

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Análisis de Ciclo de Vida de la construcción de una carretera en una zona de amortiguamiento en la provincia de Manu, Madre de Dios

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Gustavo Martín Larrea Gallegos

ASESOR: Ian Vázquez Rowe, PhD

Lima, diciembre de 2016

Resumen

La propuesta de la construcción de una carretera afirmada de 45 kilómetros en una zona ambientalmente sensible ubicada entre el Parque Nacional del Manu y la Reserva Comunal Amarakaeri ha encendido un apasionado debate entre diferentes entidades gubernamentales y no gubernamentales. Esto ha puesto en duda los posibles beneficios que inicialmente el proyecto puede generar. Por ello, se ha realizado una evaluación ambiental utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, evaluando aspectos como el cambio climático, formación de material particulado, eutrofización, agotamiento de ozono, entre otros. Se utilizó una unidad funcional de 1 kilómetro de carretera en 1 año de uso y se evaluaron las etapas de construcción, uso y mantenimiento. Se utilizó información primaria en lo referido al consumo de material y se modelaron emisiones como el CO₂ biogénico y el material particulado. Se utilizó la metodología de cálculo IPCC 2013 para cambio climático y ReCiPe 2008 para 17 categorías de impacto restantes.

Este estudio es pionero en su tipo y los resultados obtenidos reflejan que el costo ambiental de este tipo de proyectos es dramáticamente mayor que el pronosticado. En lo que refiere al cambio climático, se reveló que 11 toneladas de CO₂eq por kilómetro de carretera son generados producto de los efectos directos de la construcción de la carretera. La destrucción del bosque primario y secundario representa aproximadamente el 80% de estas emisiones, mientras que el 20% restante corresponde a la construcción, uso y mantenimiento de la carretera. Para las restantes categorías de impacto, la formación de partículas aparece no solo como una importante fuente de impacto ambiental debido a las emisiones del vehículo, sino también debido a la pulverización del material de la superficie. Por el contrario, el agotamiento de los recursos abióticos (por ejemplo, agua, metales o combustibles fósiles) mostró un menor impacto ambiental que lo esperado debido a que se utilizaron materias primas locales y el nivel tecnológico era básico.

Finalmente, se recomienda realizar evaluaciones más exhaustivas y con visión de ciclo de vida en todos los proyectos viales ubicados en zonas de alta complejidad ambiental. Por ello, se considera que los resultados e inventarios obtenidos pueden ser de mucha utilidad para ser usados en situaciones similares al caso de estudio presentado en esta investigación.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todos los involucrados en esta investigación, al Dr. Geoff Gallice, a la Dirección General de Investigación (DGI) por haber financiado este proyecto, a las autoridades e ingenieros de la Sub Región Manu, y en especial a mi asesor, Ian Vázquez Rowe, quien a lo largo de este tiempo ha sido para mí un gran ejemplo, amigo y mentor.

Agradezco a mi *alma mater*, la PUCP, por haberme permitido “ver el mundo a través de los ojos de otras personas”, a mis profesores y amigos, y a todos aquellos involucrados en mi formación. Quiero agradecer en especial a *Civilízate*, la idea e iniciativa que significó en mí un punto de quiebre que moldeó mis aspiraciones y anhelos en ansias de un mejor país.

Finalmente, tengo reservado el mayor mis agradecimientos a mis padres, Augusto y Julia, y a mis hermanos, Cesar y Dayer, por haberme apoyado incansablemente durante todos los años de mi vida y formación académica. Son ellos a quienes debo mis logros y alegrías.

A todos ellos, mi eterna gratitud.

Índice

Resumen.....	ii
Índice.....	iv
Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	vii
Lista de acrónimos.....	viii
CAPÍTULO 1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Manu, la zona de estudio.....	1
CAPÍTULO 2. Revisión de la literatura.....	6
2.1 Gestión Ambiental en el Perú.....	6
2.2 Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de Gestión Ambiental.....	7
2.3 Análisis de Ciclo de Vida en carreteras.....	10
2.4 Antecedentes.....	10
CAPÍTULO 3. Metodología.....	13
3.1. Recolección de datos.....	13
3.2. Análisis de Ciclo de Vida.....	14
3.2.1. Definición de objetivos y enfoque.....	15
3.2.1.1. Definición de la unidad mínima fundamental.....	15
3.2.1.2. Delimitación de los límites del sistema.....	16
3.2.2. Inventario de Ciclo de Vida.....	18
3.2.3. Análisis del Impacto de Ciclo de Vida.....	18
3.2.4. Análisis de sensibilidad.....	18
3.2.5. Interpretación del Análisis del Ciclo de Vida.....	18
CAPÍTULO 4. Desarrollo del proyecto.....	22
4.1. Caso de estudio.....	23
4.1.1. Características de la carretera.....	26
4.1.2. Proceso constructivo.....	30
4.2. Inventario de Ciclo de Vida.....	33
4.2.1. Datos adquiridos.....	33
4.2.1.1. Metrados de materiales.....	34

4.2.1.2. Fabricación y mantenimiento de maquinaria.....	34
4.2.1.3. Producción y consumo de combustible.....	35
4.2.1.4. Modelamiento de material particulado.....	37
4.2.1.5. Cambio directo en el uso de suelo.....	38
4.2.1.6. Uso de la carretera.....	41
4.2.1.7. Mantenimiento de la vía.....	41
4.3. Análisis de sensibilidad.....	41
CAPÍTULO 5. Resultados.....	44
5.1. Análisis de impactos de ciclo de vida: construcción de la carretera.....	44
5.2. Análisis de impactos de ciclo de vida: mantenimiento de la carretera.....	45
5.3. Análisis de impactos de ciclo de vida: uso de la carretera.....	46
5.4. Análisis de impactos de ciclo de vida: sistema completo.....	46
CAPÍTULO 6. Discusión de resultados.....	49
6.1. Comparación de resultados con estudios previos de ACV en carreteras	49
6.2. Utilidad de la aplicación de ACV en la carretera Boca Manu.....	51
CAPÍTULO 7. Conclusiones.....	54
REFERENCIAS.....	56

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Figura 2: Trazo preliminar de la nueva carretera Nuevo Edén – Boca Manu.

Figura 3: Representación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida.

Figura 4: Representación de los límites del sistema.

Figura 5: ICV, indicadores midpoint e indicadores endpoint en la metodología ReCiPe 2008.

Figura 6: Ubicación de los puntos referenciales en la historia de expansión de la carretera Cusco – Nuevo Edén.

Figura 7: Trazo de la carretera Nuevo Edén-Boca Manu.

Figura 8: La línea verde punteada indica que la ruta forma parte de una red departamental proyectada

Figura 9: Predios ubicados a lo largo del trazo de la ruta de la carretera.

Figura 10: Sección típica correspondiente a la muestra del tramo de carretera estudiado.

Figura 11: Fotografía de la zona de trabajo días después del desbroce.

Figura 12: La fotografía permite apreciar el ancho de 20m deforestados para la construcción de la carretera.

Figura 13: Fotografía de uso de la zona de maniobras

Figura 14: Fotografía de árbol removido

Figura 15: Mapa detallado de procesos de la construcción de la carretera.

Figura 16: Mapa simplificado de procesos de la construcción de la carretera.

Figura 17: Mapa de densidad de carbono aéreo en la provincia de Madre de Dios.

Figura 18: Emisiones de GEI por cada subsistema en escenarios.

Figura 19: Gráfico de proporciones de cada proceso correspondiente a la categoría GWP calculado con el método del IPCC.

Lista de tablas

Tabla 1: Revisión de las características del ACV bajo las recomendaciones del ISO14004 (ISO 14004:2004).

Tabla 2: Listado de ACVs realizados en Europa

Tabla 3: Listado maquinaria utilizada durante la construcción de la carretera

Tablas 4: Emisiones correspondientes a 1kg de combustible para una camioneta pick-up

Tablas 5: Emisiones correspondientes a 1kg de combustible para vehículo pesado

Tabla 6: Emisiones al aire de CO₂ correspondiente al cambio directo del uso de suelo

Tabla 7: CO₂ secuestrado en la vegetación producto de la regeneración de la misma.

Tabla 8: Lista de escenarios computados en el análisis de sensibilidad.

Tabla 9: Impactos ambientales por categoría de impacto y subsistemas en el escenario A1.

Tabla 10: Comparación de los impactos ambientales resultantes con otros dos estudios encontrados en la literatura.

Lista de acrónimos

ACV – Análisis de Ciclo de Vida

AICV - Análisis de Impactos de Ciclo de Vida

dLUC - Direct Land Use Changes

EIA – Estudio de Impacto Ambiental

GEI – Gases de Efecto Invernadero

GOREMAD – Gobierno Regional de Madre de Dios

ICV – Inventario de Ciclo de Vida

iLUC - Indirect Land use Changes

IMDA - Índice medio diario anual

INEI – Instituto Nacional de Estadística e Informática

IPCC - Intergovernmental panel on climate change

ISO - International Organization for Standardization

MINAM – Ministerio del Ambiente

MTC - Ministerio de Transportes y Comunicaciones

PIP - Proyecto de Inversión Pública

PMF – Particulate Matter Formation

PNM – Parque Nacional del Manu

RPCV - Red Peruana de Ciclo de Vida

SEIA - Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental

SERNANP – Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas

SGA – Sistema de Gestión Ambiental

SNIP - Sistema Nacional de Inversión Pública

UNFCCC - United nations framework convention on climate change

1. Introducción

1.1 Objetivo

Cuantificar los impactos ambientales que puede generar una obra de infraestructura vial en una zona de alta sensibilidad ecológica en la Amazonía mediante distintas categorías de impacto utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

1.2 Manu, la zona de estudio

El departamento de Madre de Dios se encuentra ubicado en el sureste del Perú. Cuenta con una extensión de terreno de 85301 km² y una población de 97417 habitantes (INEI, 2005). Este departamento posee una abundante riqueza natural y de biodiversidad muy importante para la región y el país. Dentro de su territorio se encuentra el Parque Nacional del Manu (PNM), ubicado en la provincia del Manu y que fue considerado en 1973 como tal mediante el Decreto Supremo No. 644 73 AG y reconocido en 1987 como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (SERNANP, 2014). Debido a su importancia, el PNM, en toda su extensión, fue designado como Área Natural Protegida por el Gobierno del Perú, y alrededor fueron designadas también distintas zonas de amortiguamiento en sus alrededores. Estas zonas representan áreas de transición entre el terreno intangible y los espacios de actividad humana.

En la actualidad, el único punto de acceso controlado al PNM se encuentra en la localidad de Boca Manu; a través de este se controla el ingreso de investigadores, turistas y conservacionistas interesados en el estudio del parque. La extensión de las áreas naturales, zonas de amortiguamiento y permisos están regulados por el Plan Maestro del PNM, vigente hasta el año 2018 (SERNANP, 2013) (ver Figura 1).



REPÚBLICA DEL PERÚ

MADRE DE DIOS

PROVINCIA MANU

Figura 1: Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: Plan Vial Provincial Participativo de la Provincia del Manu, 2011.

El Manu debe su extraordinaria diversidad en parte a su única geografía y es el único parque, en toda Sudamérica, que protege por completo la línea divisoria de un afluente amazónico. Los límites del parque abarcan desde los altos pastizales en los Andes, pasando por un montañoso bosque de neblina, hasta la húmeda selva baja de la cuenca amazónica. En este recorrido, el parque alberga una cantidad de especies que varía de acuerdo a su geografía. En esencia, el parque del Manu es el último tramo remanente de terreno que yuxtapone los Andes y la Amazonía, donde comunidades de plantas y sus animales asociados son libres de moverse por las laderas de las montañas mientras el clima global es alterado por la actividad humana. Casi en cualquier otro lugar de los Andes amazónicos, la quema de bosques y el pastoreo de ganado previenen este fenómeno.

La relevancia del PNM trasciende hasta el plano de la cultura, ya que este territorio restringido ha permitido que comunidades Matsigenkas, Yora, Qechua y grupos Mascho – Piro puedan vivir en aislamiento voluntario, protegidos de la expansión de las actividades antrópicas contemporáneas (Shepard et al., 2010). Por esta razón, la importancia del Manu en la conservación y los procesos evolutivos en la región Andina-Amazonica no puede ser objeto de minimización.

Por otro lado, la región Madre de Dios tiene una población con un 76,8% de necesidades básicas insatisfechas y 53,6 % de desnutrición crónica infantil (INEI, 2005). Estos datos conllevan a que la prioridad del Gobierno Regional sea elevar la calidad de vida hasta estándares mínimos aceptables. Esta prioridad se ve reflejada en el Plan de Desarrollo Concertado 2014-2021 elaborado por el Gobierno Regional de Madre de Dios (GOREMAD). En esta publicación se hace incidencia sobre la clara postura del GOREMAD de incrementar la competitividad regional, consolidar los principales corredores económicos y solucionar la creciente expansión urbana (GOREMAD, 2015).

En consecuencia, en el año 2011, el GOREMAD propuso por primera vez el proyecto de construcción de la carretera Nuevo Edén - Boca Manu - Boca Colorado (SERNANP, 2013). La longitud del tramo propuesto era de 136 km y, dentro de la información proporcionada al Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP), se mencionaba, respecto a la viabilidad ambiental, que 'los aspectos negativos son temporales y se presentan solo durante la ejecución de la obra - SNIP N°95220 -. El Proyecto de Inversión Pública mencionado no pasó la etapa de factibilidad y quedó relegado a ser solo un antecedente de las intenciones de incrementar la infraestructura vial de Madre de Dios.

A nivel político, existen también intereses de conectar la mencionada ruta. En este sentido, en el año 2013, el congresista Eulogio Amado Romero Ramírez propuso el Proyecto de Ley n° 2320/2012 que buscaba “declarar de necesidad pública e interés nacional la construcción de la carretera Nuevo Edén - Boca Manu - Boca Colorado” como alternativa a la deficiencia de vías de comunicación en la zona. Este proyecto de ley fue aprobado el 5 de noviembre de 2015 y horas después, el MINAM hizo pública su preocupación respecto a las posibles consecuencias que pudiesen originarse (MINAM, 2016a). El 4 de diciembre del mismo año, el Poder Ejecutivo observó el proyecto de ley evidenciando su postura contraria a la construcción de la Carretera Boca Manu. Finalmente, el 16 de junio de 2016, la Comisión de Transporte, en su segunda revisión de la propuesta, votó a favor de archivarlo y poner así fin a la problemática que expuso frente a la sociedad civil a los agentes interesados en la promoción de este proyecto (MINAM, 2016b).

En efecto, la utilidad de las zonas de conservación se pone a prueba cuando el gobierno designa derechos de uso de los suelos para actividades en las que existen conflictos de intereses (Scullion, 2014). En el caso de la carretera en mención, el

seguimiento del conflicto a través de las publicaciones periodísticas y testimonios recogidos permitió identificar a los agentes involucrados en este proyecto. De esta forma, es posible prever que actividades como agricultura, explotación de recursos bióticos, extracción maderera, turismo, colonización y otros encontrarán en la carretera un medio propicio de expansión (Laurance et al., 2009, 2011). La carretera Pilcopata - Nuevo Edén, que comenzó a construirse gradualmente alrededor de 1960 y que atraviesa la zona de amortiguamiento de la Reserva Comunal Amarakaeri, es un ejemplo de este fenómeno, ya que ha incrementado la accesibilidad a la región y ha estimulado el asentamiento de la población en los alrededores de la vía, migrantes de los andes en la mayoría de los casos (Paredes, 2012).

A pesar de las ventajas sociales que en primera instancia pudiese generar la construcción de esta infraestructura, es alarmante notar que, de concretarse esta carretera, una desenfrenada deforestación y extracción de recursos continuarán la degradación de la zona de amortiguamiento de la Reserva Comunal Amarakaeri, como ya ha sucedido en otras zonas donde estas infraestructuras ya están operativas. De lograrse conectar Boca Manu y Boca Colorado con la vía antes mencionada, se estimularía el crecimiento urbano, la actividad agrícola, la expansión de la actividad minera ilegal, así como las actividades propias de un pueblo en crecimiento. Las consecuencias directas e indirectas de la expansión de esta vía pueden significar el inicio de la decadencia del PNM, la más grande reserva de biodiversidad que el mundo ha conocido.

Este estudio corresponde a un tramo de la Carretera Boca Manu que estaba siendo construida con el uso de fondos de otra partida presupuestal. Aunque las consideraciones legales señalan que este tramo corresponde a otro Proyecto de Inversión Pública (PIP), la realidad muestra claramente que ambos PIP hacen referencia a la misma ruta, con la particularidad que la carretera tomada de muestra es un tramo de la Carretera Boca Manu.

Esta tesis recopila estudios relevantes de ACV de carreteras encontrados en la literatura. Sin embargo, pese a que se identificaron numerosos trabajos enfocados a esta industria, su aplicación en zonas tropicales, y en especial en la selva amazónica, ha sido prácticamente inexistente. En ese sentido, este proyecto de investigación y todas las publicaciones vinculadas a este, son pioneros tanto en la región amazónica como en el

territorio peruano. Los datos y resultados que se presentarán son la representación más aproximada de carreteras en la selva amazónica existente en la literatura.

