se producirá petróleo en ubicaciones geográficas alternativas con costos más altos, como las regiones árticas (2014). Sin embargo, si se buscaran alternativas de combustibles y energéticas, podrían mitigarse los impactos bajo nuevas medidas.

6.3. Medidas de mitigación de impactos y optimización

Luego de haber analizado cada uno de los resultados y haber comparado todos los casos de estudio de reciclado con su análogo convencional, es posible que existan muchas otras formas de realizar un balance positivo, ambientalmente hablando. Por ende, las medidas de mitigación que se expongan, en primer lugar, se centrarán en la hipótesis general y, luego, se basarán en dar soluciones en relación a otros materiales.

En primera instancia, la producción de concreto reciclado es una gran alternativa pues ofrece un material sostenible frente a la gran realidad de emisiones variadas como GEI, a causa de la producción del concreto convencional. Sin embargo, no en todas las categorías, incluida la de *Calentamiento Global* para ReCiPe o *Potencial de Cambio Climático* para IPCC, se puede verificar gran diferencia a favor del reciclado. Por lo tanto, se puede buscar ajustar ciertos procesos que permitan aligerar aún más la carga ambiental. Entre ellos, evitar o reducir los procesos de combustión de carbón, derivados del petróleo, plantas eléctricas y vehículos motorizados permiten disminuir los agentes contaminantes del aire, del suelo y del agua. Según los resultados, el *Uso de Diésel B5* impactó en los procesos de *Demolición y Transporte*, y en la *Producción de Áridos Reciclados*; por lo tanto, al usar variantes como combustibles eco-amigables en lugar de diésel, se favorecería a la disminución, en gran cantidad, del total de las emisiones. Por ejemplo, los biocombustibles son una gran opción frente a los combustibles fósiles, debido a que son sostenibles, provienen de materia orgánica de origen animal o vegetal y se obtienen a partir de productos renovables ocasionando que sus emisiones de GEI sean mucho menores (García y Calderón, 2012). En ese sentido, existen variedades de estudios al respecto en Norteamérica y Europa que facultan su uso, los dividen en tres generaciones, de acuerdo a sus insumos e industrialización, y que sitúan entre los principales al bioetanol. Por consiguiente, se podría plantear como alternativa carburante o como aditivo oxigenante en la gasolina mediante políticas de Estado y gestiones del sector de Energía y Minas para disminuir, gradualmente, la dependencia por el combustible fósil. Se menciona así porque resulta complicado erradicar por completo su uso para mitigar los impactos por excesivas emisiones de GEI; por lo tanto,

junto con el uso de energías renovables y la búsqueda por la máxima eficiencia energética, la ONU plantea incluirlos dentro de la búsqueda de la sostenibilidad. Así, autores como Scott Foster y David Elzinga informan del trabajo en tecnologías variadas como el secuestro de carbono y la gestión de las emisiones de metano en la cadena de valor de energía fósil, con la finalidad de disminuir la demanda actual de energía primaria a nivel mundial del 80% que comprende el uso de los combustibles fósiles (ONU, S/A). En Perú, hasta el 2012, la distribución por emisiones de GEI por categoría situaba en 66% a la suma de la Agricultura, uso y cambio de uso del suelo, y silvicultura (Uscuss); 26% a Energías, 5% a Desechos y 3% a Procesos Industriales, según el MINAM (2016, p. 69). A su vez, la agricultura y ganadería son responsables de la tasa de 81-93% de deforestación, siendo la primera de las actividades la mayor responsable por tener entre 49-54% de injerencia (Global Green Growth Institute, 2015, p. 14). Por su parte, del 26% correspondiente a Energías, la quema de combustibles contribuye al 92.47% de estas emisiones y de este total, el 43.24% corresponde a Transportes y 28.78% a la Generación de Energía, según el MINAM (2016, p.72). En consecuencia, la quema de combustibles por Transporte se posiciona en el tercer lugar en responsabilidad de las emisiones peruanas, solo por debajo de la conversión de bosques y praderas para usos agrícolas, el cambio de biomasa forestal y otros *stock* leñosos (MINAM, 2016, p. 77). Debido a ello, el Estado Peruano emitió regulaciones correspondientes a impuestos que aplicaban directamente sobre los combustibles como el Impuesto de rodaje, el propio Impuesto General a las Ventas (IGV), el Impuesto Selectivo al Consumo (ISC) y el Impuesto al patrimonio vehicular. No obstante, todos estos tienen variedad de malas especificaciones en sus regulaciones; por ejemplo, los Índices de nocividad de los combustibles (INC) aplicados al ISC no consiguieron adquirir importancia en los consumidores debido a la falta de proporcionalidad entre el ISC y la nocividad carburante (Fanelli et al., 2015, p. 46). A su vez, esta información no logró concientizar a los usuarios al no hallar una relación directa entre el consumo de combustibles altos en emisiones de GEI y el mayor pago de ISC (Vaquera García, 1999, pp. 308 y 309). Por otro lado, el impuesto patrimonial vehicular no se aplicó al parque automotriz antiguo y contaminante, sino que gravó la propiedad de automóviles con antigüedad no mayor a los tres años a los automóviles nuevos (Patón García, 2016, p. 109; Ruiz de Castilla, 2008, p.197). En ese sentido, todos estos impuestos no han venido seguidos de regulaciones integrales que promuevan el uso de energías bajas en carbono (Patón García, 2016, p. 113) originando una brecha y la posibilidad de una ley de *carbon pricing*. Según The World Bank, esta terminología es referida a un instrumento de costeo externo por las emisiones de GEI, tomando en consideración las consecuencias generadas y cargando el daño a sus responsables en forma de precio por kg de CO₂ emitido (2020).

Por consiguiente, esta pérdida económica en los emisores permitirá concientizarlos y brindarles poder decisión entre continuar pagando por sus emisiones o transformar sus actividades, utilizando otro tipo de fuentes energéticas mucho más ecoamigables. Debido a esto, cobra mayor importancia el uso de tecnología limpia y las diferentes formas de innovación pues encuentran nuevos motores de crecimiento económico cuidando sus egresos por conceptos no monitoreados con bajas emisiones de carbono. El Estado Peruano, en el Numeral 22 del Artículo 2 de su Constitución, reconoce el derecho a un ambiente equilibrado y adecuado; mediante la Ley General del Ambiente N° 28611, en el Artículo 05, destaca los costos ambientales como principio y en los Artículos 04 y 36, se establecen vínculos entre la tributación y el daño al medioambiente. En consecuencia, el instrumento *carbon pricing* se torna posible en el Perú, siempre y cuando, se regule mediante una ley por el Poder Legislativo o un Decreto del Poder Ejecutivo, previo acuerdo con las industrias propias del sector energético, en general. Los autores Carlos Trinidad y Ernesto Ortiz en su publicación “Precio al carbono en el Perú: transición energética y justicia climática” confirman que esta sería la oportunidad perfecta para combatir la deforestación, cambios de biomasa y quema de combustibles en transporte; puesto que, se financiarían costos de vigilancia, monitoreo y conservación de bosques y se fomentaría el mercado de tecnología sostenible (pp. 311-312, 2019).

Para el caso de esta investigación, la implementación del *carbon pricing* admitiría tener mayores regulaciones en la producción de vehículos pesados con motores que permitan mayor eficiencia energética, bajo uso de combustibles ecoamigables. A su vez, con el costo por emisiones se podrían financiar investigaciones en biocombustibles, mantenimiento de vías para reducir la generación de material particulado, se podría invertir en motores que cumplan las últimas normas TIER propuestas por EPA y se solucionarían ese 5% de emisiones nacionales en desechos con un mejor tratamiento. Además, la industria del cemento correspondiente al 3% de emisiones nacionales no es la excepción a la regla pues debido a la alta tasa de 1 kg CO₂eq emitido/ tonelada de cemento producido podría fomentarse la investigación en la búsqueda de nuevos materiales cementantes que permitan utilizar la menor cantidad de Clinker posible. De la misma manera, se podrían mejorar las condiciones de producción de cemento y otros materiales como los agregados pétreos (arena y piedra) convencionales y reciclados, buscando aplicar tecnologías sostenibles, mejorando sus componentes, disminuyendo la cantidad de combustible requerido y obteniendo la mayor eficiencia energética con altas cargas de producción en planta (toneladas de material producido / hora trabajada).