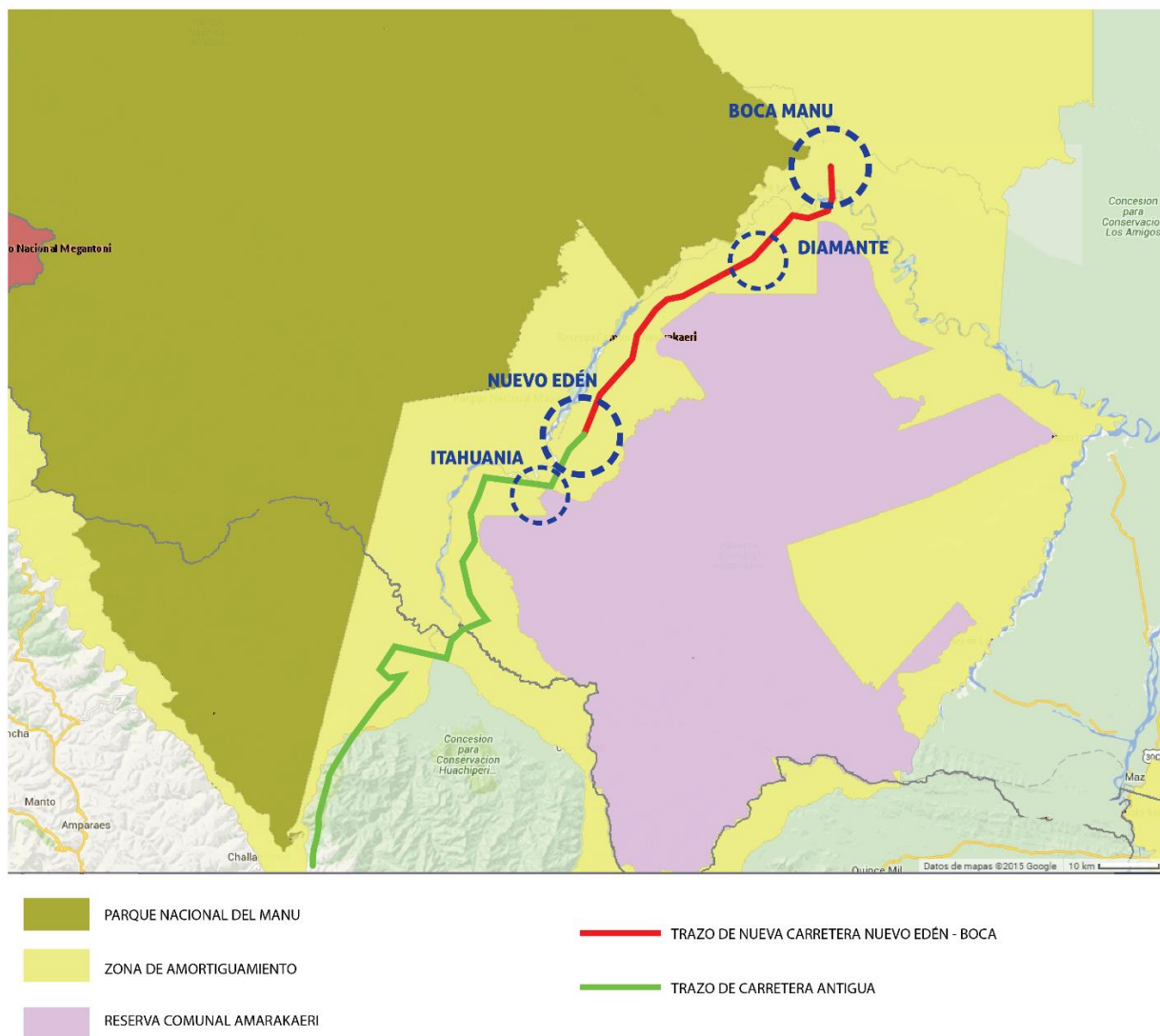


Figura 2: Trazo preliminar de la nueva carretera Nuevo Edén – Boca Manu. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Interactivo del SINIA.

2. Revisión de la literatura

2.1 Gestión ambiental en el Perú

La Ley General del Ambiente define la Gestión Ambiental como “el proceso permanente y continuo, constituido por el conjunto estructurado de principios, normas técnicas, procesos y actividades orientado a administrar los intereses, expectativas y recursos relacionados con los objetivos de la política ambiental y alcanzar así, una mejor calidad de vida y el desarrollo integral de la población, el desarrollo de actividades económicas y la conservación del patrimonio ambiental y cultural del país” (MINAM, 2005).

Durante los últimos años, los proyectos vinculados al desarrollo económico y de infraestructuras han fracasado en implementar adecuadas políticas ambientales, principalmente, en muchos casos, por la carencia de un adecuado Sistema de Gestión Ambiental (SGA). De acuerdo a la ISO14004:2004, un SGA es parte del sistema de la gestión de una organización que se emplea para desarrollar e implementar su política ambiental y gestionar sus aspectos ambientales (ISO, 2004). En el Perú, una de las herramientas que forma siempre parte de estos sistemas es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Una EIA es un procedimiento jurídico administrativo que consiste en la recolección de información ambiental que permita anticipar y prevenir posibles efectos directos e indirectos de un determinado proyecto. Sin embargo, en un SGA, a diferencia de un EIA, los miembros internos del proyecto siguen de manera continua el desarrollo de este y tienen metas y objetivos reales que pueden contar con planes de acción en tiempo real (Sánchez y Hacking, 2012).

Autores como Sánchez y Hacking (2012) consideran que es necesario integrar la EIA con un SGA, ya que ello otorgará a las instancias responsables del manejo y gestión de los proyectos un conocimiento previo en la toma de decisiones. El problema de utilizar una herramienta cualitativa para la determinación de la viabilidad de un proyecto es, tal como reconocen los autores, que el debate se centra en la aprobación del proyecto y raras veces en la discusión de los detalles técnicos.

Bajo este contexto, la EIA, en el Perú, suele ser considerado como un procedimiento burocrático y no como una herramienta de planeamiento que ayude a la ejecución y operación de un proyecto. En un EIA se evalúan los impactos ambientales que se generan en el sitio de estudio y , además, tienen efecto solo en el sitio de estudio.

Esto quiere decir que se dejan de tomar en cuenta impactos ambientales más genéricos (como el cambio climático, destrucción de la capa de ozono, etc.) y que también son de suma importancia. Esta evaluación tampoco considera los impactos en los distintos niveles de la cadena productiva que podrían ser, en muchos casos, críticos para la toma de decisiones (Cornejo, 2005).

En el Perú, en la actualidad, el único sistema de identificación, prevención, supervisión, control y corrección anticipada de los impactos ambientales negativos derivados de las acciones humanas de un proyecto de inversión es la EIA y es regulada por el Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA) (MINAM, 2011). Esto quiere decir que esta es la única herramienta de Gestión Ambiental obligatoria durante todo el ciclo de vida de un proyecto.

2.2 Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de Gestión Ambiental

El ACV es una herramienta de análisis ambiental que toma en cuenta todas las etapas de la producción de un determinado producto o servicio. Esta herramienta es de carácter cuantitativo e involucra un acercamiento más completo a los impactos generados en distintos sistemas de producción o servicio (Tukker, 2001). El ACV permite elaborar estrategias medioambientales en todo tipo de procesos utilizando una perspectiva de ciclo de vida, lo cual significa identificar los principales flujos de materia y energía que se generan a lo largo de toda la vida útil de un bien, proceso o servicio (ISO, 2006a; 2006b). En esta herramienta se utilizan una serie de indicadores ambientales denominados categorías de impacto que ayudan a entender el impacto ambiental que generan los procesos en estudio de una manera más holística (RPCV, 2015).

El ACV está estandarizado internacionalmente a través de las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a; 2006b). Las ventajas de esta metodología frente a otros tipos de herramientas son: su metodología estandarizada, la posibilidad de incluir datos cuantitativos, la posibilidad de recurrir a una metodología existente y la posibilidad de poder reproducir los resultados. Existen diferentes campos, tanto industriales como de investigación, en los cuales la elaboración de un ACV permite obtener resultados provechosos en lo que refiere al *ecodiseño*, la caracterización de bienes y servicios, y la medición del desempeño ambiental del bien o servicio estudiado (Lewandowska, 2011).

Debido a que la herramienta del ACV y los SGA están enfocados a toda la cadena de producción, es lógico y posible integrarlos. El uso de esta herramienta es útil durante la identificación de impactos ambientales que no se conocían o impactos ambientales críticos que puedan ser disminuidos (Sangle and Nema, 2001); sin embargo, pese a que esta integración puede ser aplicable de manera exitosa en organizaciones privadas (Finkbeiner et al., 1999; Levandowska et al., 2013), en el sector público peruano, debido a su naturaleza organizacional, no se han encontrado vestigios de que las distintas instituciones, en sus distintos niveles, tengan implementado adecuadamente SGAs y mucho menos utilicen el ACV como herramienta.

Pese a existir un Sistema Nacional de Gestión Ambiental, la normativa con la que cuenta no llega hasta los estratos más bajos de las diversas instituciones gubernamentales. Prueba de ello son los conflictos sociales que se generaron en el Manu producto de las discrepancias de las políticas institucionales de dos organizaciones del estado, GOREMAD y SERNANP, respecto al avance de la carretera Nuevo Edén – Boca Manu (El Comercio, 2015).

Sin embargo, Lewandowska (2011) considera que es posible utilizar el ACV como parte de un SGA ya que la naturaleza de esta herramienta coincide con los lineamientos que el ISO 14004:2004, referido a Sistemas Gestión Ambiental, propone. La Tabla 1 muestra el nivel de compatibilidad de esta herramienta.

Recomendaciones ISO 14004	Nivel en el que el ACV es compatible con la recomendación (+, ++, +++) + baja compatibilidad, +++) alta compatibilidad	Comentarios
Reconocimiento de los impactos ambientales beneficiosos y adversos	+++	El ACV permite la identificación cuantitativa y cualitativa de los impactos ambientales tanto positivos como negativos con mayor enfoque en los negativos
Reconocer impactos reales y potenciales	++	La integración a tiempo completo de espacio es una simplificación predeterminada que está incluida en la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida lo que resulta en un mayor enfoque en el potencial por encima de los impactos actuales. Sin embargo, en los últimos años, se han realizado esfuerzos en desarrollar factor de equivalencia espacialmente específicos que ayudaron a reducir la generalidad de la EICV
Reconocer partes del medio ambiente que se pueden ver afectadas	+++	Los datos recolectados para el ACV tratan a detalle con aspectos ambientales relacionados con distintas áreas de operación de una organización (producción, almacén, transporte, etc.) y con elementos del ambiente (aire, suelo, agua)
Reconocer las características del lugar que pueden afectar al impacto	+	Las características locales y regionales pueden ser consideradas en la elaboración del Inventario de Ciclo de Vida y, en una extensión de los límites, también en la EICV
Reconocer la naturaleza de los cambios en el medio ambiente	+++	EL ACV incluye categorías de escala global (cambio climático, destrucción de la capa de ozono) así como categorías de carácter regional o incluso de escala local (acidificación, eutrofización, oxidación fotoquímica). Los diversos horizontes temporales del modelamiento de impactos permiten reconocer el fenómeno de acumulación de impactos en el tiempo

Tabla 1: Revisión de las características del ACV bajo las recomendaciones del ISO14004 (ISO 14004:2004). **Extraído de:** (Lewandowska, 2011)

Aunque la Ley General del Ambiente (MINAM, 2005), en el artículo 75, indica que se deben tomar medidas de prevención de riesgo y daño ambiental en la fuente generadora de los bienes y servicios producidos bajo el concepto de ciclo vida, no fue hasta el año 2013 en el que se aprobó la NTP-ISO 14044 referida a la Gestión Ambiental mediante el uso del Análisis de Ciclo de Vida.

En el Perú, los estudios que incluyen una filosofía de pensamiento de ciclo de vida se han volcado fundamentalmente, hasta la fecha, en su aplicación en el mundo industrial, sobre todo en lo que respecta a los sectores agrícola, pesquero y energético (RPCV, 2015). Específicamente, en los últimos 6 años, en el Perú se han publicado un total de 8 artículos científicos vinculados con la aplicación del ACV, todos estos relacionados al sector energético, agro-industrial y pesquero (Vázquez-Rowe et al., 2015, 2016a, 2016b; Avadí et al., 2015; Bartl et al., 2011, 2012). En este sentido, el uso del pensamiento de ciclo de vida para estudios de conservación y preservación de zonas de alto interés ecológico en el Perú todavía no ha sido desarrollado. En el sector de las edificaciones, García-Torres (2014) y Cáceres (2016) son pioneras en la aplicación del ACV como herramienta de evaluación ambiental de edificios de vivienda. Sin embargo, el uso de esta herramienta para el diseño y modificación de obras de infraestructura no ha sido aún considerado; esto significa que existe aún mucho por desarrollar en el campo privado y público.

2.3 Análisis de Ciclo de Vida en carreteras

Condiciones únicas como la localización, extensión, complejidad de procesos, condiciones meteorológicas, intensidad de tráfico y otros, hacen que el estudio de una carretera sea muy distinto al de cualquier otro tipo de producto; en consecuencia, estas particularidades no permiten que una evaluación ambiental sea modelada de manera estática (Stripple, 2001). En países de Europa y Norte América, los ACV realizados en la construcción de carreteras son considerados como herramientas importantes en la implementación de soluciones sostenibles y para hacer ecológicamente amigables los proyectos de infraestructura vial (Carlson, 2011; Santero et al., 2010).

Por ejemplo, el uso de materiales nuevos y más sostenibles (Hakkinen and Mäkela, 1996; Mroueh et al., 2000; Park et al., 2003; Huang et al., 2009a; Yu and Lu, 2012b), los impactos de los sistemas de iluminación de pistas (Tähkamo and Halonen, 2015), el modelamiento de las políticas de movilidad y comportamientos del tráfico

(Huang et al., 2009b; Querini and Benetto, 2015), o el establecimiento de estrategias sostenibles en la etapa de adquisición de materiales (Butt et al., 2015), son algunos ejemplos de cómo el ACV ha sido aplicado al sector de transporte. Gran parte de estos estudios se realizan en rutas ya existentes con cambios urbanos y zonales ya marcados y establecidos a lo largo de muchos años, tal y como se observan en las revisiones de ACV de carreteras más completas encontradas en la literatura (Santero et al., 2010; Carlson, 2011; Azari-Jafari et al., 2016). En la Tabla 2 se puede encontrar un listado de estudios de ACV de carreteras realizados Europa y recolectados por Carlson (2011).

Referencia	Etapa en el ciclo de vida de la carretera			
	Construcción		Mantenimiento	Uso
	Movimiento de tierras	Pavimento		Tráfico
Häkkinen & Mäkele (1996)		X	X	X
Mroueh et al. (2001)	X	X	X	X
Stripple (2001)	X	X	X	X
Chappat & Bilal (2003)		X	X	X
Hoang et al. (2005)		X	X	
Olsson et al. (2006)	X			
Birgisdottir et al. (2009)	X	X		
Huang et al. (2009)		X		
Sayagh et al. (2010)		X	X	
ECRPD (2010)		X	X	

Tabla 2: Listado de ACVs realizados en Europa. **Extraído de:** Life cycle assessment of roads and pavements, Studies made in Europe, Annelie Carlson. 2006.)

Interesantemente, no se ha encontrado evidencia de estudios que analicen los impactos de infraestructura vial en zonas amazónicas mediante la herramienta del ACV. Sin embargo, sí existen diversos trabajos que hacen énfasis en los efectos generados por la intrusión de vías en bosques amazónicos primarios y secundarios (Naughton-Treves, 2003; Delgado, 2008; Laurance et al., 2009; Godar et al., 2012; Laurance et al., 2014; Aguilar-Amuchastegui et al., 2014;)

La realidad local de Madre de Dios muestra la existencia de otra serie de factores que deben ser considerados debido a las particularidades de la zona en estudio. Esto significa que los objetivos y el enfoque planteados en este proyecto difieren de los

encontrados en la literatura. Sin embargo, es posible utilizar la información de los diversos ACV de carreteras como referencia de las proporciones de los impactos obtenidos en Europa y los obtenidos en Perú a partir de este estudio.

Realizar comparaciones entre los resultados de ACV resulta complicado debido a que los distintos estudios encontrados en la literatura tienen en cuenta diferentes fases del ciclo de vida de la carretera, distintas cargas ambientales, características locales, diferencias de enfoque, periodos de tiempo analizados, distintas unidades funcionales, entre otros (Santero, 2010; Carlson, 2011).

2.4 Antecedentes

La ruta Nuevo Edén - Boca Manu se encuentra ubicada en un sector altamente sensible y muy cercano a dos áreas naturales protegidas. En esta zona es posible encontrar muchas especies que son susceptibles a la caza, atropellos y depredación elevada. Todos estos efectos en conjunto muestran lo vulnerables que son los bosques y su biodiversidad, ya que la habilitación de vías de acceso para vehículos lleva consigo una serie de cambios asociados inevitables, en especial el ingreso de las actividades humanas y el asentamiento de estas (Laurance et al., 2009).

Existen antecedentes previos de la influencia de la construcción de vías asfaltadas en Madre de Dios: la carretera Interoceánica, construida en 2005, condujo a un aumento en las velocidades de viaje y a un incremento directo en los índices de deforestación de la zona (Aguilar-Amuchastegui et al., 2014). Modelos de escenarios de deforestación alrededor de esta carretera evidenciaban una potencial deforestación causada, principalmente, por las vías secundarias sin pavimentar que se fuesen a construir y por el cambio en el uso de suelo producto de esta infraestructura (Delgado, 2008).

Con los años, esta deforestación fue evidenciada con la ayuda de fotografías satelitales (Aguilar-Amuchastegui et al., 2014). Además, diversos estudios han demostrado que la deforestación y la degradación de bosques son una de las principales fuentes de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Van der Werf et al. 2009) y gran parte del desarrollo de ciertas actividades –extracción maderera, agricultura, minería, colonización, entre otros- está vinculado a la facilidad de acceso a las zonas de actividad potencial.