Por su parte, así como existen regulaciones enfocadas a gran escala bajo iniciativas del Estado Peruano, también se pueden trabajar alternativas particulares que alivien la carga ambiental, en esta investigación. Por ejemplo, se puede proponer el uso de plantas móviles para menores cubicajes de concreto con agregado reciclado o para condiciones geográficas donde se pueda usar piedra de río y producir tu propio concreto. Si bien la carga de producción es menor, sus componentes particulares conllevan a una disminución en el uso de diésel para su funcionamiento y menores emisiones de GEI. En este punto, podría proponerse el uso de plantas móviles con baja industrialización para concretos de baja resistencia con usos en rellenos y carreteras, y plantas fijas con procesos varios de triturados y tamizados para requerimientos de concreto estructural o condiciones especiales de exposición. Así, se fomentaría el uso del reciclado para la obtención de agregados, disminuiría la sobreexplotación de canteras vírgenes y la deforestación en la zona, y esto repercutiría positivamente en los resultados de ReCiPe.

Del mismo modo, el Caso 1 de estudio permitió mostrar que el uso de puzolana resulta bastante conveniente en las mezclas de concreto reciclado, pues faculta aun más la disminución de emisiones de GEI, logrando mantener sus propiedades mecánicas. Entonces, surge la posibilidad de utilizar la puzolana como aditivo o en cemento puzolánico y su decisión radicarán en el alcance del proyecto, bajo recomendaciones específicas de uso y exposición, dejando para el análisis el resultado económico entre usar puzolana junto al *carbon pricing* o continuar pagando por el uso continuo de Clinker. Entonces, resulta seguro que habrá una mayor disminución solo por el uso de puzolana que por el uso particular de agregados reciclados; ahora, solo basta pensar en qué ocurriría si se apuesta por la combinación de ambos efectos para mitigar los impactos.

Por su parte, el uso de combustibles alternos para equipos de menor escala como los de oxicorte utilizados en esta investigación es una buena alternativa para disminuir los agentes contaminantes. Por ejemplo, el uso de acetileno ha impactado de forma positiva en el análisis de ciclo de vida de los casos de estudio; puesto que, el uso de butano habría condicionado los resultados llegando a considerar nocivo el uso de reciclados. Entonces, se debe tener especial consideración en la informalidad del uso de combustibles, estudiar las posibilidades y encontrar alternativas para reducir impactos.

En cuanto al uso de electricidad como fuente energética, es más complicado disminuir la carga ambiental pues esto depende de la proveniencia de la electricidad y, a su vez, solo las políticas de Estado tienen injerencia en ello. Por ejemplo, una solución sería continuar fomentando la energía limpia, incentivar el uso de aerogeneradores con

grandes inversiones iniciales y asumir costos de mantenimiento por uso de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, la mayor parte de energía renovable en toda América del Sur sigue estableciéndose en las centrales hidroeléctricas, como fuente principal (CEPAL, 2019, p.09) y continúa existiendo una larga brecha en el desarrollo de energías renovables no convencionales, lo cual es contraproducente por las características geográficas de cada país. Por ejemplo, Brasil tiene gran potencial para energía eólica por las noches y Perú, Chile y Bolivia tienen capacidad de producción abundante en energía solar, durante el día (Viscidi y Yépez, 2018). No obstante, aún existen factores limitantes como la falta de acuerdos sobre proyectos de financiación en común para la innovación de las energías renovables en la región, la alta concentración geográfica de las competencias tecnológicas y la ausencia de infraestructura (IRENA, 2015, p.18-20). Adicionalmente, en cada obra se debe buscar reducir el uso de herramientas que requieran combustible y utilizar los eléctricos con la potencia que requiera la actividad para la que se necesita. Por ejemplo, se pueden utilizar vibradores de concreto, equipos de corte, amoladoras, sierras radiales, apisonadores, martillos demolidores, entre otros.

Por último, incluso apostando por el reciclado de Residuos de Concreto y Demolición transformándolos en agregados gruesos de nuevas mezclas de concreto, el porcentaje de disminución de emisiones podría aumentar más mejorando la técnica de mezclado. De ese modo, las técnicas experimentales como el TSMA (Two Stage Mixing Approach) son una salida muy viable para incentivar el reciclado, debido a que optimiza los resultados sin generar nuevas cargas ambientales, únicamente dividiendo los tiempos de adición de agua en dos, brindando mayor uniformidad a la partícula de árido con pasta de cemento y aumentando la resistencia en la zona de transición interfacial (ITZ). Si bien aún no está regulado, son técnicas experimentales con base científica que podrían empezar a ser considerados por su gran aporte y fortalecimiento en los resultados finales de las propiedades mecánicas de las nuevas mezclas de concreto.

Es válido recalcar que los resultados del ACV no cubren todos los impactos generados por el concreto reciclado y la disminución en uso del concreto convencional; p.e., la biodiversidad es uno de los puntos poco interpretados. Al utilizar el concreto con AGR provenientes de los RCD, se reduciría en gran escala la demanda de terreno para rellenos sanitarios y todos los impactos relacionados con lixiviaciones y afecciones al agua subterránea, suelo y aire. Es decir, si se habría incluido este proceso en el sistema del concreto convencional, definitivamente los resultados habrían sido más amplios habiendo ya investigaciones que refuerzan esta postura (Yazdanbakhsh et al., 2017; Knoeri et al., 2013). Por lo tanto, la decisión de uso del concreto reciclado no solo se

podría apoyar en la disminución ambiental a causa de menores emisiones GEI y agentes contaminantes evaluados por ReCiPe. Sino también, en los efectos causados por la generación de nuevos vertederos, siendo este último punto muy valorado en el contexto local debido a la brecha de normativa y a la abundancia de botaderos no reglamentados a lo largo del país, con inmusciones en ambientes biodiversos no aptos para estos fines.

En resumen, la idea es complementar las medidas que pueda tomar el Estado con iniciativas propias en las diversas casuísticas para optimizar los efectos y mitigar la mayor cantidad de impactos ambientales negativos posibles. Para el caso de esta investigación, vendría muy bien la mejora en el compromiso del Ministerio del Ambiente (MINAM) para dar mayor énfasis a las políticas de Estado con la finalidad de buscar la economía circular en la mayoría de los productos posibles. No solo a nivel de regulación, sino también como control y gestión misma, hay que actualizar la data mediante investigación científica y buscar implementar medidas para conseguir reducir las emisiones de carbono de 30 a 40% hacia el 2030, como estrategia nacional ante el Cambio Climático 2050 y cumplir las expectativas trazadas. Si en un sector tan contaminante como el de la Construcción, se puede postar por la reducción, reutilización y reciclaje, en lugar de la incineración o la disposición final en botaderos o lugares no destinados para los deshechos, se marcaría el rumbo a la sostenibilidad. No solo porque se disminuiría y perfeccionaría el control en la generación de residuos, sino también porque incentivaría a nuevas empresas a trabajar en el campo de las energías limpias, mejorando incluso a las industrias ya establecidas como las del cemento y agregados.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis de resultados producto del modelado de los 3 casos de estudio de mezclas de concreto con agregado reciclado proveniente de Residuos de Construcción y Demolición, surgen conclusiones en torno a los puntos más importantes que sitúan a esta alternativa sostenible como válida en este sector tan contaminante. Por lo tanto, se procederá a explicar cada una de ellas, partiendo de la corroboración de la hipótesis planteada y tomando en cuenta el desarrollo paulatino de este proyecto.

Como punto primordial de esta investigación, luego de corroborar el marco teórico que avala los puntos técnicos de este material sostenible en una realidad tan convencional como el Sector Construcción y confirmar la menor generación de emisiones de GEI e impactos ambientales negativos para los 3 casos de estudio mediante los resultados del software SimaPro, se puede reafirmar que la aplicación del concreto reciclado en el Perú resulta factible en la parte técnica como favorable ambientalmente.

A nivel teórico, se pudo referenciar que debido a la situación sísmica del país y siguiendo las recomendaciones de la comunidad científica en ingeniería estructural y de materiales, es posible el uso del concreto con áridos mixtos; es decir, con agregado grueso convencional y un porcentaje de agregado grueso reciclado no mayor al 15%. Esto se ve reflejado en políticas de Estado impuestas en países con situaciones sísmicas muy similares como Estados Unidos, Japón y Chile. Entre ellos, el archipiélago nipón es uno de los países con sismos de subducción muy similares al caso de Perú e incentiva el reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición como áridos; sin embargo, solo apuesta por su uso en gruesos y limita mucho su aporte como agregados finos debido a la alta generación de partículas menores a 4mm que terminan afectando la acción conglomerante del cemento, requieren mayor cantidad de agua y afecta el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto, durante todo el ciclo de madurez. Por esa razón, a modo de símil, se concluye la posibilidad de uso estructural para mezclas de concreto con porcentajes de 10% y 15%, tomando en consideración incluso la afección de cloruros y sulfatos, y llegando a apostar por cemento puzolánico tipo IP. A partir de porcentajes mayores a 15% en masa de agregados gruesos reciclados en

mezcla, se puede concluir que el alcance es diferente; por lo tanto, el uso estructural se vuelve limitado y se opta por apostar por concretos de baja resistencia o de rellenos y carreteras. Así, se prevee la ligera diferencia en propiedades mecánicas dándole menores responsabilidades y solicitaciones al concreto endurecido y se apuesta por la alternativa de concreto reciclado, para fines no estructurales.

No obstante, el incentivo por estas alternativas sostenibles también conlleva gran responsabilidad por parte de la comunidad científica nacional pues existe una brecha en investigación que sitúe un precedente para el desarrollo de la normativa en el tema. Esto, a su vez, genera gran desconfianza en los ingenieros de materiales quienes por carencia de investigación y base científica nacional, y creencia de la existencia de determinadas canteras vírgenes en el territorio, aún continúan reacios frente al reciclaje de agregados y no apuestan por hacer ensayos que den solución a las interrogantes. En respuesta a ello, se recomienda apostar por investigación en el tema tomando como base Planes de Desarrollo de otros países de Europa, Estados Unidos, Japón, Australia, Chile, entre otros donde se venga realizando estudios al respecto y apoyarse en artículos científicos realizados por la American Concrete Institute como el ACI 555R-01. De igual manera, las universidades con laboratorios de materiales donde se realicen ensayos y empresas privadas de concreto jugarán un rol muy importante en el desarrollo de tecnologías debido a que sus publicaciones permitirán corroborar la veracidad del uso de concreto reciclado en premezclados y usos estructurales. Asimismo, se puede complementar la investigación con el aporte de entidades importantes en el Área Química de Materiales como el Instituto de Corrosión y Protección de la PUCP, de tal manera que, se pueda trabajar los niveles de reacción de aditivos en mezclas de concreto reciclado y cómo podría afectar el reciclaje de RCD en entornos afectados por cloruros y sulfatos. Solo así, se podrá trabajar en la brecha persistente a nivel de normativa en un país muy convencional, carente de fondos de investigación y con variedad de recursos naturales, situación que aporta un falso estado de confianza y que termina afectando los hábitats aledaños por la sobreexplotación de canteras vírgenes. En este punto, el Ministerio del Ambiente en conjunción con el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento se tornan muy importantes debido a que sus estrategias deben estar bien diseñadas, tal que incentiven el desarrollo de investigación en el tema. En consecuencia, se podrá nutrir el estado actual de promulgaciones nacional con la finalidad de que tanto la NTP 400.050.2014 como la N° 003-2013-VIVIENDA sean respaldadas y citadas en estudios posteriores, en favor de esta alternativa sostenible.

En cuanto al factor ambiental, los resultados del ACV permiten afirmar que el uso de concreto reciclado para los 3 casos de estudio resulta favorable tanto en emisiones de

GEI como en otros agentes contaminantes evaluados con la metodología ReCiPe. En el primer caso, disminuyeron en 2.05 kg CO₂eq/ m³ de concreto producido; para el caso 2, disminuyó en 2.60 kg CO₂eq/ m³ de concreto producido; mientras que, para el último caso se observó un decremento de 3.24 kg CO₂eq/ m³ de concreto producido. El verdadero beneficio se observa cuando se escala esta disminución en los valores de producción de cemento y su impacto en el concreto. Según el Informe de ASOCEM a noviembre del 2019, el despacho nacional de cemento fue de 11,575 mil toneladas métricas (2020), del cual, según el Ing. José Luis Viacava, gerente de Mixercon, el 70% está representado por cemento en bolsa dirigido a autoconstrucción y el 30% restante al concreto premezclado, aproximadamente (Revista PERÚ CONSTRUYE, 2016). Por lo tanto, se debe enfocar también el trabajo en reducir el fenómeno de autoconstrucción en el país, causante de 8,102 mil toneladas de cemento en el país. De esa manera, se podrá subir la cifra de 3,473 mil toneladas métricas destinadas al concreto premezclado y disminuirá aún más el valor de emisiones de GEI. De ese total de toneladas de cemento producidas, 285 kg cemento/ m³ de concreto producido para la dosificación del Caso 1, 387 kg cemento/ m³ de concreto producido para el caso 2 y 459 kg cemento/ m³ de concreto producido para el caso 3. Por lo tanto, en promedio, se necesitan 377 kg cemento/ m³ de concreto. Siguiendo ese cálculo, con el 30% del total de cemento producido anual destinado a la industria del premezclado, se producen 9'215,031 m³ de concreto al año, en el Perú. De ese total, en su mayoría el concreto premezclado es utilizado para fines estructurales; por lo tanto, se asumirá que el 90% será utilizado de forma similar a los casos 1 y 2; mientras que, el 10% restante será destinado para concreto de baja resistencia. En base a ello, si aplicamos la ratio de disminuciones en emisiones de GEI obtenido, se puede confirmar que, si se apostara por utilizar porcentajes menores a 20% de áridos gruesos en el total del concreto producido a nivel nacional, disminuirían en un intervalo entre 17,002 t CO₂eq y 21,563 t CO₂eq para usos estructurales y 2,986 t CO₂eq para bajas resistencias. En suma, luego del desarrollo de esta investigación, se puede corroborar que si se apostara por ejecutar una Ley de concreto reciclado donde se exijan bajos porcentajes como los de este estudio en la totalidad de dosificaciones anuales en Perú, las disminuciones en emisiones de GEI se situarían en un intervalo promedio de 22,268 t CO₂eq aproximadamente. De igual manera, los resultados positivos también escalan a disminuciones en las categorías de impacto de la metodología de evaluación ReCiPe, situando decrementos de 4.9%, 14.4% y 23.9%, respectivamente en los 3 casos de estudio; sin contar los impactos causados por el transporte y posterior vertido de RCD en botaderos no reglamentados.

En síntesis, se debe recalcar que aún existe trabajo por delante para lograr aumentar estas cifras y se pueda conseguir un mayor beneficio para el medioambiente con respecto al total de emisiones de GEI o de otras categorías de impacto como las de ReCiPe, a nivel nacional. Entre ellas, resulta fundamental disminuir la autoconstrucción en el país para tener un mejor control del cemento utilizado en el concreto premezclado y así poder complementar medidas a la par del uso de áridos reciclados, como la apuesta por la puzolana en mezclas de concreto o en cemento puzolánico como el IP. De igual manera, existen otras estrategias importantes que complementan el uso de agregados reciclados en nuevas mezclas de concreto; por ejemplo, el control del transporte mediante la industrialización estrictamente necesaria de plantas de tratamiento de RCD y el uso de medidas de optimización como el TSMA para asegurar mejoras en las propiedades mecánicas del concreto, durante todo su ciclo de madurez. El primero hace referencia al control de las distancias recorridas por el nivel de importancia del proceso del Uso de Diésel B5 observado en el modelado de los casos de estudio. Es decir, si se trata de puntos lejanos a la planta fija, podría trabajarse con plantas móviles de baja industrialización para concretos de baja resistencia con usos en rellenos y carreteras; mientras que, si se trata de usos estructurales o condiciones especiales de exposición, las plantas fijas con diversos procesos de trituración y tamizado se tornan inamovibles. Por consiguiente, se tendrían facilidades para el incentivo del concreto reciclado, se limitaría bastante el uso de diésel por largas distancias recorridas de los volquetes y se desarrollaría la posibilidad de uso de plantas móviles, fomentando el reciclaje de los RCD con el único propósito de disminuir la sobreexplotación de canteras vírgenes y, en consecuencia, la deforestación en la zona. Para el segundo referido, se necesita ejecutar un Plan Nacional que asegure la constante búsqueda de la mejora continua en la aplicación del concreto reciclado y el cambio en la dinámica del mezclado, sin adicionar carga ambiental, resulta beneficioso.

Perú es un país que reconoce el derecho a un ambiente equilibrado y adecuado; es decir, busca implementar políticas que respalden su compromiso con el Acuerdo de París para reducir las emisiones de GEI en su territorio. Sin embargo, estas decisiones no se complementan con políticas regionales y no permiten descentralizar ejecuciones en favor del medioambiente. Por lo tanto, existe carencia de información sobre indicadores medioambientales, tanto en múltiples regiones como en Lima, llevando a una lucha en frentes desiguales y a la falta de investigaciones científicas que permitan obtener datos reales relacionados a emisiones de GEI y otros agentes contaminantes. En base a ello, se necesita modificar las herramientas de gestión de control de residuos existentes y crear nuevas estrategias que enrumben al país a la implementación de la

economía circular y a la sostenibilidad. Entre las tácticas necesarias, se encuentra la de *carbon pricing*; según lo planteado en esta investigación, una ley o Decreto como esa permitiría incentivar el uso de energías limpias y transformar las industrias basadas en combustibles fósiles. Para el caso del concreto reciclado, esto permitiría disminuir aún más las emisiones atacando el problema desde otros frentes, erradicando los subsidios en combustibles de diversos sectores y sincerando las cifras. Hasta el 2014, apenas se tenían datos que afirmaban el bajo porcentaje de 14% de reciclaje de RCD en Perú (MINAM, 2014); sin embargo, con la aplicación de nuevas Leyes relacionadas a economía circular, el incentivo sería mayor, puesto que continuarían naciendo empresas destinadas a los materiales ecoamigables, basando sus procesos en energías limpias y siempre tomando en consideración la estrategia del *carbon pricing*.