3. Metodología

La metodología que requiere el proyecto orbita fundamentalmente alrededor del pensamiento de ciclo de vida que conlleva la elaboración de un estudio de ACV, basándose en los lineamientos descritos en las ISO 14040 y 14044 (ISO 2006; 2006b). Mucha de la información utilizada para modelar el escenario evaluado se obtiene a partir de datos recolectados en campo y de entrevistas a los involucrados en el proyecto. Los mecanismos de recolección de información se describen en el capítulo 3.1

De acuerdo al estándar ISO 14044 (2006a), para el desarrollo de un ACV se distinguen cuatro fases primordiales con las que esta investigación contará: definición del enfoque y los límites del sistema, inventario de ciclo de vida, análisis de impacto de ciclo de vida y, finalmente, la interpretación del análisis de ciclo de vida. Las etapas mencionadas están descritas en el capítulo 3.2.

3.1 Recolección de datos

La etapa de recolección de datos comprende la obtención de la información técnica del proyecto. La incertidumbre de la investigación depende de la calidad y el nivel de precisión de los datos correspondiente a los procesos de la construcción de la carretera y las demás actividades vinculadas a esta actividad. Casualmente, el inicio de esta investigación coincidió cronológicamente, de manera favorable, con la construcción de un tramo de la carretera en estudio. De esta manera, los datos utilizados para la mayor parte de los cálculos fueron obtenidos de cuadernos de avance de obra, mediciones de campo, testimonios de especialistas, metrados de materiales y registros del consumo de combustible de toda la maquinaria y equipos utilizados. Esta recolección de datos fue realizada principalmente en dos viajes de campo organizados en agosto y setiembre de 2015, y se contó con la participación de ingenieros y agentes involucrados en el proyecto – Gerente de Sub Región Manu, pobladores, trabajadores de GOREMAD -.

Se utilizaron testimonios grabados en audio y un formulario general como mecanismos de recolección. Aunque existe en la normativa nacional un Manual para el Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Transito (MTC, 2008) que otorga pautas y especificaciones de las distintas carreteras que se pueden construir, muchas de las características de la carretera en estudio no estaban registradas en la literatura y son, de alguna manera, resultado de la experiencia de los ingenieros locales.

En este sentido, estos mecanismos de recolección facilitaron la adquisición a detalle de las características y singularidades de los procesos constructivos que eran empleados en el proyecto; de igual forma, fue posible ampliar de sobremanera el entendimiento del sistema evaluado.

3.2 Análisis de Ciclo de Vida

El ACV, metodológicamente, comprende las etapas que el ISO 14040 propone; sin embargo, el uso posterior de los resultados obtenidos, sean completos o parciales responde al criterio del practicante. La Figura 3 muestra un diagrama sencillo de la metodología descrita en el ISO 14040 (ISO, 2006). La naturaleza de esta metodología refleja que su procedimiento es iterativo y de constante retroalimentación; esto se realiza a partir de las interpretaciones que se den a los resultados preliminares, todo ello con la finalidad de obtener un resultado final concluyente.

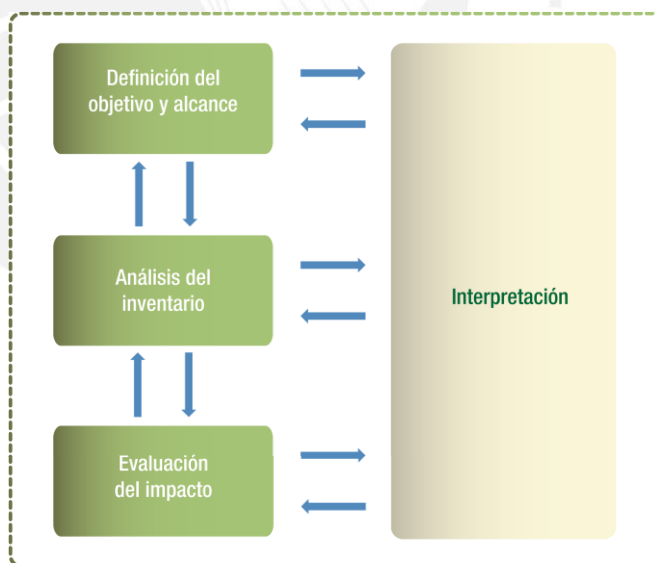


Figura 3: Representación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida. Elaboración propia.

Adaptado de ISO 14040 (ISO, 2006a)

3.2.1 Definición de objetivos y enfoque

Esta fase inicial consiste en el planteamiento del enfoque y de los límites que tendrá el ACV. El nivel de detalle y la profundidad de la recolección de datos dependen del tema y del uso que se pretenda dar al estudio (ISO, 2006b). El enfoque se debe definir tomando en cuenta aspectos temporales, geográficos y de cobertura tecnológica, así como el nivel de sofisticación del estudio en relación a sus metas (Guinée, 2002).

Es posible distinguir dos enfoques fundamentales en los estudios de ACV que se realizan en el campo de la investigación; la primera tiene una perspectiva atribucional, que consiste en evaluar los impactos de una determinada UF en un sistema claramente limitado en un determinado instante de tiempo; y la segunda, una perspectiva consecuencial, que consiste en el modelamiento de los efectos producto de los cambios generados en los diferentes sistemas vinculados que resultan partir de una variación en la producción de la UF (Tillman, 1994). En lo que respecta a esta investigación, el objetivo principal es realizar una evaluación ambiental de la construcción, mantenimiento y operación de 45.6 km de carretera sin asfaltar en la ya mencionada carretera Boca Manu, todo ello con un enfoque atribucional de los efectos inmediatos del sistema delimitado previamente. Aunque en este trabajo solo se estudia este primer enfoque, un análisis más exhaustivo indicaría que el enfoque consecuencial vinculado a los efectos indirectos de la construcción de la carretera podría tener consecuencias iguales o más importantes que aquellas identificadas en este estudio. Para realizar análisis con enfoque consecuencial se requiere generar una serie de modelamientos de deforestación, cambio de uso de suelos, agricultura y otros, cuyo desarrollo escapa de los límites y el alcance de esta investigación. Pese a esto, en el capítulo 6 se realiza una discusión, de manera cualitativa, de los posibles efectos que pudiesen generarse a lo largo del tiempo una vez finalizada la carretera.

3.2.1.1 Definición de la unidad mínima fundamental

De acuerdo al sistema de producción, la unidad funcional (UF) seleccionada es de 1 km de carretera sin asfaltar en un año de operación. Esta selección se encuentra en consonancia con aquellas encontradas en la literatura (e.j., Stripple, 2001; Treloar et al., 2004) y es una combinación de criterios provenientes de la geometría de la sección y de una asignación de tiempo (1 año). Esta caracterización temporal corresponde al

periodo que dura un ciclo de uso antes de su mantenimiento realizado una vez pasada la temporada de intensas lluvias propias de esta zona amazónica.

Aunque la longitud tomada como UF es un 1 km, los cálculos fueron realizados con una muestra de 3.24 km de carretera construida, esto debido a que este trayecto estaba casi finalizado y los cuadernos de obra registraban información bastante detallada. Debido a las similares condiciones locales de geología y topografía a lo largo del proyecto, esta muestra se consideró como representativa para los 45.6 km de la carretera Boca Manu.

El tiempo de vida de una carretera es distinto al de cualquier otro producto ya que no se tiene un fin de vida definido (Stripple, 2001). El tiempo utilizado en el escenario propuesto tomó en cuenta las proyecciones del GOREMAD en su Plan Vial Departamental y las tendencias de la legislación ambiental peruana. Se asume el año 2030 como punto de control debido a que Perú evidenciará ese año el cumplimiento de los compromisos suscritos ante el UNFCCC como el de reducción de sus emisiones de GEI en un 30% respecto al escenario *Business as Usual* (MINAM, 2015). Aunque la carretera en estudio está considerada como trocha carrozable, el nivel más básico en la clasificación de vías, la tendencia refleja que eventualmente esta ruta será mejorada. Por ello, el escenario evaluado en este estudio considera que en un plazo de 15 años la carretera Boca Manu sufriría cambios sustanciales en sus características y bajo este contexto se utilizaron los resultados obtenidos como línea base para la discusión.

3.2.1.2 Delimitación de los límites del sistema

La delimitación del sistema consiste en determinar las unidades de procesos que el ACV evaluará. Se tomaron en cuenta aspectos geográficos, aspectos temporales y las características tecnológicas propias del sistema a evaluar.

Esta etapa es de suma importancia ya que en esta se delimitan los *límites últimos* en el escenario estudiado. Este *límite último* enmarca al proceso desde su inicio de vida en la naturaleza hasta su estado como sistema tecnológico desarrollado. Idealmente, los datos introducidos y los resultados obtenidos deberían ser evaluados en todo momento, tanto desde el inicio de vida en la naturaleza, durante su etapa como sistema tecnológico desarrollado en sí y su regreso a la naturaleza como parte final de su ciclo de vida (Tillman et al., 1994). Evaluar un sistema desde su inicio hasta su retorno en la naturaleza no es sencillo; por lo tanto, es fundamental reducir los límites del sistema en evaluación a un nivel adecuado que proporcione información suficiente para un correcto

análisis y que a su vez sea exhaustivo hasta un nivel razonable a partir del cual no sea necesario mayor profundización.

El sistema delimitado descrito se estableció en torno a las actividades de mayor competencia en la construcción de una carretera afirmada y en las limitaciones que este proyecto pueda presentar en cuestión de tiempo, presupuesto y calidad de datos. En el escenario propuesto para este estudio, los límites del sistema abarcan la instalación de obras provisionales, las obras preliminares, el movimiento de tierras, el mejoramiento de la carretera, las obras de arte, la mitigación de medio ambiente, y el uso y mantenimiento (ver figura 4).

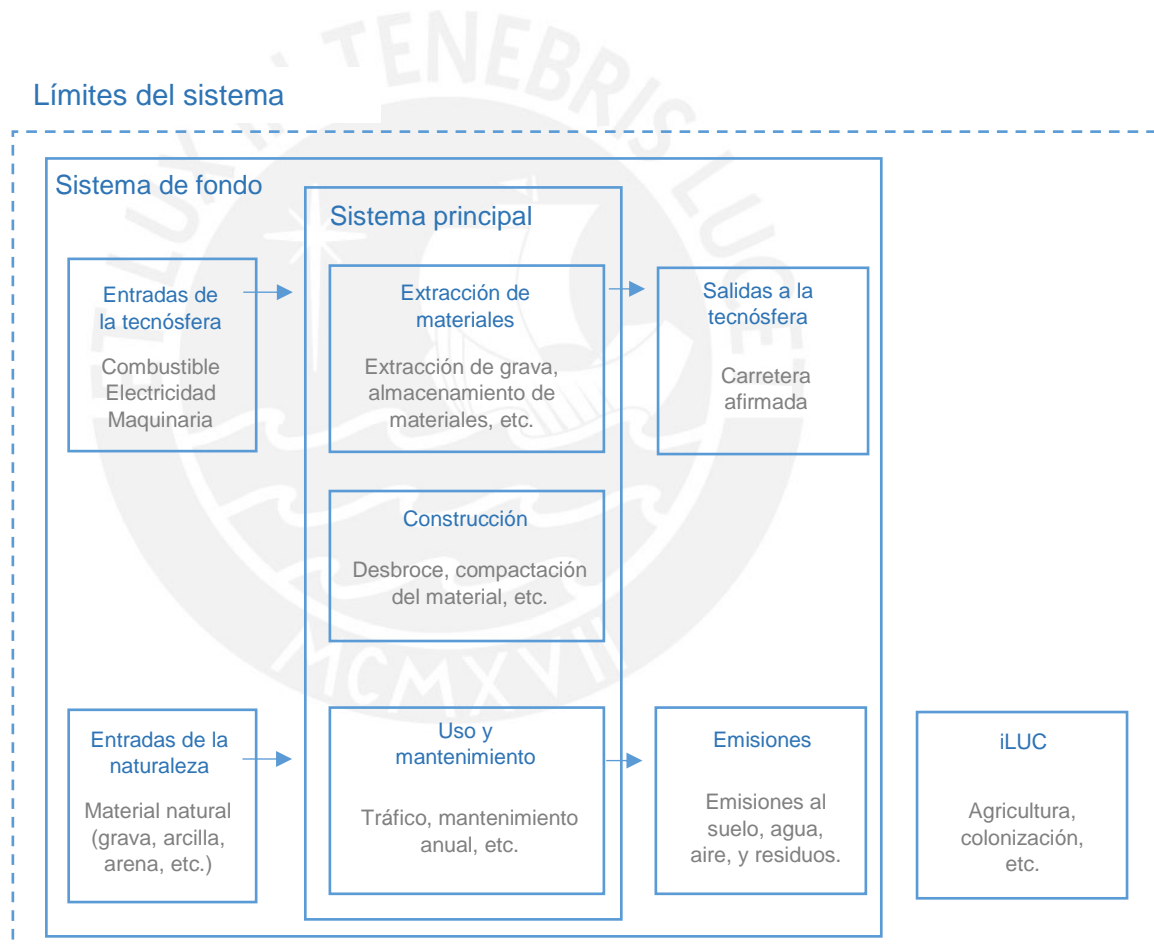


Figura 4: Representación de los límites del sistema. Se excluyen los efectos producto del cambio indirecto de uso de suelo y el fin de vida de la carretera. **Elaboración propia.**

Como muestra la Figura 4, se ha excluido del sistema el fin de vida de la carretera y los cambios indirectos en el uso de suelo. El primero fue obviado ya que se asume que el mecanismo de manejo de residuos depende de las condiciones tecnológicas de la nueva vía que vaya a reemplazarla; y el segundo, porque los cambios indirectos están vinculados a sistemas complejos y que dependen, sobretodo, de las condiciones económicas y políticas en las que se pretenda modelar un posible escenario de estudio.

3.2.2 Inventario de Ciclo de Vida

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) consiste en la recolección de toda información numérica relacionada al ciclo de vida del sistema y que contribuya con los objetivos del ACV. Esta involucra todos los componentes de la biosfera – material granular, arcilla, agua, madera, gases, etc. – y la tecnosfera –sub productos industriales, combustibles, maquinaria, etc – que sean parte de las entradas y salidas de todo el sistema estudiado.

Como fuente secundaria se utilizó la base de datos ECOINVENT v3.1, que cuenta con más de 20 años de experiencia en el desarrollo de ICV y contiene datos de distintas industrias alrededor del mundo (ecoinvent, 2015). Para cuantificar las emisiones producto de la combustión se recurrió a la literatura tomando en cuenta las condiciones propias de la zona de estudio. Este modelamiento de emisiones es descrito en el capítulo 4.2.1.3. La información primaria se obtuvo a partir de registros de campo, de la información técnica del proyecto y de la determinación de los agentes (procesos vinculados) que intervienen en la construcción de un proyecto de infraestructura vial.

3.2.3 Análisis del Impacto de Ciclo de Vida

El Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV) busca obtener información adicional mediante la evaluación del ICV del sistema en estudio para poder lograr una adecuada interpretación de los resultados en lo que refiere a aspectos ambientales (ISO, 2006b). Para esta etapa se utilizó el software SimaPro v8.02, que sirvió como herramienta de procesamiento de los paquetes de información que obtenidos en el ICV. Este procesamiento se realizó mediante la metodología ReCiPe, que tiene como objetivo transformar la larga lista de elementos obtenidos en el ICV en indicadores numéricos ambientales denominados *categorías de impacto* (Goedkoop et al., 2013). El impacto ambiental en cada categoría puede ser calculado utilizando factores de caracterización. Estos permiten cuantificar los impactos de los contaminantes en función de un

contaminante de referencia y que, de acuerdo a la ISO 14044 (ISO, 2006b), deben estar basados en mecanismos ambientales que relacionen los efectos de las actividades humanas con determinadas áreas de protección. La etapa final de acción de los mecanismos ambientales se denomina endpoint y es seleccionado de acuerdo al área de protección que se considere relevante – p. ej. Salud humana, biodiversidad, etc. -. Los puntos intermedios entre el mecanismo ambiental y el punto final pueden ser utilizados también como indicador y son denominados midpoint (Goedkoop et al., 2013). En el caso de ReCiPe, esta metodología utiliza 18 indicadores midpoint (punto medio), mostrado en la Figura 5., y 3 indicadores endpoint (punto final).

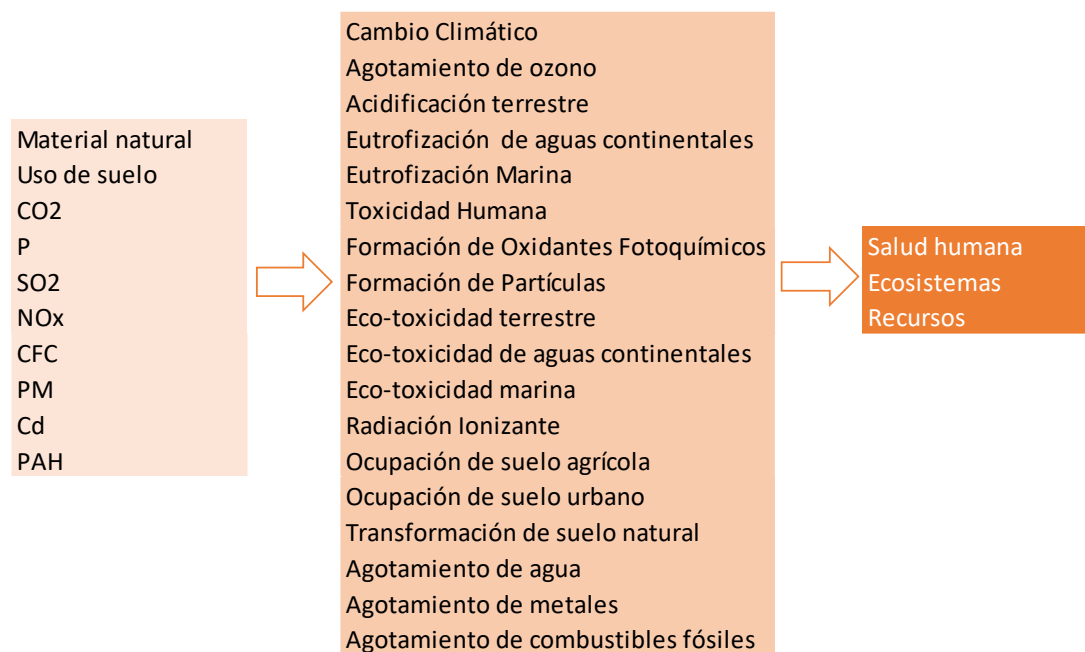


Figura 5: ICV (izquierda), indicadores midpoint (centro) e indicadores endpoint (derecha) en la metodología ReCiPe 2008. **Fuente:** ReCiPe

Los indicadores endpoint que se proporciona como cálculo final son: salud humana, ecosistema y recursos. Sin embargo, debido a que el método combina diversos indicadores midpoint para calcular obtener indicadores endpoint, el proceso de cálculo en esta etapa genera mucha incertidumbre (Bare et al., 2000). En consecuencia, no se utilizaron estos indicadores finales para el análisis por la complejidad del ecosistema de

la zona en estudio. Solo los indicadores midpoint fueron utilizados para la discusión y la elaboración de conclusiones.