Asimismo, existen diversos frentes donde se pueda poner en práctica la aplicación de todas estas propuestas medioambientales del Sector Construcción; por ejemplo, Perú es un país altamente sísmico con viviendas con gran vulnerabilidad ante eventos telúricos de mediana y gran magnitud. Por lo tanto, las medidas que se deben atender deben ser enfocadas en la población que sufriría frente a un seísmo de esas características. Entonces, surge una necesidad que debe ser atendida, de forma urgente, por parte del Estado Peruano y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y significa la oportunidad para que el concreto reciclado sea el material que responda a ello. Quiero decir, luego de realizar la propicia investigación en el tema y dar validez técnica a este material de construcción sostenible, se podría aprovechar la gran cantidad de RCD que se acumulan en los botaderos de los alrededores de las ciudades del Perú y apostar por un proyecto que radicalice y dé popularidad a una propuesta ambiciosa como esta. Así, se podría controlar la autoconstrucción pues habría una iniciativa de parte del Estado en utilizar el concreto reciclado como material predominante en un proyecto determinado y se atendería ese grave problema latente. De igual forma, el Estado Peruano mediante su Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC), podría aprovechar para proliferar el uso de este tipo de materiales sostenibles para realizar la reconstrucción de hogares, pistas, veredas, entre otras estructuras afectadas por determinados fenómenos naturales. Así, se incentivaría el uso de las mismas y se estimularía la creación de nuevas empresas que se dediquen a la producción de materiales sustentables, bajo el uso de tecnologías con energías limpias.

El concreto con agregados reciclados es un material de construcción sostenible porque satisface las necesidades actuales sin comprometer a las generaciones futuras y porque su utilización frente a su análogo, el concreto convencional, garantiza el equilibrio entre

el crecimiento económico, cuidado del medioambiente y bienestar social, durante todo su ciclo de producción. Esta investigación y todas las futuras continuarán formando parte de ello y reconfirmarán que la economía circular es necesaria, que la reducción, reutilización y reciclaje son herramientas valiosas y que el control en la generación de residuos en el Perú resulta muy importante, pues asegurará la búsqueda constante de la sostenibilidad en un sector tan convencional como lo es el Sector de la Construcción.

REFERENCIAS

- Aggregain. (2009). WRAP. Recuperado de www.aggregain.org.uk/case_studies/2716_use_of_recy.html
- Aguilar, D. Loo, F. Vázquez, I. (2017). Análisis de eco-eficiencia de la demolición de una edificación en Lima. (Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú)
- American Concrete Institute. (2001). 555R-01 Remoción y reutilización de concreto endurecido. Capítulo 5 - Producción de hormigón a partir de hormigón reciclado, pp.18-26.
- Aneiros, L.M. (2008). Gestión de RCD y su repercusión en el desarrollo sostenible. Residuos, 102: pp. 48 – 60.
- ASOCEM (2020). Reporte Estadístico Mensual. Noviembre, 2020.
- Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). (2006). Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Comisión 2 Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón reciclado”. 1ra ed. España: Invoprint, s.l.
- B.E. Flynn. (1998). “Amenaza invisible: olores y gases de vertedero de residuos C&D”. Waste Age, vol. 29 de enero.
- Banco Central de Reserva del Perú. (2018). Cuadros estadísticos PBI. Recuperado de <http://www.bcrp.gob.pe/publicaciones/nota-semanal/cuadros-estadisticos.html>
- Bernier, G.; Malier, Y.; y Mazars J. (1978). “Nuevo material a partir de desechos de demolición de concreto”, Actas de Bibeton, Conferencia internacional sobre el uso de subproductos y desechos en la ingeniería civil, París, pp. 157-162.
- Blengini, G.A., Garbarino, E., (2010). Gestión de recursos y residuos en Turín (Italia): el papel de los áridos reciclados en el mix de suministro sostenible. J. Limpio. Pinchar. 18, pp. 1021-1030.
- Bouso, J. (Sin fecha). La Construcción en el antiguo Perú, pp. 03 – 30.

- Brundtland, G. (1987). Desarrollo Sostenible.
- Building Contractors Society of Japan. (1978). "Estudio sobre agregados reciclados y concreto agregado reciclado", Concrete Journal, V. 16, No. 7, pp. 18-31.
- Bustillo, M (2010) Manual de RCD y áridos reciclados. Madrid: Fuego Editores
- Buttler, A.M. (2003). Hormigón con grandes áridos de hormigón reciclado - Influencia de la era del reciclaje en las propiedades de los áridos reciclados y el hormigón. Tesis de Magister, Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, pp. 199.
- Buyle – Bodin, F., Hadjieva – Zaharieva, R. (2002). Influencia de los áridos reciclados producidos industrialmente en las propiedades de flujo del hormigón. Materiales y estructuras, vol. 35, N ° 252, septiembre - octubre de 2002, pp. 504 - 509.
- CAJAS ECOLÓGICAS. (2021). Recuperado de <https://www.cajas-ecologicas.com/>
- California Emissions Estimator Model (CalEEMod). (2013). Apéndice A: Detalles de cálculo para CalEEMod.
- Chauveinc, J. (2011) Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigones con árido reciclado mediante la modificación del método de mezclado del hormigón. Universidad de Chile.
- Choi, H., Choi, H., Lim, M., Inoue, M., Kitagaki, R., Noguchi, T. (2016). Evaluación del rendimiento mecánico del agregado reciclado de baja calidad mediante la mejora de la interfaz entre la matriz de cemento y el agregado grueso mediante tecnología de modificación de la superficie. Int. J. Concr. Struct. Mater. 10 (no. 1), 87–97.
- CICLO. (2021). Recuperado de <https://economieverde.pe/pymes/ciclo/>
- Clark. Guide in Australia to Environmentally Sustainable Homes. Recuperado de www.greenhouse.gov.au/yourhome/technical/fs34f.htm
- Cochran, K. et al. (2007). Políticas gubernamentales para incrementar el reciclaje de escombros de construcción y demolición. División de Residuos Sólidos del Condado de Clay, Florida, EE.UU. Págs. 18.
- Comisión De las Comunidades Europeas. (2001). LIBRO VERDE. Fomentar un marco europeo para la responsabilidad social de las empresas
- Comisión Económica para América Latinay el Caribe (CEPAL). (2019). Rol y perspectivas del sector eléctrico en la transformación energética de América Latina. Aportes a la implementación del Observatorio Regional sobre Energías Sostenibles.
- Comisión Europea. (2000). Gestión de Residuos de Construcción y Demolición.

- Consultest AG. (1998).
- Cuchí, A. y Sagrera, A. (2007). Reutilización y reciclaje de los residuos del sector de la construcción. *Ambienta*, 66: pp. 59-68.
- De Baan L, Alkemade R, y Köllner T. (2013). Impactos del uso de la tierra en la biodiversidad en LCA: un enfoque global. *Revista Internacional de Evaluación del Ciclo de Vida* 18 (6): 1216-1230. DOI: Impactos globales del uso de la tierra en la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas en LCA.
- Ding, T., Xiao, J., Tam, V.W.Y. (2016) Una evaluación del ciclo de vida de ciclo cerrado de la utilización de hormigón agregado reciclado en China. *Waste Manag.* 56 (2016), 367–375.
- Dosho, TEPCO. (2007). TEPCO ha desarrollado un sistema de trituración y trituración en húmedo para reducir este problema potencial. Japón.
- DS N°019-2016-VIVIENDA. Decreto Supremo que modifica el Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición, aprobado por Decreto Supremo N° 003-2013-VIVIENDA. Consejo de Ministros (2016).
- Elshout PMF, Van Zelm R, Karuppiah R, Laurenzi IJ y Huijbregts MAJ. (2014). Un enfoque basado en datos espacialmente explícito para evaluar el efecto de la ocupación de tierras agrícolas en grupos de especies. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (4): 758-769. DOI: 10.1007 / s11367-014-0701-x.
- Environmental Council of Concrete Organization (2018). El reciclaje de hormigón ahorra recursos y elimina el vertido. Recuperado de <http://infohouse.p2ric.org/ref/14/13602.pdf>
- Etxeberria et al. (2007) “Influencia de la cantidad de áridos gruesos reciclados y el proceso de producción en las propiedades del hormigón de áridos reciclados”. *Cemento y Hormigón* 37. Universidad Politécnica de Cataluña. Facultad de Ingeniería Civil, Barcelona, págs. 735– 742.
- Euformación Consultores S.L. (2012). *Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición*. 2da ed. Málaga: IC editorial.
- Eurostat, B. (2014). Generación de residuos por categoría de residuo, peligrosidad y NACE rev. 2 actividad.
- EUROSTAT. (2014). Generación de residuos por actividad económica. Recuperado de www.ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00106&language=en
- Evangelista, L., De Brito, J., (2007). Comportamiento mecánico del hormigón elaborado con áridos finos de hormigón reciclado. *Cien. Concr. Compos.* 29 (5), pp. 397–401.

- Faleschini, F., Zanini, M.A., Pellegrino, C., Pasinato, S. (2016). Gestión sostenible y suministro de áridos naturales y reciclados en una planta integrada de tamaño medio. *Waste Manag.* 49, pp. 146-155.
- Falkenmark, M. y Rockstrom, J. (2004). Equilibrar el agua para los seres humanos y la naturaleza. El nuevo enfoque en ecohidrología, Earthscan, Londres.
- Fanelli, J. M., Jiménez, J. P., López Azcúnaga, I. (2015). La reforma fiscal ambiental en América Latina [versión Adobe Reader]. Recuperado de <https://bit.ly/2NHQCBx>
- Farina, I., Colangelo, F., Petrillo, A., Ferraro, A., Moccia, I., & Cioffi, R. (2020). ACV de hormigón con residuos de construcción y demolición. *Avances en el reciclaje de desechos de construcción y demolición* (págs. 501-513). Publicación de Woodhead.
- Fastofski, D.C., González, M.A.S., Kern, A.P. (2017). Análisis de sostenibilidad de desarrollos habitacionales a través del sistema brasileño de calificación ambiental Selo Casa Azul. *Habitat Int.* 67, pp. 44–53.
- Federal Highway Administration (FHWA). (1998). Directrices para el usuario de materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos. Publicación No. FHWA-RD-97-148.
- 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.
- FHWA. (2014). Aplicaciones de transporte de áridos de hormigón reciclado.
- FIR. (2005). Documento informativo sobre los efectos del reciclaje de C&DW. Federación Internacional de Reciclaje, Burselas, Bélgica pp. 8.
- Gálvez – Martos, J.-L., Styles, D., Schoenberger, H., Zeschmar-Lahl, B. (2018). Mejores prácticas de gestión de residuos de construcción y demolición en Europa, pp. 166-178.
- García Bryce, J. (2004). “La arquitectura del virreinato”. En: *Arte y arquitectura. Enciclopedia Temática del Perú*, Tomo XV.
- García, H., & Calderón, L. (2012). Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. Colombia.
- 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.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Öznur, H., Taha, I., Taner, M., (2015). Características de falla de los hormigones autocompactantes fabricados con áridos reciclados. *Constr. Build. Mater.* 98, 334–344.

- GESTIÓN. (2018) ¿Qué es el Producto Bruto Interno? Recuperado de <https://gestion.pe/economia/producto-interno-bruto-232886>
- Great Wall Company. (2018). Recuperado de <http://www.greatwallcrusher.com/>
- Guerrero, L et al. (2013). Desafíos de la gestión de residuos sólidos para las ciudades de los países en desarrollo. *Gestión de residuos*, 33 (1), pp. 220-232.
- Gursel, A.P., Masanet, E., Horvatha, A., Stadela, A. (2014). Análisis del inventario de ciclo de vida de la producción de hormigón: una revisión crítica. *Cem. Concr. Compos.* 51, pp. 38–48.
- Hanafiah MM, Xenopoulos MA, Pfister S, Leuven RS, y Huijbregts MAJ. (2011). Factores de caracterización del consumo de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero basados en la extinción de especies de peces de agua dulce. *Ciencia y tecnología ambientales* 45 (12): 5572-5278.
- Hansen, T.C. (Ed.). (1986). "El segundo informe de estado del arte de RILEM sobre áridos reciclados y hormigón árido reciclado", pp. 201-246.
- Hansen, T.C. (Ed.). (1992). *Reciclaje de hormigón y mampostería demolidos*. Taylor & Francis, Londres y Nueva York.
- Hansen, T.C. y Narud, H. (Ed.). (1983). "Resistencia del concreto reciclado hecho de agregado grueso de concreto triturado", *Concrete International*, V.5, No.1, enero, pp. 79-83.
- Hasaba, S.; Kawamura, M.; Toriik K.; and Takemoto, K. (1981). "Contracción por secado y durabilidad del concreto hecho de agregado de concreto reciclado", *The Japan Concrete Institute*, V. 3, pp. 55-60.
- INFOCARBONO – MINAM (2012). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2012*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Cuadros estadísticos Economía*. Recuperado de <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- International Renewable Energy Agency- IRENA. (2015). *ID + D para las tecnologías de energías renovables: cooperación en América Latina y el Caribe*, p.18-20. Recuperado de: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_IDD_America_Latina_y_el_Caribe_2015_ES.pdf
- International Standards Organization (2006). *ISO 14040. Gestión ambiental y evaluación del ciclo de vida: principios y marco*. Organización Internacional de Normalización.
- International Standards Organization (2006). *ISO 14041. Gestión ambiental y evaluación del ciclo de vida - Gestión ambiental - Definición de objetivos y alcances y análisis de inventarios. Requisitos y pautas*. Organización Internacional de Normalización.

- International Standards Organization (2006). ISO 14042. Gestión ambiental y evaluación del ciclo de vida - Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Evaluación del impacto del ciclo de vida. Organización Internacional de Normalización.
- International Standards Organization (2006). ISO 14044. Gestión medioambiental y evaluación del ciclo de vida: requisitos y directrices. Organización Internacional de Normalización.
- IPCC. (2020). Recuperado de <https://www.ipcc.ch/>
- Itec. (2000) Manual de minimización y gestión de residuos en las obras de construcción y demolición. Institut de Tecnol. De la Construcció de Catalunya, pp. 91.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R. (2003). IMPACT +: Una nueva metodología de evaluación del impacto de ciclo de vida. *Int J LCA* 8, 324.
- Katz, A. (2003). Propiedades del hormigón elaborado con árido reciclado de hormigón viejo parcialmente hidratado. *Investigación sobre cemento y hormigón*, vol. 33, N ° 5, pp. 703 - 711.
- Katkhuda, H., Shatarat, N. (2017). Mejora de las propiedades mecánicas del árido de hormigón reciclado mediante fibras de basalto picadas y tratamiento ácido. *Constr. Build. Mater.* 140, 328–335.
- Kikuchi, M., Dosho, Y., Narikawa, M, Ohshima, A. (1998). Aplicación de hormigón reciclado para hormigón estructural. Parte 1 - Estudio experimental sobre la calidad del árido reciclado y del árido reciclado. *Uso de Agregado de Concreto Reciclado, Construcción Sustentable*. Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya, pp. 55-68.
- Kim, T.H., Tae, S.H. (2016). Propuesta de método de evaluación de impacto ambiental para hormigón en Corea del Sur: una aplicación en LCA (evaluación del ciclo de vida). *En t. J. Environ. Res. Salud pública* 13 (11), 1074.
- Klöpffer, W. (1997). Evaluación del ciclo de vida. *Investigación en ciencias ambientales y contaminación*, 4 (4), pp. 223-228.
- Knight, J. (1998). "Comportamiento relativo de hormigones de alta calidad que contienen áridos reciclados y su uso en la construcción"; utilizado de agregado de hormigón reciclado, construcción sostenible; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya, pp. 275-286.
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., & Althaus, H.-J. (2013). LCA comparativo de hormigón reciclado y convencional para aplicaciones estructurales. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 909–918. doi:10.1007/s11367-012-0544-2
- Köllner T, and Scholz RW. (2007). Evaluación de los impactos del uso de la tierra en el medio ambiente natural. Parte 1: Un marco analítico para la ocupación pura de la tierra y el cambio de uso de la tierra. *Revista Internacional de Evaluación del Ciclo de Vida* 12: pp.16-23.