Pese a que ReCiPe incluye Cambio Climático en su metodología, esta categoría de impacto se calculó utilizando el método propuesto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su versión 2013 para un tiempo de cálculo de 100 años. Todo esto sustentado en que el IPCC 2013 es un método con información más reciente en lo que respecta a factores de caracterización.

La elección del horizonte temporal de cálculo se realiza tomando en cuenta la diferencia de tiempo de vida que cada uno de los GEI tienen en la atmósfera. Si se escogiese tiempos de cálculo cortos -20 años- la importancia relativa de gases de corta duración -p. ej. metano-, aumenta. Por otro lado, la elección de tiempos largos de cálculo -500 años- disminuye la importancia relativa de gases de corta duración e incrementa la importancia de aquellos más duraderos -p. ej. CO₂, N₂O, CFCs- (Brandão et al., 2013). Dependiendo del contexto en el que se pretendan usar los resultados, optar por un horizonte de 20 años puede permitir conocer los efectos inmediatos de determinado escenario socioeconómico en un modelo de cambio climático. Los horizontes de 100 y 500 años, por otro lado, son utilizados con escenarios socioeconómicos con horizontes temporales similares a 100 o 500 años. En esta investigación se utilizó un horizonte de 100 años debido a su carácter intermedio.

3.2.4 Análisis de sensibilidad

Debido a que se observó cierta incertidumbre en determinadas suposiciones metodológicas, se calcularon distintos escenarios creados a partir del escenario base propuesto. Como se explica más adelante, se utilizaron valores máximos y mínimos de los parámetros considerados como necesarios a evaluar. Estos escenarios son resultado de la combinación de distintos valores de cada parámetro que responden a suposiciones razonables respecto a posibles situaciones que el escenario base no permita analizar. En consecuencia, la cantidad de escenarios se obtiene a partir de la Ecuación 1:

$$N = P_1 * P_2 * \dots * P_n \quad (1)$$

Donde:

N: Cantidad de escenarios necesarios a evaluar

P_n: Cantidad de valores a evaluar del parámetro *n*

3.2.5 Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida

El ACV concluye con la Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida. En esta etapa se realiza la discusión de los resultados obtenidos en el ICV y el AICV (ISO, 2006b). De esta forma se desarrollan sugerencias y se pueden proponer modificaciones en el sistema estudiado. Aunque esta etapa representa la culminación metodológica del ACV, la naturaleza iterativa de esta herramienta establece, en la mayoría de los casos, que esta interpretación conduzca a modificar o refinar el proceso de cálculo en el AICV o incluso actualizar y mejorar el ICV.



4. Desarrollo del proyecto

4.1 Caso de estudio

El tramo estudiado tiene como inicio el pueblo de Nuevo Edén (-12.621243,-71.21192, 387 m.s.n.m.) y el final ubicado frente al poblado de Boca Manu (-12.27258, -70.914152, 295 m.s.n.m). Esta carretera representa la culminación de la progresiva expansión de la ruta que conecta la capital del Departamento de Cusco con el Departamento de Madre de Dios ya que integra los poblados de Shipiteari -a través del puerto-, Diamante y Boca Manu a la ya existente carretera Cusco – Nuevo Edén. En efecto, hasta antes de 1950, el pueblo de Paucartambo era el último poblado que esta carretera conectaba. Ese mismo año, se logró incorporar al poblado de Pillcopata a la ruta y, durante los años 70, gracias al cuerpo de ingenieros del Ejército del Perú, se conectó el pueblo de Salvación y seguidamente la Comunidad Nativa de Shintuya. Este avance fue progresivo hasta 1975, año en el que el ejército es replegado y se detiene la expansión de esta vía hasta la primera década de este milenio, tiempo en el que se retoman los trabajos de infraestructura y se incorporan a la ruta el pueblo de Itahuanía y, finalmente, la Comunidad Nativa de Nuevo Edén (ver Figura 5).



Figura 6: Ubicación de los puntos referenciales en la historia de expansión de la carretera Cusco – Nuevo Edén. A: Cusco, B: Paucartambo, C: Pillcopata, D: Salvación, E: Shintuya, F: Itahuania, G: Nuevo Edén. *Elaboración propia a partir de Google Maps.*

De acuerdo a la documentación administrativa-legal, la construcción de esta carretera - 45 km- se concretará mediante distintos proyectos de inversión pública y en distintos intervalos de tiempo. Los datos obtenidos en este estudio corresponden al primer tramo (ver Figura 6) que fue construido utilizando los remanentes presupuestales de otro PIP –SNIP n° 51558-. La construcción del tramo restante debía realizarse mediante una distinta partida presupuestal, pendiente aún de aprobación pero que ya se encuentra incluida en el Plan Vial Departamental de Madre de Dios (ver Figura 7).

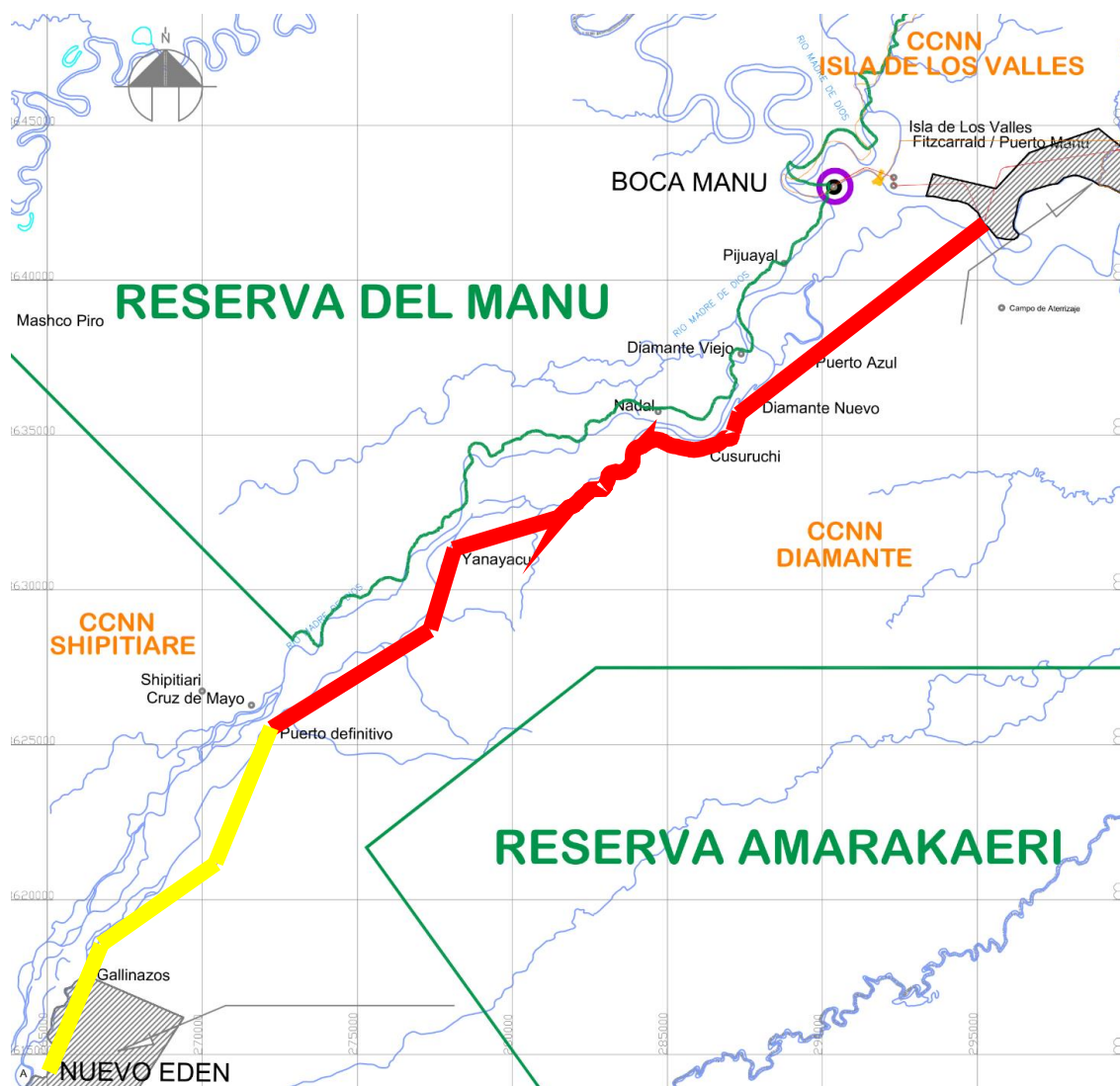


Figura 7: Trazo de la carretera Nuevo Edén-Boca Manu. La línea amarilla indica el tramo 1. La línea roja indica el tramo 2. **Fuente:** Planos GOREMAD

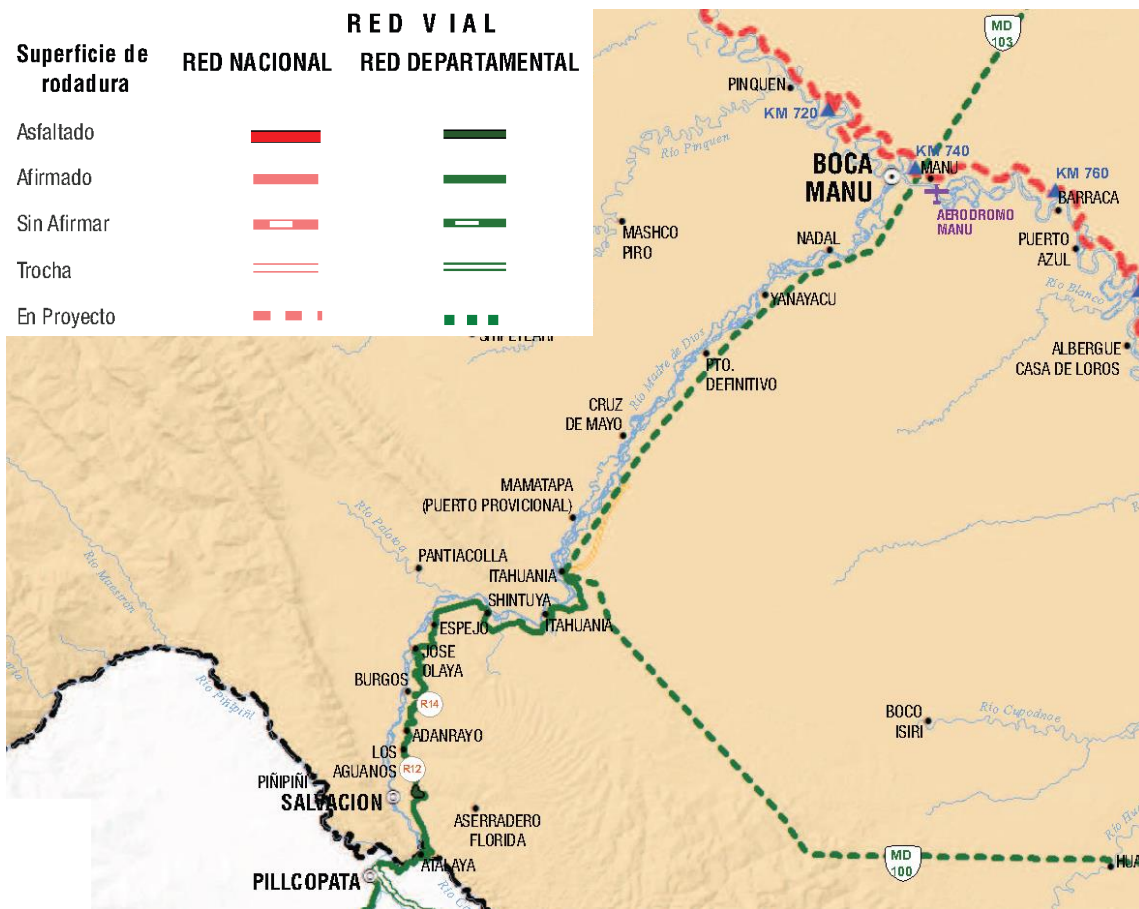


Figura 8: La línea verde punteada indica que la ruta forma parte de una red departamental proyectada. *Extraído de:* Mapa vial de Madre de Dios, 2014.

Los procedimientos constructivos propuestos y ejecutados para el *tramo 1* son los mismos que se utilizarán en el *tramo 2*, así como la maquinaria y el material que conforma el afirmado. Bajo estas condiciones, se tomaron los datos reales correspondientes a 3.24 km del *tramo 1* y estos fueron posteriormente considerados para evaluar la carretera completa -45 km-.

La Sub-Región Manu designó un presupuesto de S/. 685'203.80 para la construcción del *tramo 1* bajo la denominación de '*Rehabilitación del Camino Vecinal Nuevo Edén – Shipiteari*'. Esta subpartida presupuestal corresponde al monto asignado al PIP denominado '*Mejoramiento de las condiciones para un adecuado desarrollo de las actividades socio – económicas de los distritos de Fitzcarrald y Manu, provincia de Manu – Madre de Dios*' (MEF, 2008). Este PIP es un paquete de medidas y trabajos

desarrollados a lo largo de los últimos 6 años y que cuenta con la construcción del *tramo 1* como etapa culminante.

El trazo de la carretera Boca Manu atraviesa en toda su extensión la zona de amortiguamiento de la Reserva Comunal Amarakaeri, espacio en el que las actividades agrícolas, forestales y comerciales son controladas. El área destinada a la construcción de la vía sobrepasa predios privados debidamente registrados. Los propietarios de estos terrenos cedieron parte de sus parcelas en aras de la ejecución del proyecto, lo cual significa que estos territorios ya contaban con vías de acceso peatonal y que fueron utilizadas durante muchos años como caminos de herradura, ya sea para el transporte de madera y otros productos forestales o como única vía de acceso distinta a la fluvial (ver Figura 8)

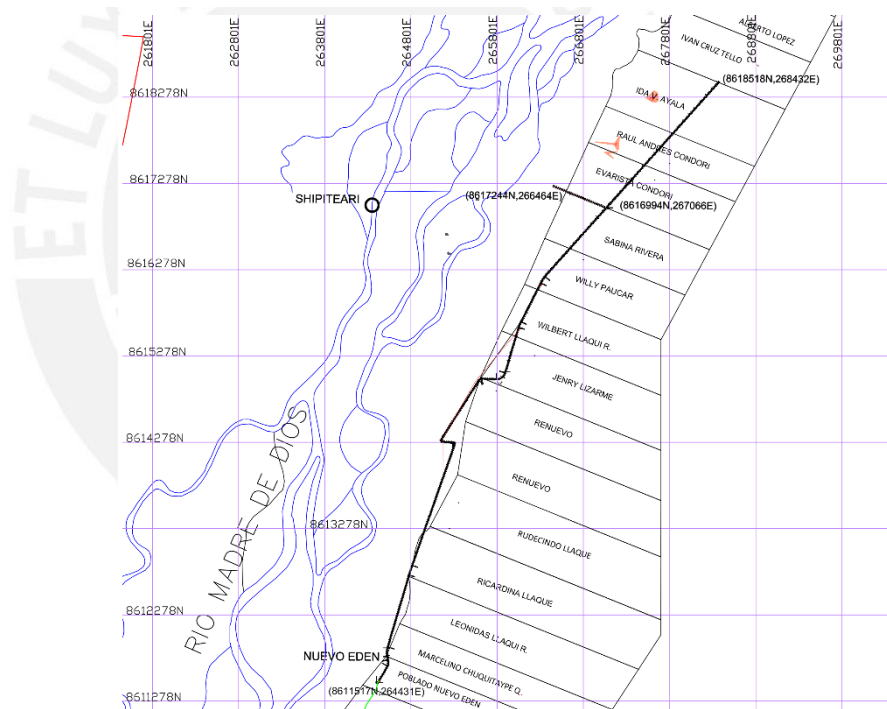


Figura 9: Predios ubicados a lo largo del trazo de la ruta de la carretera. **Fuente:** GOREMAD, 2013

4.1.1 Características de la carretera

Según el Manual de Carreteras: Diseño geométrico (DG-2014) (MTC, 2014), la carretera en estudio se clasifica como una trocha carrozable debido a su IMDA menor a 200 veh/día, y se ubica en un terreno plano debido a que tiene pendientes menores al

3%. La superficie es afirmada y está constituida en su mayor parte por material recolectado de río. Este material está constituido por una mezcla de bolonería (rocas de TM 12", 10" y 8") y material granular.

Aunque la memoria descriptiva del proyecto indica un ancho de vía es de 3 metros, las mediciones de campo demuestran que, en gran parte de su extensión, la vía tiene un ancho de 5 m, todo ello correspondiente a la superficie sobre la cual se tiende el material granular. Las secciones de carretera medidas durante la visita de campo tienen un espesor promedio de 65 cm. Es necesario mencionar que este espesor no es constante a lo largo de los 3.24 km y no es realmente representativo. En algunos sectores de la carretera -45 km- se utilizará más material debido a variaciones en la superficie del terreno. Sin embargo, esta imprecisión no representa impedimento para la elaboración del inventario. Esto es debido a que se consideraron metrados globales correspondientes a los 3.24 km y que permitió tener un sistema discretizado en unidades -3.24 km- con características similares (ver Figura 9).

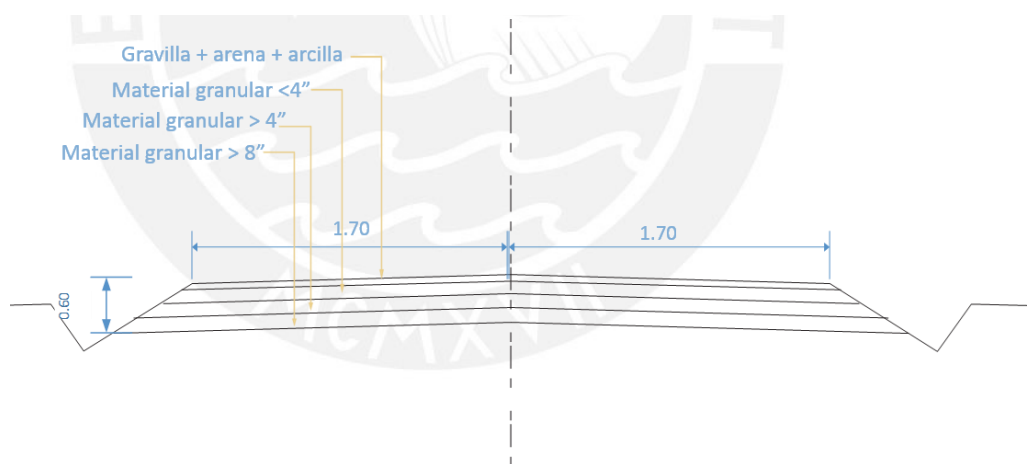


Figura 10: Sección típica correspondiente a la muestra del tramo de carretera estudiado. *Elaboración propia.*

La vía está emplazada sobre una sección de 20 m libres de vegetación. Este espacio está constituido por material orgánico en su superficie y arcilla limosa a pocos centímetros de profundidad (ver Figura 10).



Figura 11: Fotografía de la zona de trabajo días después del desbroce. Se pueden apreciar las varillas distanciadas a 12 m que sirven de guía para la ubicación de la vía. **Fotografía propia.**



Figura 12: La fotografía permite apreciar el ancho de 20 m deforestados para la construcción de la carretera. **Fotografía propia.**

En el momento de la visita, este suelo, a diferencia del terreno cubierto por la vegetación, se encontraba con una muy baja saturación aparente. Esto se debe a que el espacio abierto se encuentra expuesto directamente a los rayos solares y estos evaporan el agua de la superficie.

Debido a la pérdida de saturación, la arcilla se compacta y es sobre esta área en la cual se realiza el lastrado sin la necesidad de compactar el terreno previamente. Los 7.5 m de espacio restantes cada uno de los lados son utilizados como zona de maniobras

(ver Figuras 11 y 12). Esta longitud corresponderá posteriormente a la distancia designada como derecho de vía; esto quiere decir que la distancia total utilizada en una sección es de 20 metros aproximadamente.



Figura 13: En la fotografía se observa que el espacio adicional al ancho de vía es utilizado como espacio para la maniobra de la niveladora. **Fotografía propia.**

En la literatura y en el archivo fotográfico de la visita de campo se puede apreciar que las especies arbóreas que rodean la carretera de acceso a Nuevo Edén y la carretera en construcción, en su mayoría, corresponden a bosques secundarios. Esto quiere decir que las especies maderables de mayor valor ya han sido extraídas durante, por lo menos, los últimos 30 años. Pese a esto, se distingue aún un bosque muy denso y que almacena una considerable cantidad de carbono aéreo (Asner et al., 2014) (ver Figura 13).



Figura 14: A pesar de ser en mayor parte bosque secundario, en los alrededores de la vía era posible encontrar aún especies de gran tamaño que tuvieron que ser removidas en la etapa de desbroce. **Fotografía propia.**

4.1.2 Proceso constructivo

En la memoria descriptiva de la construcción del *tramo 1* de la carretera Boca Manu se mencionan las siguientes partidas de construcción: obras previsionales, trabajos preliminares, movimiento de tierras, mejoramiento de calzada, obras de arte, mitigación de medio ambiente, y uso y mantenimiento. Sin embargo, existe una relación más compleja entre los subprocesos de la construcción. Estos subprocesos se conectan entre ellos a través de relaciones de precedencia que no siguen necesariamente la linealidad propuesta en la memoria descriptiva (ver Figura 15)

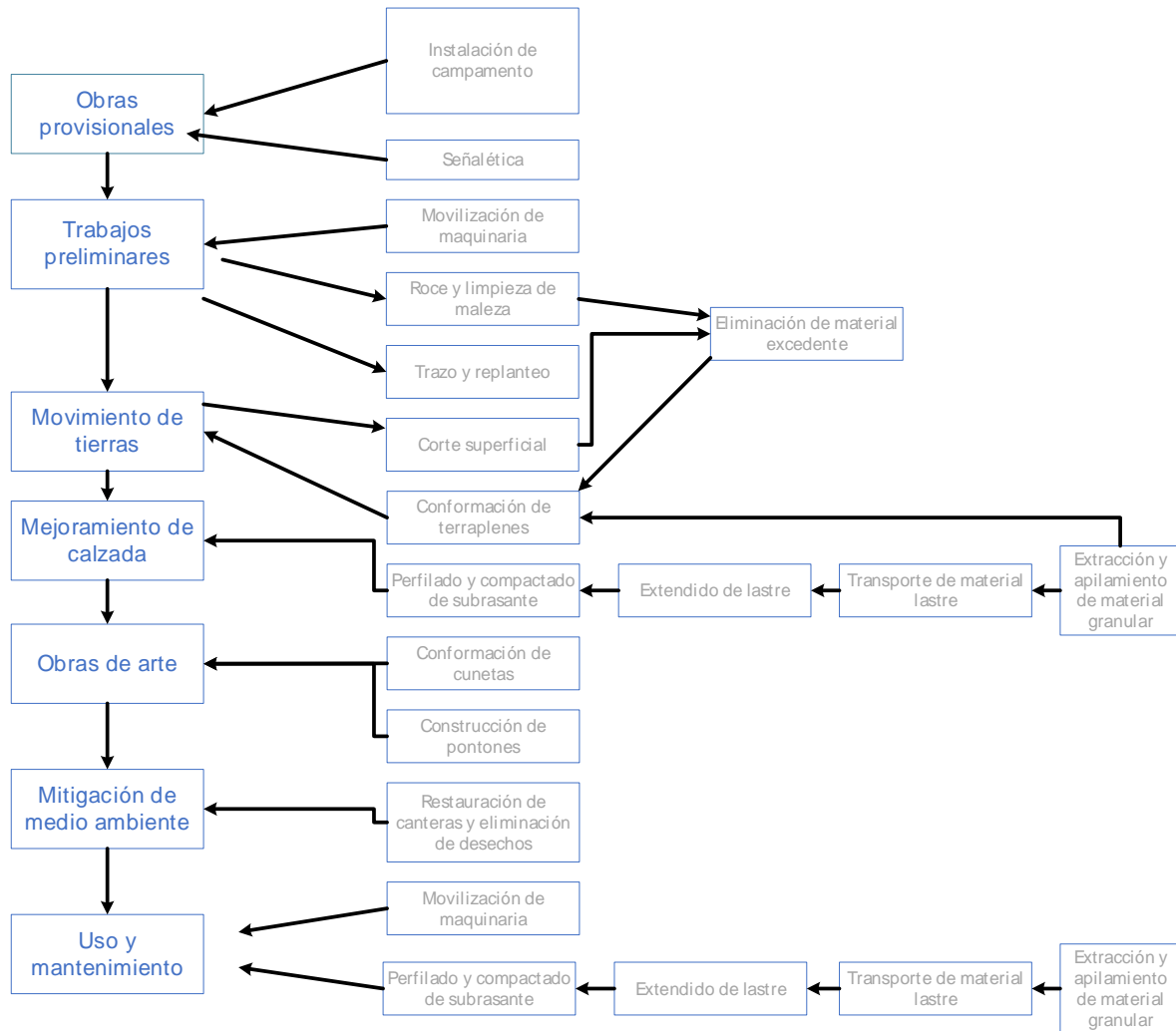


Figura 15: Mapa detallado de procesos de la construcción de la carretera. *Elaboración propia.*

La Figura 15 representa un mapa del proceso constructivo de la carretera Boca Manu. Sin embargo, las singularidades de cada actividad en determinados tramos hacen que no sea sencillo extrapolar los resultados de la muestra al resto de la vía. Dicho de otro modo, mientras se modelen los procesos constructivos de una sección de menor tamaño – ej. menor a 1 km - los resultados podrán ser más precisos para esa sección, pero menos exactos para toda la carretera. De igual manera, segmentar la carretera en secciones de tamaño razonable es útil para evitar realizar asignaciones adicionales de consumo y emisiones. Por consiguiente, se utilizó una sección de 3.24 km debido a que, en los kilómetros posteriores a este, el proceso constructivo se tornaba cíclico – una “construcción” cada 3.24 km aproximadamente -. De esta manera, fue posible simplificar

los procedimientos en 3 principales actividades: construcción, uso y mantenimiento (ver Figura 15).

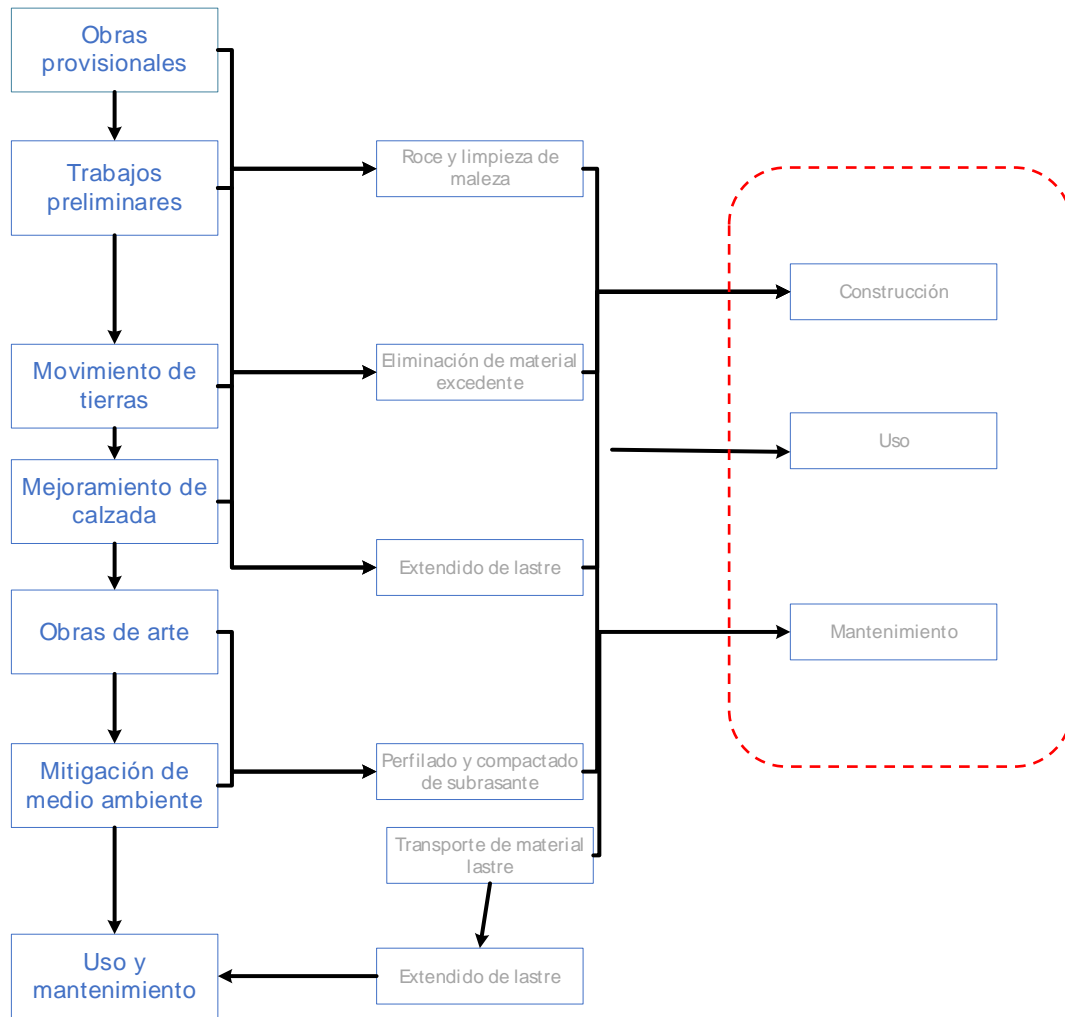


Figura 16: Mapa simplificado de procesos de la construcción de la carretera. *Elaboración propia.*

La extracción del material, el transporte y los trabajos de sitio se realizaron utilizando la maquinaria descrita en la Tabla 3. Todos los equipos pertenecen a la sub-región Manu y estaban ubicados en Salvación antes de la ejecución del proyecto.

1	CARGADOR FRONTAL CAT 950H
2	CAMION VOLQUETE FMX EGK - 222
3	CAMION VOLQUETE FMX EGI - 449
4	EXCAVADORA HIDRAULICA CAT 324 DL
5	CARGADOR FRONTAL CAT 950H
6	MOTONIVELADORA CAT 140K
7	VOLQUETE FM WGS 589
8	VOLQUETE FMX 440 EGI 449
9	VOLQUETE FMX -EGK-222
10	RODILLO
11	TRACTOR SOBRE ORUGAS
12	CAMIONETA

Tabla 3: Listado maquinaria utilizada durante la construcción de la carretera.
Fuente: GOREMAD, 2015

4.2 Inventario de Ciclo de Vida

4.2.1 Datos adquiridos

Se recolectó información sobre las características de la maquinaria, consumo de combustible y periodicidad de mantenimiento correspondiente a los periodos junio, julio y agosto de 2015. La descripción de los procesos constructivos y particularidades de las partidas de trabajo fueron brindadas por los ingenieros responsables del proyecto mediante entrevistas presenciales. Se detallaron las características del afirmado, las dimensiones de la sección típica, las partidas desarrolladas y la descripción de los

procedimientos constructivos a realizar durante la ejecución de la obra. De igual forma, se obtuvieron los rendimientos de las máquinas y consumos de materiales de cada mantenimiento anual realizado en el tramo anterior a la nueva carretera.

4.2.1.1 Metrados de materiales

Se recurrió a los cuadernos diarios de obra para identificar los ingresos de materiales, combustible y otros correspondientes a cada partida. El anexo 3 muestra las cantidades diarias de material movilizado. Se contrastó el avance en campo con los cuadernos diarios de obra y se identificaron las fechas correspondientes a los 3.24 km tomados como muestra. Se consideró como inicio el día 11 de agosto y el 26 de agosto como final; sin embargo, una serie de trabajos preliminares - acondicionamiento de terreno y desbroce - fueron realizados desde el mes de junio, por lo que se asignaron a la muestra solo los días de *trabajos preliminares* que aportaron a la construcción de los 3.24 km.

De acuerdo a la cantidad de viajes realizados por los volquetes, se movilizaron 6930 m³ de material granular entre las fechas mencionadas. Dicho material era extraído directamente de los bancos de piedras ubicados en la rivera del Río Alto Madre de Dios. Debido a que el método de análisis utilizado - ReCiPe - realiza el cálculo en kilogramos, se utilizó un peso volumétrico de 2850 kg/m³ correspondiente a la piedra de río. Todas las entradas que no fueron consideradas en el cálculo fueron descartadas por tener una contribución menor al 5% del total en masa y/o menor al 5% del total en energía, estas fueron: la producción de equipos de escritorio y consumo eléctrico de la oficina técnica, la construcción de pontones, y los consumos y emisiones derivados de los campamentos de obreros.

4.2.1.2 Fabricación y mantenimiento de maquinaria

Las entradas correspondientes a la utilización de aceites, grasas e insumos requeridos para el mantenimiento de la maquinaria fueron obtenidas de la base de datos ecoinvent. Se recurrió a esta fuente ya que el mantenimiento tanto preventivo como correctivo que realiza la sub-región Manu es el mismo que sugiere el fabricante y ecoinvent asigna este mantenimiento al ciclo de vida de este vehículo tomando en cuenta la fabricación y transporte de estos insumos.

El número de veces que se realiza el mantenimiento depende del tiempo de uso del vehículo. Por ello, asumiendo que los vehículos se encuentran en constante operación, se consideró un tiempo de uso de 15 años para la maquinaria pesada y 5 años para las camionetas pick-up. Con respecto a las emisiones producto de la fabricación de la maquinaria, estas fueron prorrateadas y asignadas a los 2 meses de operación - junio-julio, julio-agosto -. Las emisiones en esta etapa fueron calculadas también utilizando ecoinvent ya que los productos utilizados (grasas, aceites, repuestos) son todos importados y ya están incluidos en esta base de datos.

4.2.1.3 Producción y consumo de combustible

Las emisiones relacionadas a la producción del combustible fueron obtenidas de ecoinvent y adaptadas al mercado nacional. En el caso del diésel B5, se analizó la producción de diésel con un 5% de contenido de etanol.