- Kourmpanis, B., Papadopoulos, A., Moustakas, K., Stylianos, M., Haralambous, K. J., Loizidou, M. (2008). "Estudio preliminar para la gestión de residuos de construcción y demolición", *Waste Manag. Res.*, Vol. 26, no 3, pp. 267-275.
- L. Alcayhuamán. (2007). La Ingeniería Civil de los Incas. V Conferencia Latinoamericana y del Caribe de Ingeniería y Tecnología: "Desarrollo de Ingenieros Emprendedores para el Crecimiento Sostenible de América Latina y el Caribe: Educación, Innovación, Tecnología y Práctica", pp. 02 - 09.
- L. M. Aneiros. (2008). "Gestión de RCD y su repercusión en el desarrollo sostenible". *Residuos. La Revista Técnica del Medio Ambiente*. No. 102, pp. 48-60.
- León, M., Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista ingeniería de construcción*, 25(2), 215-240.
- Limbachiya, M.C., Leelawat, T., Dhir, R.K. (2000). Uso de agregado de concreto reciclado en concreto de alta resistencia. *Materiales y estructuras*, vol. 33, nº 233, pp. 574 - 580.
- López, M et al. (2016) Reutilización de residuos de demolición y construcción en infraestructura vial. *Entretexos*, Universidad Iberoamericana León, pp. 38-50.
- Mañá, F et al. (2000a). Situación actual y perspectivas de futuro de los residuos de la construcción. *Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya*, pp. 39.
- Mañá, F et al. (2000b). Plan de gestión de residuos en las obras de construcción y demolición. *Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya*, pp. 87.
- Matthews, H.S., Hendrickson, C.T., & Matthews, D. H. (2013). Evaluación del ciclo de vida: enfoques cuantitativos para las decisiones que importan. Borrador no publicado.
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., de Rojas, M.I.S., Frías, M. (2014). Influencia del árido reciclado mixto en las propiedades físico-mecánicas del hormigón reciclado. *J. Limpio*. Pinchar. 68, pp. 216–225.
- Metha, P.K. (2002). Ecologización de la industria del hormigón para el desarrollo sostenible. *Concrete International, ACI*, vol. 24, N ° 7, julio, pp. 23-28.
- Midwest Research Institute. (1988). Relleno de huecos Factores de emisión de PM10 para fuentes de polvo de áreas abiertas seleccionadas.
- MINAM. (2013). Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales en el Perú Gestión 2012.
- MINAM. (2015). Información provista por los gobiernos locales mediante la plataforma SIGERSOL y Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos.

- MINAM. Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2024 con el apoyo de PROYECTO PE, ONU.
- Minghua, Z. et al. (2009). Gestión de residuos sólidos municipales en la nueva área de Pudong, China. *Journal of Waste Management* 29, pp. 1227–1233.
- Ministerio de Medio Ambiente de España. (2008). Plan Nacional Integrado de Residuos. II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008 – 2015 (II PNRCD).
- Ministerio del Ambiente (Minam). (2016). Tercera Comunicación peruana a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Recuperado de <https://bit.ly/2VXJxSU>
- Montoya, E. (2014). Prácticas Sostenibles en la construcción de edificaciones [Tesis de Pregrado, PUCP]. Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Mukai et al. (1979). "Estudio sobre la reutilización de residuos de hormigón para áridos para hormigón", documento presentado en un seminario sobre conservación de recursos y energía en tecnología del hormigón, Programa de Ciencias Cooperativas Japón-Estados Unidos, San Francisco, California.
- N. Roussat, J. Méhu, M. Abdelghafour, y P. Brula. (2008). "Comportamiento de lixiviación de residuos peligrosos de demolición". *Waste Manag.*, Vol. 28, no 11, pp. 2032-2040.
- Naciones Unidas (2002). Cumbre de Johannesburgo. Recuperado de www.un.org/spanish/conferences/wssd/unced.html
- Naciones Unidas (Sin fecha). El Pacto Mundial de la ONU: La Búsqueda de Soluciones para Retos Globales. Recuperado de www.un.org/es/cr/C3%B3nica-onu/el-pacto-mundial-de-la-onu-la-b%C3%BAsqueda-de-soluciones-para-retos-globales
- Naciones Unidas. (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización, pp. 34
- Nagataki et al. (2004). Evaluación de la sensibilidad al daño inducido por el proceso de reciclaje de los agregados de hormigón reciclado. *Investigación sobre cemento y hormigón* 34, pp. 965–971.
- National Institute for Public Health and the Environment (2016). ReCiPe 2016. Un método armonizado de evaluación del impacto del ciclo de vida a nivel de punto medio y final. Informe I: Caracterización. Informe RIVM 2016-014.
- Norma Ambiental del Distrito Federal (RNAT). (2006). Clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el Distrito Federal. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 12-07-2006.

- NTP 400.021: 2013. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. 3^{era} Edición. Comité Técnico de Normalización de Agregados, concreto, concreto armado y concreto pretensado. (2018).
- NTP 400.022: 2013. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. 3^{era} Edición. Comité Técnico de Normalización de Agregados, concreto, concreto armado y concreto pretensado. (2016).
- NTP 400.050:2017. Manejo de residuos de la construcción. Manejo de residuos de la actividad de la construcción y demolición. Generalidades. 2^a Edición. Consejo de Ministros. (2017).
- Obla K et al.(2007). Concreto triturado retornado como agregados para concreto nuevo, Informe final para el Proyecto de la Fundación de Investigación y Educación de RMC.
- OCDE. (2016). Evaluación de Desempeño Ambiental, Perú.
- Office of Technology Assessment (OTA), "Productos ecológicos por diseño: opciones para un medio ambiente más limpio", OTA-E-541, 1992.
- Oikonomou, N. D. (2005). Áridos de hormigón reciclado. Compuestos de cemento y hormigón, 27 (2), pp. 315-318.
- Olsen, S. I., Fantke, P., Laurent, A., Birkved, M., Bey, N., & Hauschild, M. Z. (2018). Sostenibilidad y LCA en la educación en ingeniería: un plan de estudios del curso Procedia CIRP, 69 (1), pp. 627-632.
- ONU. (2018). Objetivos de Desarrollo. Agenda 2030: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/
- ONU. (2018). Objetivos de Desarrollo. Agenda 2030: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/
- ONU. (S/A). Crónica ONU: Scott Foster y David Elzinga. El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Otazzi, G. (2018). Apuntes del curso Concreto Armado I. 15ma ed. Lima: PUCP.
- PAHO. (2005). Informe de Evaluación Regional de los Servicios Municipales de Gestión de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe.
- Patón García, G. (2016). Fiscalidad ambiental, responsabilidad social y desarrollo sostenible en América Latina: Propuestas para el Perú. Lima: Thomson Reuters.

- Petrillo, A., Cioffi, R., De Felice, F., Colangelo, F., Borrelli, C. (2016). Una evaluación ambiental: una comparación entre el proceso de fabricación de adoquines de hormigón de OPC y geopolímeros en Italia. *Reinar. Prog. Sostener. Energy* 35 (6), pp. 1699-1708.
- Pfister S, Koehler A y Hellweg S. (2009). Evaluación de los impactos ambientales del consumo de agua dulce en LCA. *Ciencia y tecnología ambientales* 43 (11): pp. 4098-4104.
- Pickel, D., Tighe, S., West, J.S. (2017). Evaluación de los beneficios del agregado de concreto reciclado preempapado en concreto de curado variable. *Constr. Build. Mater.* 141, 245–252.
- Ponsioen TC, Vieira MDM, Goedkoop MJ. (2014) El costo excedente como indicador del impacto del ciclo de vida de la escasez de recursos fósiles. *Revista Internacional de Evaluación del Ciclo de Vida* 2014, 19, pp. 872–881.
- Poon, C.S., Lam, C.S., (2008). El efecto de la relación agregado-cemento y los tipos de agregados sobre las propiedades de los bloques de hormigón prefabricados. *Compuestos de cemento y hormigón* 30 (4), pp. 283–289.
- Portocarrero, S. (2017). Simulación basada en agentes con enfoque en sostenibilidad y reducción de riesgo de desastres. [Tesis de Mestría, PUCP]. Repositorio Institucional – Escuela de Postgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- PRé. (2016). Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/recipe>
- Quaranta, N. *, Caligaris, M., López, H. y Unsen, M. (2009). “Uso de residuos de construcción y demolición cuando contienen sustancias peligrosas”. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, Septiembre.
- Queen Elizabeth Prize for Engineering, “Crea el futuro”. (2015).
- Quiroga P. (2003), "El efecto de las características de los agregados en el desempeño del cemento portuario", Austin: Universidad de Texas. Documento de defensa de tesis doctoral.
- Rasheeduzzafar, K. A. (1984). “Concreto reciclado: una fuente de nuevos agregados”, *Cemento, concreto y agregados*, V. 6, No. 1, pp. 17-27.
- Rebri. (2005). Guía Rebri para la recuperación de recursos C&D. Reducción de desechos de materiales de construcción, BRANZ, Nueva Zelanda, pp. 16.
- ReCiPe. (2011). LCIA: the ReCiPe model. Recuperado de: www.rivm.nl/en/Topocs/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe
- Revista PERÚ CONSTRUYE. (2016). Informe Concreto en Obra: Un mercado cada vez más sólido, Ed. 41.
- RILEM. (2018). Recuperado de <https://www.rilem.net/about/introduction-600082>