La cantidad de combustible consumido se obtuvo a partir de los cuadernos de control de almacén proporcionados por la sub-región Manu. En estos cuadernos se indica el combustible consumido por día y la máquina que la solicita. De esta manera es posible cotejar la producción diaria con el combustible utilizado, evitando así doble conteo o la omisión de algún consumo importante.

Las emisiones al aire generadas por la quema de combustibles fósiles tienen una gran relevancia dentro de distintas categorías de impacto. Por esta razón, se realizó un propio modelo de emisiones producto de la combustión que se elaboró tomando como referencia el capítulo 1.A.3.b del EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook – 2013, en su versión más reciente (EMEP, 2013).

La guía propone 3 niveles de modelación que son elegidos de acuerdo a la disponibilidad de datos: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3. El Nivel 1 (*Tier 1*) es el nivel más sencillo y toma como parámetro el consumo de combustible. Los niveles 2 y 3 (*Tier 2*; *Tier 3*) son más complejos y toman como parámetros los kilómetros recorridos y las velocidades medias (EMEP, 2013). En el caso de los vehículos de carga pesada – HDV en inglés -, se utilizó el Nivel 1, asumiendo que las características de la flota europea promedio en 2005 son válidas para Perú en el 2015. Para el transporte de los ingenieros a la obra, se modelaron vehículos ligeros de pasajeros - LDV – siguiendo los mismos pasos que los utilizados en los HDV.

La cantidad de azufre asumida en el modelo corresponde al máximo indicado por Petroperú en sus combustibles Diesel B5, Gasolina 84 y 90: 50ppm. Las tablas 4 y 5 muestran los resultados de los modelos utilizando el Nivel 1 y dos distintos tipos de vehículo.

Emisiones de Diesel Nivel 1 – Vehículo de pasajeros		Observaciones	Emisiones de Diesel Nivel 1 – Vehículo de carga pesada		Observaciones
	Para 1 kg de Diesel Emisiones al aire			Para 1 kg de Diesel Emisiones al aire	
Carbon monoxide	2.05 g		Carbon monoxide	5.73E+00 g	
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0.41 g		NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1.33E+00 g	
Nitrogen oxides	11.2 g		Nitrogen oxides	2.83E+01 g	
Particulates	0.8 g		Particulates	6.10E-01 g	
Dinitrogen monoxide	0.044 g		Dinitrogen monoxide	3.00E-02 g	
Ammonia	0.024 g		Ammonia	1.00E-02 g	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.0000405 g		Indeno(1,2,3-cd)pyrene	8.60E-06 g	
Benzo(k)fluoranthene	0.0000458 g		Benzo(k)fluoranthene	3.72E-05 g	
Benzo(b)fluoranthene	0.0000526 g		Benzo(b)fluoranthene	3.33E-05 g	
Benzo(a)pyrene	0.0000455 g		Benzo(a)pyrene	5.50E-06 g	
Lead	0.000016 g		Lead	1.60E-05 g	
Carbon dioxide	3.14 kg	Combustión de diesel	Carbon dioxide	3.14E+00 kg	Combustión de Diesel
Carbon dioxide	8.01 g	Combustión de aceite lubricante	Carbon dioxide	1.99E+00 g	Combustión de aceite lubricante
Sulfur dioxide	0.0001 g				
		Asumiendo consumo 73 gramos de diesel por kilómetro	Sulfur dioxide	1.00E-04 g	Asumiendo un consumo de 210 gramos de diésel por kilómetro
Benzo(g,h,i)fluoranthene	13.0136986 µg		Methane	3.81E+02 mg	
Fluoranthene	246.575342 µg		Benzo(g,h,i)fluoranthene	3.67E+00 µg	
Benzo(a)pyrene	8.63013699 µg		Fluoranthene	1.02E+02 µg	
Pyrene	168.493151 µg		Pyrene	1.50E+02 µg	
Perylene	6.43835616 µg		Benzo(e)pyrene	9.71E+00 µg	
Anthracene	0.95890411 µg		Benzo(a)anthracene	1.14E+01 µg	
Benzo(e)pyrene	65.0684932 µg		Fluorene	1.90E+02 µg	
Benzo(a)anthracene	45.2054795 µg		Chrysene	7.73E+01 µg	
Acenaphthylene	355.068493 µg		Phenanthrene	1.10E+02 µg	
Acenaphthene	474.657534 µg		Naphthalene	2.70E+02 µg	
Chrysene	32.8767123 µg		Anthracene	4.12E+01 µg	
Phenanthrene	1171.23288 µg		Dibenz(a,h)anthracene	1.62E+00 µg	
Naphthalene	28767.1233 µg		Polychlorinated biphenyls	6.00E+01 pg	
Anthracene	4657.53425 µg		Arsenic	1.00E-01 µg	
Dibenz(a,h)anthracene	3.28767123 µg		Cadmium	8.70E+00 µg	
Polychlorinated biphenyls	167.123288 pg		Chromium	3.00E+01 µg	
Arsenic	0.1 µg		Copper	2.12E+01 µg	
Cadmium	8.7 µg		Mercury	5.30E+00 µg	
Chromium	30 µg		Nickel	8.80E+00 µg	
Copper	21.2 µg		Selenium	1.00E-01 µg	
Mercury	5.3 µg		Zinc	1.74E+03 µg	
Nickel	8.8 µg		Benzo(a)pyrene	4.29E+00 µg	
Selenium	0.1 µg		Perylene	9.52E-01 µg	
Zinc	1738 µg				
Methane	0 mg				

Tablas 4 y 5: Emisiones correspondientes a 1kg de combustible para una camioneta Pick-Up y un vehículo pesado, respectivamente. **Elaboración propia.**

4.2.1.4 Modelamiento de formación de material particulado (PMF)

La fuerza ejercida entre las ruedas y la superficie de la carretera provoca la pulverización del material superficial. Debido a la velocidad y al giro de la rueda estas partículas se elevan y son arrojadas al ambiente (EPA, 2006). Una gran desventaja de la guía de EMEP es la ausencia de un modelo para el cálculo de las partículas emitidas en carreteras sin pavimentar. Sin embargo, la guía AP – 42, del Environmental Protection Agency (EPA), en su capítulo 13.2.2, propone un método de modelación para cuantificar la cantidad de material particulado (PM) emitido durante el recorrido de un vehículo (EPA, 2006).

Esta guía propone un modelo experimental para cuantificar las emisiones de PM 10 – partículas menores a 10 micrómetros - y PM 2.5 – partículas menores a 2.5 micrómetros - en carreteras sin pavimentar. Sin embargo, las cantidades de PM 2.5 son obtenidas a partir de una proporción del PM10, lo cual indica que existe incertidumbre en los resultados producto de este modelo (EPA, 2006). Para la construcción de la carretera se utilizó la ecuación (2a) y para el uso de la carretera la ecuación (2b)

$$E = k \left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{W}{3} \right)^b \quad (2a)$$

$$E = k \frac{\left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{W}{3} \right)^b}{\left(\frac{M}{0.5} \right)^c} - C \quad (2b)$$

donde:

E = factor de emisión de tamaño específico

s = porcentaje de limo en la superficie

W = peso medio del vehículo

S = velocidad media del vehículo

C = factor de emisión para las emisiones de combustión, desgaste de freno y desgaste de llanta para un vehículo en 1988

En el caso de la construcción de la carretera, se contaba con datos globales y no detallaban la cantidad de kilómetros recorridos por cada volquete. Para poder utilizar el

factor de emisión calculado se asumió una distancia media igual a la distancia entre la cantera 1 y el punto medio de la distancia entre el kilómetro 1 y el kilómetro 3.24. Se utilizó la capacidad de transporte total de cada volquete para determinar el número de viajes realizados y se multiplicó esta cantidad por la distancia media obtenida anteriormente. Este valor se duplicó para hacer la correspondencia a los viajes de ida y vuelta.

4.2.1.5 Cambio en el uso del suelo directo

El cambio de uso de suelo (LUC por sus siglas en inglés) se define como el cambio del uso inducido por la actividad humana que un pedazo específico de suelo puede sufrir a lo largo del tiempo (UNFCCC). Este cambio se encuentra fuertemente vinculado a la emisión de gases de efecto invernadero debido a la liberación de carbono a la atmósfera. El terreno sobre el cual se emplaza la carretera Boca Manu tiene una densidad arbórea bastante alta, con alturas de copa de árbol de hasta 50 m. Por ello, esta situación es relevante debido a que la deforestación y la degradación de los bosques son una de las mayores fuentes de emisión de carbono.

Para medir cambio de uso de suelo de “Bosque tropical” a “Carretera afirmada” se tuvieron en cuenta las características descritas en el capítulo 4.1.1 y se calculó el área removida de vegetación. Por otro lado, la cuantificación de las emisiones generadas por la liberación del carbono aéreo contenido en los árboles se realizó utilizando el mapa de densidad de carbono superficial elaborado por el MINAM y el Carnegie Airborne Observatory (Asner et al., 2014) (ver Figura 16). Dicho mapa analiza todo el Perú con una resolución de una hectárea. Sin embargo, la Figura 17 solo muestra los datos para la región Madre de Dios. Se utilizó el valor medio de densidad de carbono correspondiente al Departamento de Madre de Dios (96.4 ton C ha⁻¹) (ver Tabla 6).

Direct land use changes (dLUCs) for 3.24 km Mean for Madre de Dios

Resources	Amount	Unit	Observation
Occupation, traffic area, road network	6.48	ha a	
Transformation, from tropical rain forest	6.48	ha	
Transformation, to traffic area, road	6.48	ha	
Emissions to air	Amount	Unit	Observation
Carbon dioxide	2288.834	ton	Deforestación en construcción

Tabla 6: Emisiones de CO₂ correspondientes al cambio directo del uso de suelo. **Elaboración propia.**

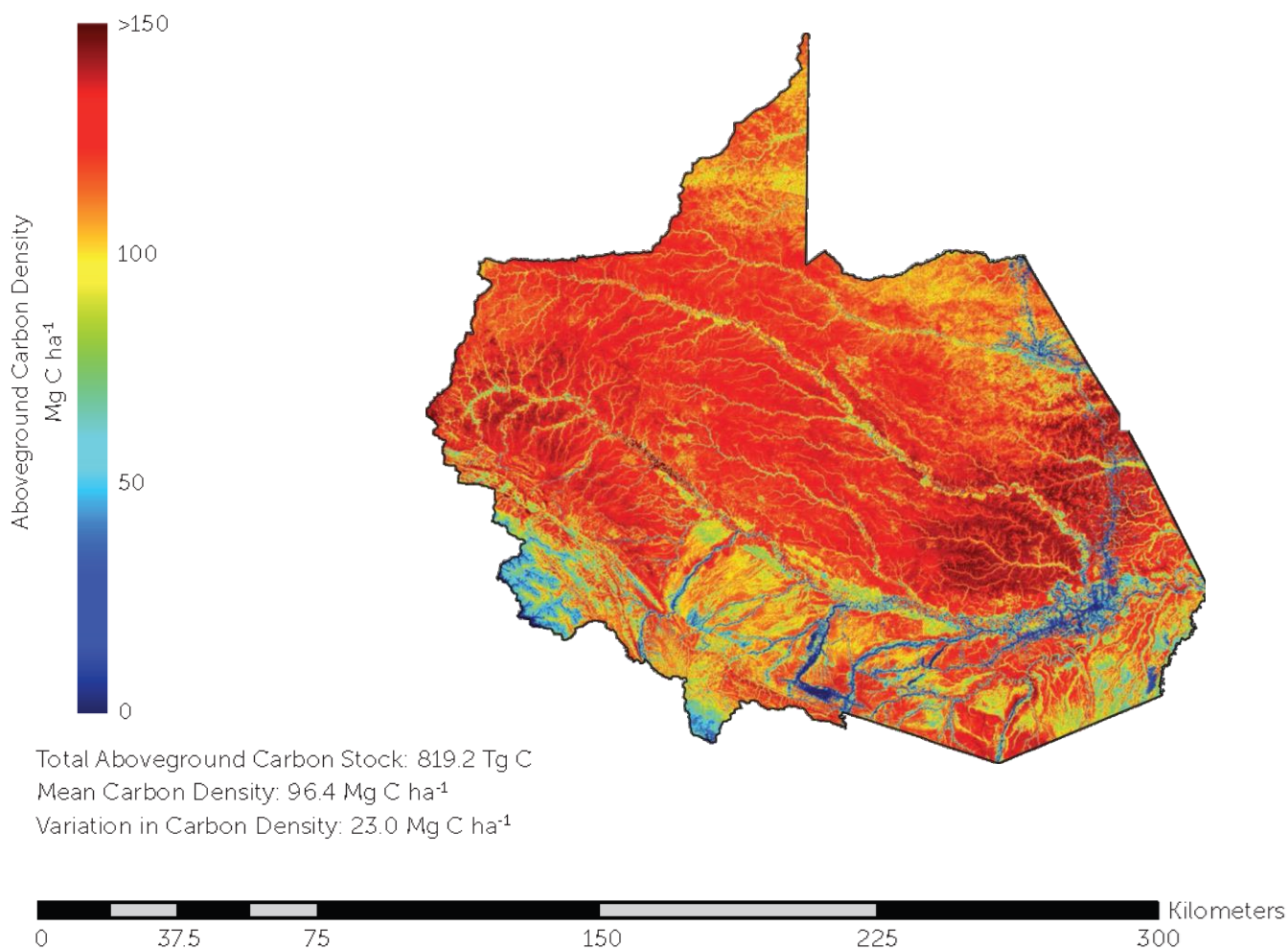


Figura 17: Mapa de densidad de carbono aéreo en la provincia de Madre de Dios. **Extraído de:** *The High-Resolution Carbon Geography of Perú*, Carnegie Airborne Observatory and MINAM. 2014

El carbono almacenado en el suelo fue modelado siguiendo las recomendaciones de Saatchi et al. (2011). Para ello, se modeló primero la cantidad de biomasa bajo tierra – BGB en inglés – que está en función de la biomasa superficial – AGB -. Se utilizó la ecuación 3:

$$BGB = 0.489 * AGB^{0.89} \quad (3)$$

Se calculó la cantidad total de carbono bajo tierra como el 50% de la biomasa bajo tierra, de acuerdo con Mokany et al. (2006).

Una vez estimadas las cantidades de carbono aéreo y bajo tierra, se asumió que los residuos del desbroce son abandonados en los costados de la vía sin que exista aprovechamiento de madera ya que las especies comerciales ya han sido extraídas. Basados en los datos presentados por Houghton et al. (2000), se asumió una tasa de descomposición en masa de todos los restos vegetales dejados en el sitio de 0.1 por año. Adicionalmente, debido a que el periodo de análisis es de 15 años, se asumió que todo el carbono superficial es transferido a la atmósfera. Para el caso del carbono secuestrado – subterráneo-, estudios señalan que las áreas sobre las cuales los restos vegetales se descomponen aumentan su contenido de carbono durante los 2 primeros años, luego de este tiempo, este contenido comienza a decrecer a lo largo del tiempo (Fearnside, 1996). No obstante, pese a que la distancia deforestada es de 20m, solo 5m corresponden a la superficie de rodadura de la vía, y, ya que 65 cm de suelo son reemplazados con material granular, se asume que todo el carbono secuestrado en estos 5 m se transfiere a la atmósfera y que los 15 restantes conservan todo el carbono. Pese a lo mencionado, lo cierto es que existe un efecto regenerativo en el área deforestada propio de las especies arbóreas y arbustivas en zonas tropicales. Este efecto se traduce en cierto carbono de la atmósfera que podría recuperarse si se asume que no existirá otra actividad en los 15 m de área deforestada restante. Esta tasa de regeneración anual fue asumida como 3.25 Mg C/ha en base a los resultados publicados por Houghton y Hackler (1999).

Una vez calculado las cantidades de carbono superficial y secuestrado en el suelo, se calcularon los GEI de acuerdo a lo sugerido por Fearnside (2000). Las emisiones de metano – CH₄ – debido al metabolismo de las termitas fueron asumidas

como 2.97% del carbono superficial en oxidación, mientras que el resto fue asumido como emisión en forma de CO₂ (Martius et al., 1993; 1996). Para el CH₄, el factor de emisión planteado fue de 653 g CH₄ por tonelada de carbono superficial en oxidación; y para el CO₂, 3.8 ton de CO₂ por tonelada de carbono total en oxidación – superficial y subterráneo -.

A pesar de haberse tomado en cuenta los aportes de la regeneración natural de las especies, este modelo de cambio de uso de suelo a lo largo de los años no es completamente certero. En primer lugar, no existe la garantía de que no se asienten actividades a lo largo de la zona deforestada en los próximos años. La accesibilidad que la carretera brinda genera un nuevo sistema dinámico y complejo en lo respecta a futuros usos del suelo.

Products	Amount	Unit	Observations
Direct Land Use Change (dLUC) due to regeneration	4.86	ha	Asumiendo 5m de ancho de carretera
Emissions to air	Amount	Unit	Observation
Carbon dioxide	-57.8738	ton	

Tabla 7: CO₂ secuestrado en la vegetación producto de la regeneración de la misma. **Elaboración propia.**

4.2.1.6 Uso de la carretera

El uso de carretera se modeló tomando en cuenta las consideraciones del Manual de Diseño Geométrico del MTC (MTC, 2014). En este rubro se consideraron las emisiones por cada kilómetro recorrido por vehículo y la cantidad de vehículos considerados corresponden a un IMDA asumido de acuerdo a la clasificación de la guía. Se realizó el cálculo de consumo de combustible para 1 año de uso tomando en cuenta el Nivel 2 de la guía EMEP y se utilizó un vehículo ligero comercial – LCV en inglés – como referencia. Al igual que para la construcción de la carretera, se modeló el material particulado emitido utilizando la ecuación 1a del manual AP-42 del EPA, tal y como fue descrito en la sección 4.2.1.4

4.2.1.7 Mantenimiento de la vía

Para cuantificar el consumo de material y combustible en el mantenimiento se recurrió a datos resumen de trabajos de mantenimiento realizados en las rutas anteriores a la carretera estudiada. El clima invariable a largo de la carretera y la similitud de este tramo con las vías que lo anticipan permitieron utilizar estos datos como referencia.

Se analizó el resumen de metrados y consumos para el mantenimiento de 78.85 km de carretera afirmada correspondientes a la ruta Río Carbón – Nuevo Edén. Con esta información se obtuvieron las entradas por el “mantenimiento de 1 km de carretera” y se escalaron los valores para los 3.24 km de la muestra. Mediante el informe de control de almacén se asignó el consumo de cada maquinaria y se consideró su uso como un proceso independiente.

4.3 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad generando escenarios adicionales a la línea base – escenario A1 -, como se muestra en la Tabla 8. En primer lugar, la densidad de carbono superficial asumida para el escenario A1 - 96.4 Mg de C/ha – corresponde a la densidad de carbono media para Madre de Dios, tal y como señala Asner et al. (2014). Sin embargo, este valor contiene cierta incertidumbre debido a que este nivel medio considera territorio urbano y cuerpos de agua en el cálculo. Por esta razón, se consideraron 3 escenarios adiciones que correspondieron a la media más la desviación estándar – 119.4 Mg de C/ha -, a la media menos la desviación estándar – 73.4 Mg de C/ha – y a la media de la densidad de carbono en Madre de Dios sin considerar los cuerpos de agua ni el territorio urbano – 99.3 Mg de C/ha -. El carbono bajo tierra fue modelado utilizando la ecuación [2], tomando como parámetro la densidad de carbono asumida en cada escenario.

En segundo lugar, se identificó que el potencial tráfico de vehículos en la nueva carretera era una importante fuente de incertidumbre. Por ello, se asumieron 33 vehículos diarios como línea base, esto tomado como el valor medio entre el IMDA actual – 16 – y el IMDA de diseño – 50 -. Adicionalmente, se modelaron 3 escenarios adicionales: 16, 50 y 200 vehículos por día, estos corresponden a el menor IMDA, el IMDA de diseño y el máximo IMDA permitido, respectivamente (MTC, 2008).

Finalmente, se modeló el estándar de emisión EURO 3 como línea base y el estándar EURO 4 como escenario adicional E1.

Escenario	IMDA	Densidad de carbono superficial* (Mg de C por ha)
A1	33	96.4
A2	16	96.4
A3	50	96.4
A4	200	96.4
B1	33	119.4
B2	16	119.4
B3	50	119.4
B4	200	119.4
C1	33	73.4
C2	16	73.4
C3	50	73.4
C4	200	73.4
D1	33	99.3
D2	16	99.3
D3	50	99.3
D4	200	99.3
E1**	33	96.4

* Obtenido de Asner et al. (2014)

** Se asumió el estándar de emisión EURO 3; en todos los demás, EURO 4.

Tabla 8: Lista de escenarios computados en el análisis de sensibilidad. *Elaboración propia.*

5. Resultados

5.1 Análisis de impactos de ciclo de vida: construcción de la carretera

Tomando como referencia el escenario base A1, es posible distinguir que, en la etapa de construcción y en la mayoría de categorías, la mayor parte de los impactos ambientales están vinculados a la maquinaria. En primer lugar, para el caso de las emisiones de GEI, se observa que el 96% corresponde a la maquinaria de construcción; en tanto que el 4% restante, a vehículos de menor tamaño, como por ejemplo las camionetas de transporte de ingenieros. Específicamente, cuando se analiza la categoría de Cambio Climático (CC), salta a la vista que aproximadamente el 95% de las emisiones producto de la maquinaria corresponden a la producción y combustión de combustibles fósiles, mientras que el 5% restante corresponde solo a la fabricación de los vehículos.

En segundo lugar, en las demás categorías, a excepción de la formación de material particulado (PMF), se distingue un comportamiento similar en el que más del 90% de las emisiones están vinculadas a la maquinaria. Sin embargo, en los casos particulares de agotamiento de metales -70%-, eutrofización de agua dulce - 59% -, y las categorías de toxicidad restantes – alrededor de 50% -, los impactos están vinculados mayoritariamente a la fabricación de la maquinaria y no a la producción y combustión de combustible como ocurre en CC. Finalmente, en el caso del PMF, el 96% de los impactos ambientales se atribuyen en forma de PM-2.5 y PM-10 al uso de vía durante la construcción de esta. El resto corresponde, principalmente, a las partículas emitidas durante la combustión (ver Tabla 9).

Categoría de impacto	Unidad	dLUC	Construcción	Mantenimiento	Uso	TOTAL
CC	kg CO2 eq	31898	1024	2033	3649	38904
OD	mg CFC-11 eq	0.00	151.4	308.3	615	1075
TA	kg SO ₂ eq	0.00	7.01	15.03	9.76	31.8
FE	g P eq	0.00	43.8	440.4	106.4	590.5
ME	g N eq	0.00	438.9	1428	564.8	2431
HT	kg 1,4-DB eq	0.00	77.1	706.7	318.1	1102
POF	kg NMVOC	0.01	7.73	15.15	10.9	33.8
PMF	kg PM 10 eq	0.00	54.93	795.5	3429	4279
TET	kg 1,4-DB eq	0.00	0.78	1.27	0.43	2.47
FET	kg 1,4-DB eq	0.00	2.54	21.76	16.74	41.05
MET	kg 1,4-DB eq	0.00	2.34	20.29	16.95	39.57
IR	kBq U235 eq	0.00	61.00	168.1	251.3	480.4
ALO	ha*a	0.00E+00	2.73E-03	8.99E-03	1.39E-03	1.31E-02
ULO	ha*a	1.33E-01	4.98E-04	1.58E-03	6.93E-04	1.36E-01
NLT	ha	1.33E-01	2.96E-05	6.05E-05	1.20E-04	1.34E-01
WD	m ³	0.00	3.90	5.36	3.03	12.29
MD	kg Fe eq	0.00	25.87	317.6	35.68	379.2
FD	kg oil eq	0.00	292.50	689.7	1208	2190

CC= cambio climático; OD= agotamiento de ozono; TA= acidificación terrestre; FE= eutrofización de agua dulce; ME= eutrofización marina; HT= toxicidad humana; POF= formación de oxidantes fotoquímicos; PMF= formación de material particulado; TET= ecotoxicidad terrestre; FET= ecotoxicidad de agua dulce; MET= ecotoxicidad marina; IR= radiación ionizante; ALO= ocupación de suelo agrícola; ULO= ocupación de suelo urbano; NLT= transformación de terreno natural; WD= agotamiento de agua; MD= agotamiento de metales; FD= agotamiento fósil.

ha= hectárea; kg= kilogramo; g= gramo; mg= miligramo; a= año; m³= metro cúbico

Tabla 9: Impactos ambientales por categoría de impacto y subsistemas en el escenario A1. Resultado referido a la unidad funcional: 1km de carretera en 1 año de operación. *Elaboración propia.*

5.2 Análisis de impactos de ciclo de vida: mantenimiento de la carretera

Los impactos ambientales vinculados a esta etapa presentan tendencias similares a las vistas en la etapa de construcción de la carretera. Esto ocurre fundamentalmente porque este es un subsistema con maquinaria y modelos de condiciones de transporte prácticamente idénticas. No obstante, en valores absolutos, los impactos producto del mantenimiento son bastante mayores debido a su periodicidad anual. En ese sentido, el mantenimiento de la carretera en un año de operación implica una emisión neta de 2.33 ton de CO₂eq por UF (127% más que la etapa de construcción) y aproximadamente 0.8 ton PM-10eq en lo que respecta a PMF, 14 veces más que lo observado en la etapa de construcción (ver Tabla 9).

5.3 Análisis de impactos de ciclo de vida: uso de la carretera

Los impactos ambientales del uso de carretera están vinculados exclusivamente al tráfico vehicular a lo largo de la vía. Tal y como se mencionó en el capítulo 4.3, el IMDA es un parámetro que puede condicionar la magnitud de los resultados; por esta razón fueron asumidos distintos escenarios. En primera instancia, se observó que los resultados vinculados a cada escenario varían de manera lineal al IMDA, siempre y cuando los demás criterios y parámetros se mantengan constantes. Además, se analizaron 2 escenarios adicionales con distintos estándares de emisión: EURO 3 y EURO 4. Para el primer caso, este estándar corresponde al *status quo* nacional; y para el segundo, se tomó en cuenta que todos los vehículos que entren al mercado fuesen nuevos. En ambos casos se modeló un vehículo tipo camioneta grande de pasajeros ya que la realidad refleja que ningún vehículo de menor tamaño podría circular la carretera debido a la orografía y la ausencia de puentes.

Se pudo observar que la comparación del escenario A1 con los escenarios antes mencionados presenta diferencias relevantes en términos de formación de oxidantes fotoquímicos (POF) -30%- pero variaciones mínimas en términos de CC -2%- y cambios nulos en términos de PMF.

Finalmente, en lo que refiere al método de modelado de emisiones – Nivel 1, 2 o 3 -, no se han generado escenarios adicionales para evaluar la variabilidad de los resultados. Esto es debido a que se utilizó el Nivel 2 para vehículos comerciales ligeros por su precisión intermedia y porque no se contaba con información adicional. Evidentemente, un modelo con el Nivel 3 aseguraría un nivel de precisión mayor, pero limitaciones en la información disponible impidieron su uso.

5.4 Análisis de impactos de ciclo de vida: sistema completo

En el caso del escenario base A1, el 82% de los impactos relacionados a CC son consecuencia del cambio directo en el uso de suelo -dLUC- debido al desbroce realizado para la construcción de la carretera. Estos impactos están vinculados a la emisión de CO₂ y CH₄ proveniente de la biomasa superficial y subterránea en descomposición, pese a que estos son parcialmente atenuados por la regeneración de la vegetación a lo largo de los cantos de la vía.

En la Figura 18 se puede distinguir la importancia de los dLUC en el CC para cada escenario propuesto por el análisis de sensibilidad. Se puede apreciar como la contribución relativa varía desde 43.1% - escenario C4 – hasta 89.3% - escenario B2 -. Sin embargo, pese a que los distintos escenarios abarcan toda la posible variación en cada parámetro, solo un IMDA muy alto, asumiendo la densidad de carbono más baja, podría significar que el dLUC no sea el mayor generador de emisiones de GEI. De hecho, en 11 de los 17 escenarios, la contribución del dLUC es superior al 75% del impacto total.

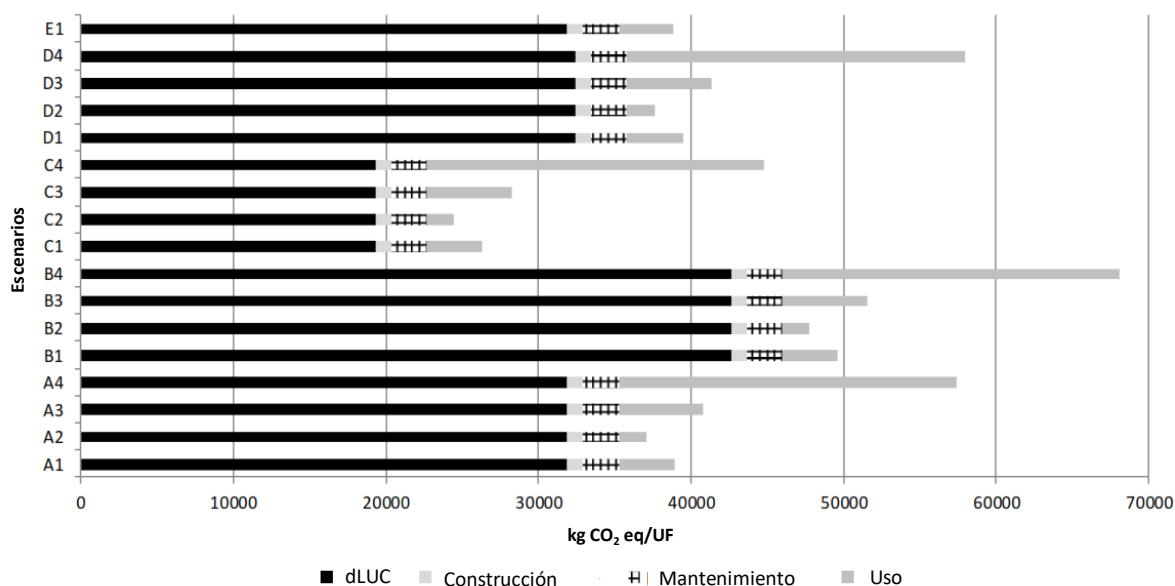
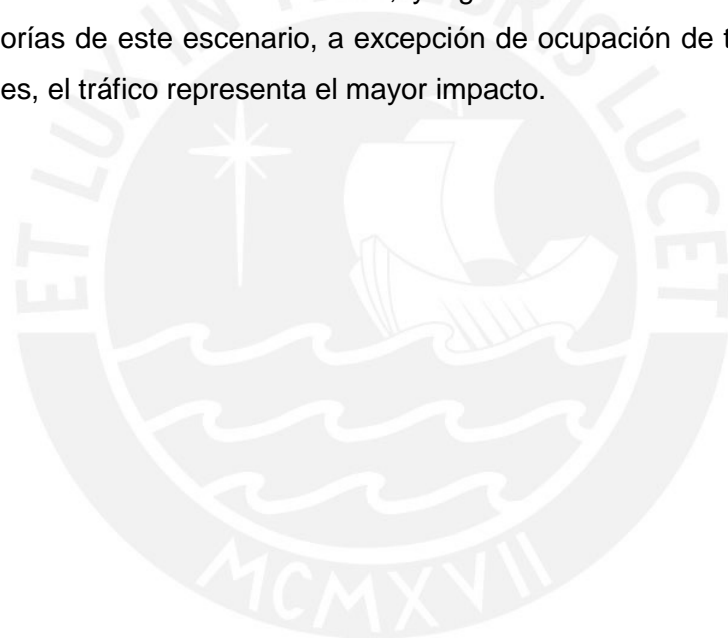


Figura 18: Emisiones de GEI por cada subsistema en escenarios para 1 año de uso. Resultados computados utilizando la metodología IPCC (IPCC, 2013). *Elaboración propia.*

En los subsistemas restantes, para el escenario A1, la etapa de construcción representa el 2.6% del total de emisiones de GEI, mientras que el mantenimiento de la vía alcanza un valor del 6%. Es importante mencionar que los valores absolutos vinculados a estos subprocesos no varían debido a que no fueron sujetos a variaciones en el análisis de sensibilidad. En otras palabras, solo se observan variaciones relativas producto del aumento de las cantidades relacionadas al uso de la carretera y a los dLUC. Finalmente, la contribución del uso de la carretera en al CC depende directamente del IMDA asumido en el modelo de cada escenario. En el escenario A1 - 33 vehículos por día – esta contribución representa el 9.4% - 3600 kg de CO₂eq por UF-, mientras que en

el escenario C4 – 200 vehículos por día – este representa el 49.7% - 224000 kg de CO₂eq por UF -.

Para categorías de impacto distintas al CC, el tráfico vehicular produce los mayores impactos ambientales, sobretodo en términos de PMF - 80.1% -, agotamiento de ozono -57.2% -, agotamiento fósil – 55.2% -, y radiación ionizante -52.3% -, todo esto utilizando el escenario A1 como referencia. Por otro lado, el uso de maquinaria en la construcción y mantenimiento presenta grandes contribuciones en términos de agotamiento de metales, eutrofización marina y de agua dulce, y acidificación terrestre. Comparando estos resultados - A1 – con el resto de escenarios analizados, se encontró que en el escenario C4 el tráfico presenta la mayor contribución relativa en PMF - 96.1% -, agotamiento de ozono - 89% -, y agotamiento fósil - 88.2% -. Para el resto de categorías de este escenario, a excepción de ocupación de territorio y agotamiento de metales, el tráfico representa el mayor impacto.



6. Discusión de resultados

6.1 Comparación de resultados con estudios previos de ACV en carreteras

Pese a que en la literatura se han encontrado numerosos estudios de ACV en carreteras (Lundström, 1998; Mroueh et al., 2000; Stripple, 2001), todos estos estudian pavimentos asfálticos y en ninguno de los casos se evalúan condiciones ambientales similares a las encontradas en los bosques tropicales; todo ello conlleva a que realizar una comparación de resultados sea bastante difícil. Esta dificultad se debe, en primer lugar, a que los parámetros tomados en cuenta para la designación de cada UF son diferentes; segundo, a que se toman distintas etapas en los ciclos de vida de cada proyecto vial; y, finalmente, a que cada estudio plantea metas y enfoques particulares para cada proyecto. A pesar de la existencia de estas dificultades, los resultados obtenidos en estudios anteriores permitieron realizar una somera comparación en lo que respecta a emisiones de GEI. Por un lado, se consideró un modelo de carretera de asfalto construida en Suecia (Stripple, 2001); y por el otro, una carretera con superficie de material granular en Finlandia (Mroueh et al., 2010). La comparación se limitó a evaluar el CC en cada modelo debido a que esta categoría de impacto es la más estudiada en las investigaciones encontradas en la literatura, además de ser más sencillo de replicar. Los dos estudios seleccionados (ver Tabla 10) utilizan UF similares y los resultados fueron escalados para ser similares en orden de magnitud a la UF utilizada en la carretera Boca Manu. Adicionalmente, se generó un escenario en el que el tiempo de vida la carretera Boca Manu es 50 años, esto a fin de tener tiempos de vida similares al momento de la comparación.