- Río Merino, M. (2012). Problemática de los RCD. Propuestas para su gestión y reciclaje. Departamento Construcciones Arquitectónicas y su control. EUAT UPM.
- Rodrigues, F., Carvalho, M.T., Evangelista, L., de Brito, J. (2013). Caracterización físico-química y mineralógica de áridos finos de plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición. *J. Limpio. Pinchar*. 52, pp. 438–445.
- Rodríguez, B. I. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín iIE*, 91-97.
- Ruiz de Castilla, F. J. (2008). Impuesto al patrimonio vehicular. *Ius Et Veritas*, (37), 197. Recuperado de <https://bit.ly/2lxDCT8>
- Sánchez De Juan, M. (2005). Estudio sobre utilización de áridos reciclados en hormigón estructural. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Sanchez de Juan, M., Gutierrez, P.A. (2003). Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras.
- Sanchez de Juan, M., Gutierrez, P.A. (2004). Influencia de la calidad del árido reciclado en las propiedades del hormigón. En: *Actas de la Conferencia Internacional RILEM: El uso de materiales reciclados en la construcción y las estructuras*, Barcelona, España, 8-11 de noviembre de 2004, pp. 545-553.
- SETAC (1993). "Directrices para la evaluación del ciclo de vida: un código de prácticas", Sociedad de Toxicología y Química Ambiental.
- Serres, N., Braymand, S., & Feugeas, F. (2016). Evaluación ambiental de hormigón elaborado a partir de áridos de hormigón reciclado implementando evaluación del ciclo de vida. *Journal of Building Engineering*, 5, 24-33.
- Shen, L et al. (2004). Enfoque de mapeo para examinar la gestión de residuos en sitios de construcción. *Journal of Construction Engineering and Management* 130 (4), pp. 472–481.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Mejora del rendimiento del agregado de hormigón reciclado: una revisión. *Journal of Cleaner Production*, 112, 466-472.
- Silva, R.V., De Brito, J., Dhir, R.K., (2014). Propiedades y composición de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición aptos para la producción de hormigón. *Constr. Construir. Mater.* 65, pp. 201–217.
- SimaPro, el software LCA líder en el mundo. (2018). Sobre SimaPro. Recuperado de <https://simapro.com/about/>
- Steinberger, J.K., Krausmann, F., Eisenmenger, N. (2010). Patrones globales de uso de materiales: un análisis socioeconómico y geofísico. *Ecol. Econ.* 69, pp. 1148-1158.

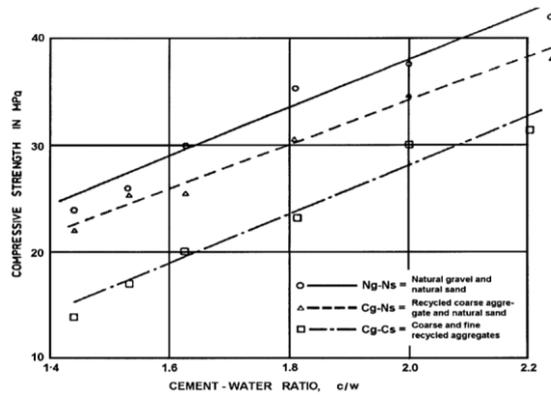
- Stocker, T.F. (Ed.). (2014). Cambio climático 2013: la base de la ciencia física: controversia del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Prensa de la Universidad de Cambridge.
- SAMARIS (2005). Metodología de evaluación de materiales alternativos para la construcción de carreteras. Entregable no 16.
- Swiss Aggregates and Concrete Industry. (2003). Ver plantas de hormigón premezclado y ecoeficientes y producción de hormigón,
- Tam, V. W., & Tam, C. M. (2007). Evaluación de la durabilidad del hormigón agregado reciclado producido mediante un enfoque de mezcla en dos etapas. *Revista de ciencia de materiales*, 42 (10), pp. 3592-3602.
- Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Análisis microestructural de hormigón agregado reciclado producido a partir de un enfoque de mezcla en dos etapas. *Investigación sobre cemento y hormigón*, 35(6), pp. 1195-1203.
- Tam, V. W., Tam, C. M., & Wang, Y. (2007). Optimización de la proporción de áridos reciclados en hormigón mediante un método de mezcla de dos etapas. *Materiales de construcción y construcción*, 21(10), pp. 1928-1939.
- The World Bank (2012). Qué tal Desperdicio: una revisión global de la gestión de desechos sólidos, Serie de documentos de conocimiento sobre desarrollo urbano, pp 14 – 45.
- The World Bank (2020). Panel de precios de carbono.. Recuperado de: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/what-carbon-pricing>
- Tocto, N. (2020). Análisis de Ciclo de Vida comparativo del adoquín para pavimento peatonal reciclado versus el convencional. [Tesis de Pregrado, PUCP]. Repositorio Institucional –Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Trinidad, C. & Ortiz, E. (2019). Precio al Carbono en el Perú: transición energética y justicia climática.
- Trusty, W.B. (2000). Introducción de un sistema de clasificación de herramientas de evaluación. *Boletín de Edificio Avanzado*, 25 (7).
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., Šajna, A. (2015). Evaluación ambiental de hormigones verdes versus hormigones convencionales mediante ACV. *Waste Manag.* 45, 194–205.
- UNEP (2005) Cuadro de indicadores de gestión integrada de residuos; Una herramienta para medir el desempeño en la gestión de residuos sólidos urbanos.
- UNE-prEN 12620 (2003). Agregados para concreto.

- UNE-prEN 13242 (2002). Áridos no ligados y ligados hidráulicamente para su uso en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras.
- United Nations Global Compact (2018). Pacto Mundial de Naciones Unidas. Una llamada a la acción para empresas sostenibles, pp. 03 – 11.
- US EPA, O. (2006). Jerarquía de gestión de residuos sólidos. Resúmenes y fichas técnicas. Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/hierarchy.htm>
- US EPA, O. (2018). AP-42: Compilación de factores de emisiones atmosféricas. Recuperado de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- USGS (2000). Agregados reciclados: conservación rentable de recursos. Recuperado de <http://www.pubs.usgs.gov/fs/fs-0181-99/fs-0181-99so.pdf>
- USGS (2013a). Cemento, estadísticas e información. Servicio Geológico de Estados Unidos, Reston.
- . (2013b). Kelly, T.D., Matos, G.R. (Eds.). Estadísticas históricas de materias primas minerales y materiales en los Estados Unidos, vol.140. Serie de datos del Servicio Geológico de EE. UU., Reston.
- Van de Klundert, et al. (2001). Gestión de residuos sostenible integrada: el concepto. Herramientas para tomadores de decisiones. experiencias del programa de experiencia en residuos urbanos (1995-2001). WASTE.
- Van Oss, H.G., Padovani, A.C. (2002). Fabricación de cemento y medio ambiente, parte 1: química y tecnología. J. Ind. Ecol. 6, pp. 89-105.
- Van Oss, H.G., Padovani, A.C. (2003) Fabricación de cemento y medio ambiente, parte II: retos y oportunidades medioambientales. J. Ind. Ecol. 7, pp. 93-127.
- Vázquez – Rowe, Ziegler-Rodriguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., Kahhat, R. (2019). Producción de cemento en Perú: comprensión de los impactos ambientales relacionados con el carbono y sus implicaciones políticas. Conservación y Reciclaje.
- Vázquez, E., Barra, M. (2002). Reciclaje y reutilización del hormigón. Monografía CIMNE: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón, N° 67. Octubre, pp. 43 – 65.
- Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Propiedades del árido de hormigón reciclado y su influencia en la producción de hormigón nuevo. Resources, Conservation and Recycling, 133, 30-49.
- Vidaud, E., Vidaud, I. (2015). Propiedades físico – mecánicas de los concretos reciclados. *Construcción y Tecnología en Concreto*, p. 26.

- Vieira, D.R., Calmon, J.L., Coelho, F.Z. (2016). Evaluación del ciclo de vida (LCA) aplicado a la fabricación de hormigón común y ecológico: A review, *Journal of Construction and Building Materials*, 124 (1), pp. 656 – 666.
- Viscidi y Yépez (2018). La solución energética que América Latina necesita. En *New York Times*. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/es/2018/02/02/espanol/opinion/opinion-energias-renovables-america-latina.html>
- VROM MONITORING BOUWSTOFFENBESLUIT. (2005). Monitoreo de kwaliteit bouwstoffen 2003-2004, Informe de Intron para la Agencia Holandesa de Medio Ambiente, Uso del Suelo y Planificación. Países Bajos.
- WBCSD. (2009). Reciclaje de Hormigón. Recuperado de www.wbcSD.org/Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Recycling-Concrete
- WRAP. (2007). Ensayo de hormigón para determinar los efectos sobre las aguas subterráneas.
- 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). “Un Programa de Investigación Estratégica para la Evaluación del Ciclo de Vida”, Documento Final de la Acción Concertada LCANET, Documentos de ACV, Vol. 1, pp. 15 – 31.
- X Zhang et al. (2007) Comparación de LCA en oficinas de construcción de acero y hormigón. Investigación apoyada por La Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China, Grant No. 50578113. 6ta Conferencia Internacional sobre Calidad del Aire Interior, Ventilación y Conservación de Energía en Edificios IAQVEC. China, pp. 28-31.
- Yagishita F., Sano, M., Yamada, M. (1993). Comportamiento de vigas de hormigón armado que contienen agregado grueso reciclado. Demolición y Reutilización de Concreto y Mampostería, Actas del Tercer Simposio Internacional RILEM. Erik K. Lauritzen, pp. 331 – 342.
- Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Baez, T., & Wernick, I. (2017). Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(6), 1163–1173. doi:10.1007/s11367-017-1360-5
- Zega, C. (2008). Hormigones reciclados: Caracterización de los agregados gruesos reciclados, Tesis Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería UNCPBA, Septiembre.

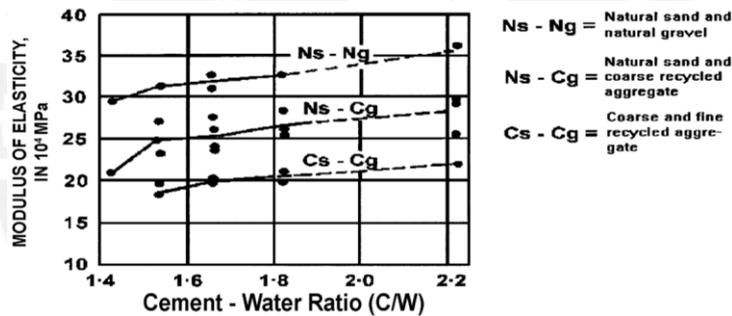
ANEXOS

ANEXO A: Propiedades mecánicas de concreto reciclado



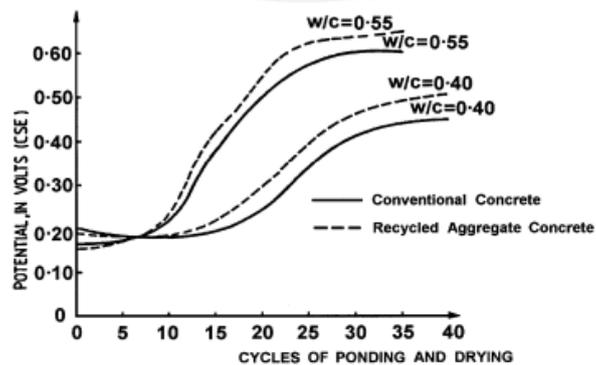
Anexo A.1: Relación entre agua/cemento y fuerza de compresión para casos de reciclaje.

Fuente: 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete. Chapter 5 – Production of Concrete from Recycled, 2001.



Anexo A.2: Relación entre a/c y módulo de elasticidad para casos de reciclaje.

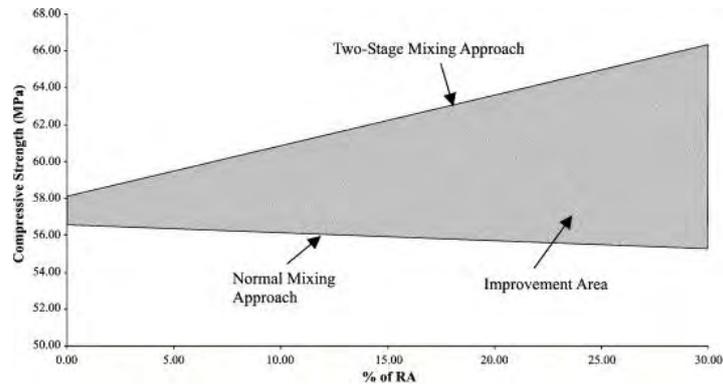
Fuente: 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete. Chapter 5 – Production of Concrete from Recycled, 2001.



Anexo A.3: Potenciales de media celda de barras de acero incrustadas en muestras hechas a partir de hormigones agregados convencionales y reciclados

Fuente: 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete. Chapter 5 – Production of Concrete from Recycled, 2001.

ANEXO B: Técnica experimental de optimización de mezclado T SMA.



Anexo B.1: Incidencia del porcentaje de Agregado reciclado en la fuerza de compresión como contraste de los métodos de mezclado NMA y TSMA

Fuente: Tam et. al, 2005.



Anexo B.2: Comparación entre NMA (Normal Mixing Approach) y TSMA (Two Stage Mixing Approach)

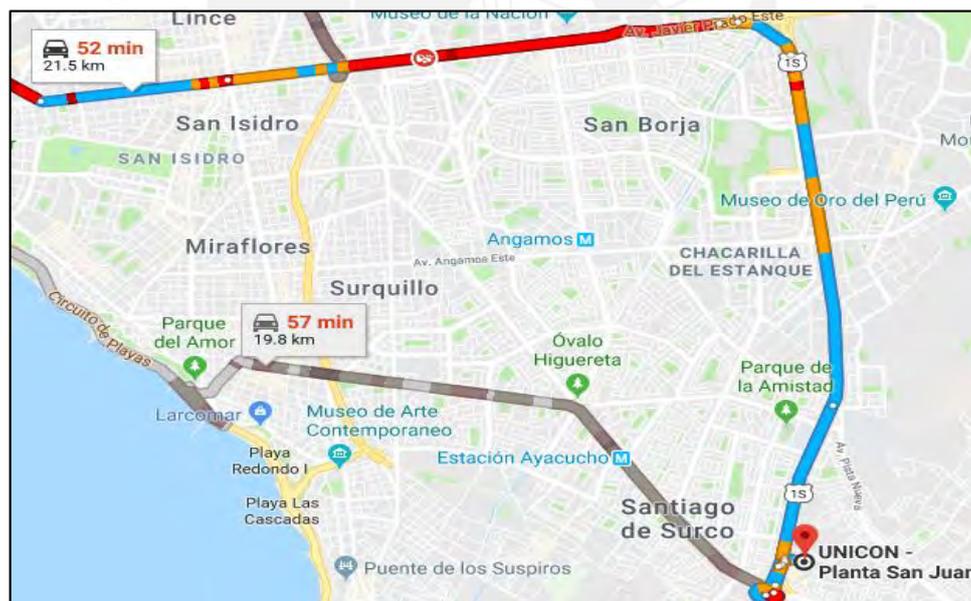
Fuente: Adaptación de Tam et. al, 2005.

ANEXO C: Rutas recorridas por volquetes y cisternas hacia todos sus desplazamientos - modelo de transporte



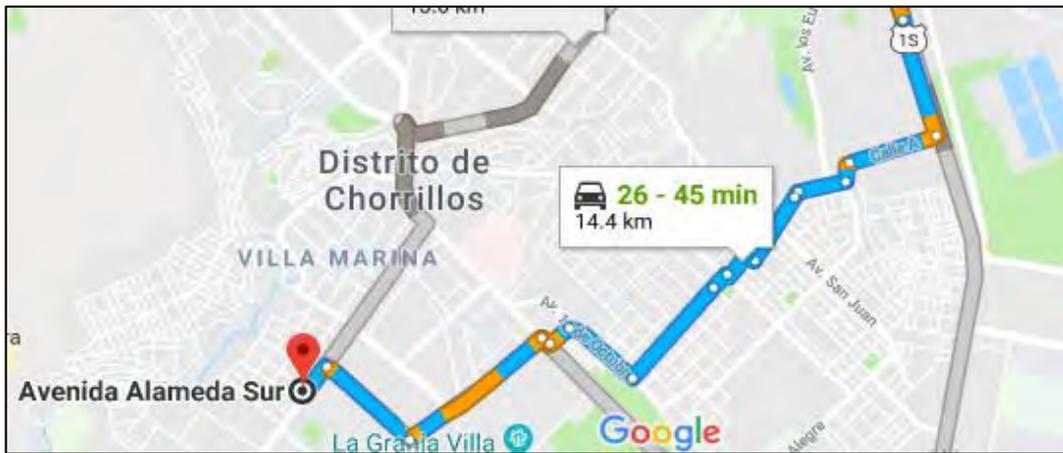
Anexo C.1: Ruta 1 (Depósito Volquetes Maquinarias S.A. hacia Pabellón B – PUCP)

Fuente: Adaptación de Google Maps.



Anexo C.2: Ruta 2 (Pabellón B – PUCP hacia UNICON Planta San Juan)

Fuente: Adaptación de Google Maps.



Anexo C.3: Ruta 3 (UNICON Planta San Juan –Volquetes Maquinaria S.A.)

Fuente: Adaptación de Google Maps.