Para un tiempo de vida de 15 años, a diferencia de los estudios mostrados en la Tabla 10, la construcción y el mantenimiento de la carretera Boca Manu, incluyendo los dLUC, representan casi el 90% del total de emisiones netas de GEI, mientras que en los otros dos estudios alrededor del 89% del total de emisiones se atribuye al uso de la carretera. Estos resultados resaltan la influencia que tienen las condiciones locales de cada proyecto en las emisiones totales netas de GEI. Dicho de otro modo, el nivel tecnológico de la carretera no figura como un factor determinante en el impacto ambiental del proyecto vial. Por el contrario, es el cambio en el uso del suelo el factor

que predomina frente al resto de etapas del ciclo de vida de la carretera. Para un tiempo de vida de 50 años, las emisiones correspondientes a la construcción y el mantenimiento se reducen en un 30% con respecto al escenario A1. Esto tiene sentido debido a que la asignación anual realizada es lineal, por esta razón el aporte de estas etapas también se reduce a un 74%, estando, sin embargo, aún muy por encima que la contribución del tráfico al total de emisiones.

En la Tabla 10 se refleja una tendencia contrapuesta de la carretera Boca Manu frente a las demás mencionadas. Esto es debido a que las dos carreteras europeas se emplazan en zonas con climas templados, ambas están diseñadas para soportar grandes volúmenes de tráfico, las dos cuentan con un uso de materiales de construcción mayor, y finalmente, su impacto en términos de cambio de uso de suelo es bajo debido a que estas zonas ya atravesaron por un proceso de urbanización y planeamiento a lo largo de los años. Por otro lado, la carretera Boca Manu se emplaza en una zona tropical con abundante *stock* de carbono, se ha diseñado para bajos niveles de tráfico, cuenta con un nivel tecnológico básico, y tiene un impacto dramáticamente significativo en el cambio de uso de suelos.

A largo del desarrollo de esta investigación se identificó que gran parte de los inventarios de ciclo de vida encontrados en las bases de datos utilizan carreteras asfaltadas estándar como parte de los subprocesos vinculados a la mayoría de actividades. Por ejemplo, en el caso de ecoinvent® v3, el único proceso existente de “construcción de carretera” hace referencia a una carretera estándar en la que los parámetros de entrada, ya sean asfalto, acero, concreto o procesos de extracción de agregados, son modelados a partir de aproximaciones (ecoinvent®, 2016). Aunque este proceso es útil como referencia para carreteras en gran parte del sistema vial europeo y Norte Americano, no representa una aproximación cercana a la realidad peruana y de muchos otros países del resto del planeta, especialmente en zonas tropicales. En efecto, en el Perú, alrededor del 86.7% de las vías de comunicación no están asfaltadas (CIA, 2016). Por ello, los inventarios encontrados en las bases de datos distan bastante de las condiciones reales de la infraestructura vial peruana.

Los resultados obtenidos resaltan la importancia del estudio de carreteras sin asfaltar en los trópicos, un sector de la infraestructura que ha sido pasado por alto hasta la fecha. No obstante, otros tipos de carreteras sin asfaltar se deben analizar en distintos emplazamientos, con el fin de identificar si las cargas ambientales encontradas en esta

investigación son también relevantes en otros contextos. Por ejemplo, es razonable asumir que las emisiones de GEI serán bajas en zonas con poco *stock* de carbono -e.j. las zonas alto andinas y costeras- o en aquellas donde no sea necesario realizar un desbroce intensivo. Sin embargo, otros impactos, como el PMF, podrían amplificarse si se toman en consideración mayores IMDA o bajos niveles de humedad relativa.

Emisiones de CO₂eq (t) por año de operación para 1 kilómetro de carretera

Autor	Etapas	Emisiones de CO ₂ eq	Porcentaje del total
Stripple ^{1,2}	Construcción y mantenimiento	4.93E+01	10.40%
	Tráfico	4.23E+02	89.60%
Mroueh ³	Construcción y mantenimiento	7.60E+00	1.20%
	Tráfico	6.30E+02	98.80%
Carretera Boca Manu ⁴	Construcción y mantenimiento	3.53E+01	89.90%
	Tráfico	3.65E+00	10.10%
Carretera Boca Manu ⁵	Construcción y mantenimiento	1.06E+01	74.37%
	Tráfico	3.65E+00	25.63%

¹ 13m de ancho de vía, periodo de 50 años, 5000 IMDA, etapa de operación excluida
² Emisiones de CO₂eq modeladas utilizando 0.1 litros de gasolina/km y 3.18 Kg de CO₂ por Kg de gasolina, factores de emisión obtenidos de EMEP/EEA (2013)
³ 17m de ancho de vía, periodo de 50 años, 7000 IMDA
⁴ 5m de ancho de vía, periodo de 15 años, 33 IMDA
⁵ 5m de ancho de vía, periodo de 50 años, 33 IMDA

Tabla 10: Comparación de los impactos ambientales resultantes con otros dos estudios encontrados en la literatura. Los resultados reportados se limitan a la categoría de cambio climático.

6.2 Utilidad de la aplicación de Análisis de Ciclo de Vida en la carretera Boca Manu

Es probable que los aspectos que más llamen la atención sean los impactos vinculados al cambio climático que genera el sistema estudiado, debido al continuo debate que se viene realizando respecto a la responsabilidad de Perú frente a la

mitigación de este impacto ambiental de escala planetaria (MINAM, 2015). De acuerdo a las predicciones que indican que el 90% de los 25 millones de kilómetros de nuevas carreteras proyectadas se construirán en países en desarrollo (Dulac, 2013; Laurance et al., 2014), se puede asumir que la mayor parte de la red vial tendrá desafíos importantes en términos de planeamiento y gestión. Esto es debido a que este proceso involucra la remoción de grandes cantidades de carbono superficial y subterráneo a lo largo bosques tropicales, lo cual puede ocasionar problemas de magnitudes globales (Laurance et al., 2015).

Más allá de la liberación de carbono y el CC, las demás categorías deberían también ser analizadas en profundidad con el objetivo de determinar sus impactos a nivel local y regional. Por ejemplo, en el caso del PMF, los resultados muestran que más del 95% de las emisiones son generadas por el tráfico a lo largo de la carretera, lo cual representa una amenaza para la salud de las comunidades indígenas que se ubican en las inmediaciones de la vía.

Respecto a la extracción de material granular, esta actividad y sus impactos no fueron calculados ni sometidos a ningún modelamiento. La lógica de esta decisión recae en el hecho de que este material es extraído del banco del río a una tasa que, consideramos, es insignificante respecto a la tasa de reposición natural del río. Esto garantiza que el material será repuesto, siempre y cuando la extracción no se incremente exponencialmente (Eddy y Gergel, 2015). El crecimiento estacional del caudal del río es también un factor importante en el paisaje de la zona, esto implica que cualquier actividad inducida por alguna actividad humana en la zona de inundación desaparecerá después de la temporada de lluvias.

No obstante, independientemente de la rigurosidad de esta investigación que considera 18 distintas categorías de impacto, existe una serie de impactos potenciales no cuantificables que pueden derivar de la construcción de la carretera Boca Manu. Los efectos de borde a corto y largo plazo, incluyendo la desecación de los árboles adyacentes a la vía, los efectos ecofisiológicos (Beebee, 2013), la extracción de fauna cercana a la carretera y la separación forzada de poblaciones silvestres (Suárez et al., 2013), y la perturbación del flujo genético de las especies (Bonaudo et al., 2005) son solo algunos ejemplos de los impactos ambientales que son inevitablemente generados a partir de la construcción de carreteras en bosques tropicales (Goosem, 2002). Sin embargo, todos los impactos mencionados no pueden ser cuantificados mediante las

herramientas con perspectiva de ciclo de vida desarrolladas hasta el momento (Reap et al., 2008a; 2008b).

La falta de métodos para analizar los efectos mencionados en el párrafo anterior justifica la decisión de limitar la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida a las categorías de punto medio (*midpoint*, en su nomenclatura en inglés). De esta manera, se excluyeron los resultados que se obtienen mediante el cálculo de los indicadores de punto final (*endpoint*), fundamentalmente debido a que son poco representativos y presentan un alto grado de incertidumbre (Weidema, 2015). En efecto, esta observación guarda coherencia con lo identificado por Hauschild et al. (2013), que señalan que muy pocos modelos de caracterización de punto final han sido lo suficientemente desarrollados como para ser de utilidad para los tomadores de decisiones. Asimismo, algunos indicadores de punto medio presentan deficiencias metodológicas en lo que respecta a la adaptación geográfica que se pretenda dar. Este es el caso de la formación de ozono, la eutrofización, y, de mayor importancia por haber sido discutido a fondo en esta investigación, la PMF. Pese a esto, se suele mencionar que la heterogeneidad del continente europeo implica que aquellos métodos de análisis elaborados en base a datos europeos - e.j. ReCiPe – pueden ser bastante representativos para otros continentes también heterogéneos, como el americano (EC-JRC, 2011).

Finalmente, se recomienda la inclusión en el EIA de al menos algunos indicadores con perspectiva de ciclo de vida debido a que podrían ser un complemento valioso para los EIA en carreteras ubicadas en áreas con ecosistemas sensibles, como ocurre especialmente en los trópicos. Aunque la integración del ACV dentro de un sistema de EIA puede ser complejo y costoso, el método seguido en esta investigación puede formar parte de un grupo de herramientas que ayuden a los tomadores de decisiones que estén involucrados en el planeamiento, evaluación y construcción de proyectos viales. Todo ello con el fin último de determinar si un determinado proyecto debería ser o no implementado (Laurance et al., 2014).

7. Conclusiones

De acuerdo a la revisión de la literatura, esta investigación representa la primera aplicación de ACV para analizar la construcción, mantenimiento y operación de una carretera sin asfaltar en un bosque tropical. Los resultados representan una línea base de los impactos vinculados al ciclo de vida de un proyecto de infraestructura vial en una zona ecológicamente sensible en un bosque tropical. Esta información puede ser utilizada en futuros proyectos ubicados en zonas de características similares.

La extracción de materiales y el mantenimiento de la carretera estudiada tienen un bajo impacto ambiental en comparación con cualquier otra carretera estudiada previamente en la literatura. Sin embargo, los impactos derivados de la construcción en términos de CC y PMF son altos debido a la deforestación y a la emisión de polvo, respectivamente. De hecho, un descubrimiento interesante revela que las carreteras sin asfaltar construidas en la selva presentan un comportamiento completamente diferente que aquellas que se encontraron en la literatura. Por ejemplo, de acuerdo a Muench (2010), en carreteras asfaltadas convencionales el mayor consumo de energía corresponde al tráfico y, consecuentemente, es también esta etapa la que genera la mayor cantidad de GEI. Sin embargo, aunque el tráfico sigue teniendo el mayor consumo energético, en las carreteras de la Amazonía, la mayor cantidad de emisiones de GEI corresponden al desbroce de bosque de la etapa de construcción y no al tráfico, como se suele esperar.

Las carreteras sin asfaltar representan la gran parte de la red vial mundial, en especial en países en vías de desarrollo debido a que son parte primordial del transporte de materias primas. Además, se espera que la infraestructura vial se expanda de forma explosiva en las décadas venideras (Laurance et al., 2014). En ese sentido, los estudios de ACV pueden mejorar los modelos de carreteras en lo que respecta a los inventarios de ciclo de vida, diseño geométrico y selección de materiales, especialmente en zonas tropicales. De hecho, la metodología presentada en esta investigación puede ser replicada en futuros de ACV.

Existen una serie de impactos que no fueron analizados en profundidad a lo largo de este documento y son todos aquellos generados como consecuencia de los cambios indirectos en el uso de suelo - iLUC en inglés – y las actividades humanas. Se puede pronosticar, a priori, que las amenazas antrópicas se incrementarán en poco tiempo,

inducidas sobre todo por la nueva accesibilidad a estas zonas remotas. Muchas de estas amenazas pueden ocasionar efectos irreversibles en el medio ambiente. Prueba de ello son los recientes derrames de petróleo en Loreto, el incremento dramático de la minería ilegal en Madre de Dios y la deforestación de la Amazonía en diferentes zonas del Perú, pero también en Brasil, Ecuador o Colombia (The Guardian, 2016). De hecho, el 75% de la degradación y/o deforestación de bosques peruanos se ha presentado en los 20 kilómetros adyacentes a carreteras ya construidas. Sin embargo, de acuerdo al mismo autor, la creación de áreas protegidas en las últimas décadas, así como la inherente inaccesibilidad de la Amazonía, han servido de barrera para que esta deforestación y degradación no se expanda con la virulencia de otras zonas selváticas del planeta (Oliveira et al., 2007).

Finalmente, se recomienda realizar estudios que monitoreen las consecuencias y las dinámicas ambientales, sobre todo en términos de pérdida de biodiversidad y emisiones de GEI, que los iLUC pueden generar en estas zonas. (Foley et al., 2005; Vázquez-Rowe et al., 2013). La hipótesis que el autor de esta tesis propone respecto a los iLUC sostiene que los impactos vinculados a los efectos consecuenciales de la carretera superarán enormemente a los efectos directos encontrados en esta investigación. Por ello, es necesario implementar sistemas de control en la zona de estudio a fin de que los efectos de las actividades que la carretera incentiva sean mitigados o disminuidos la medida de lo posible.

Referencias

Aguilar-Amuchastegui, N., Riveros, J.C., Forrest, J.L. (2014). Identifying areas of deforestation risk for REDD+ using a species modeling tool. *Carbon Balance Manage.* 9(1), 1-10.

Asner, G.P., Knapp, D.E., Martin, R.E., Tupayachi, R., Anderson, C.B., Mascaro, J., Sinca, F., Chadwick, D., Sousan, S., Higgins, M., Farfan, W., Silman, M.R., Llactayo León, W.A., Neyra Palomino, A.F. (2014) *The High-Resolution Carbon Geography of Perú A Collaborative Report of the Carnegie Airborne Observatory and the Ministry of Environment of Perú.* ISBN: 978-0-9913870-7-6.

Asner, G.P., Rudel, T.K., Aide, T.M., Defries, R., Emerson, R. (2009) A contemporary assessment of change in humid tropical forests. *Conser. Biol.* 23, 1386–1395.

Avadí, A., Pelletier, N., Aubin, J., Ralite, S., Núñez, J., & Fréon, P. (2015). Comparative environmental performance of artisanal and commercial feed use in Peruvian freshwater aquaculture. *Aquaculture*, 435, 52-66.

Azari-Jafari, H., Yahia, A. and Amor, M.B. (2016) Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *J. Clean. Prod.* 112, 2187-2197.

Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W., & De Haes, H. A. U. (2000). Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326.

Bartl, K., Gómez, C. A., & Nemecek, T. (2011). Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. *Journal of Cleaner Production*, 19(13), 1494-1505.

Bartl, K., Verones, F., & Hellweg, S. (2012). Life cycle assessment based evaluation of regional impacts from agricultural production at the Peruvian coast. *Environmental science & technology*, 46(18), 9872-9880.

Beebee, T.J.C. (2013) Effects of Road Mortality and Mitigation Measures on Amphibian Populations. *Conser. Biol.* 27, 657–668.

Bonaudo, T., Le Pendou, Y., Faure, J.F. Quanz, D. (2005). The effects of deforestation on wildlife along the transamazon highway. *Eur. J. Wildl. Res.* 51, 199–206

Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M. U., Weidema, B. P., Cowie, A. L., Jørgensen, S. V., ... & Chomkham Sri, K. (2013). Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 230-240.

Butt, A.A., Toller, S., Birgisson, B. (2015) Life cycle assessment for the green procurement of roads: a way forward. *J. Clean. Prod.* 90, 163-170.

Cáceres, A. L. (2016). Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Carlson, A. (2011) Life Cycle Assessment of Roads and Pavements. VTI Rapport 736A. Print.

Catenazzi, A., Lehr, E., von May, R. (2013) The amphibians and reptiles of Manu National Park and its buffer zone, Amazon basin and eastern slopes of the Andes, Peru. *Biota Neotropica* 13, 269-283.

CIA (2016) Available from: <https://www.cia.gov/library/publications/the-worldfactbook/fields/2085.html>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Cornejo, F., Janssen, M. J. M., Gaudreault, C., Samson, R., & Stuart, P. R. (2005). Using Life Cycle Assessment (LCA) As a Tool to Enhance Environmental Impact Assessments (EIA). In 8th Conference on Process Integration Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction-PRES (Vol. 5, pp. 521-528).

Delgado, C.I. (2008) Is the Interoceanic Highway exporting deforestation? Tesis de maestría, Duke University.

Dulac, J. (2013) Global Land Transport Infrastructure Requirements, Estimating road and railway infrastructure capacity and costs to 2050. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

EC-JRC (2012) The International Reference Life Cycle Data System (ILCD). Handbook. European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN: 978-92-7921640-4.

ecoinvent (2016) Ecoinvent v3 database. ecoinvent Centre. Retrieved from: <http://www.ecoinvent.org/>. [Último acceso: 14 de abril de 2016]

Eddy, I.M., Gergel, S.E. (2015) Why landscape ecologists should contribute to life cycle sustainability approaches. *Landscape Ecol.* 30(2), 215-228.

El Comercio (2015) Turistas que iban al Manu son secuestrados por manifestantes. Extraído de: from http://elcomercio.pe/peru/madre-de-dios/turistas-que-iban-al-manu-secuestrados-manifestantes-noticia-1843458?ref=nota_peru&ft=mod_leatambien&e=titulo [Último acceso: 14 de abril de 2016]

EMEP-Corinair (2014) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013 update Sept 2014
ERF (2015) Yearbook 2014-2015. European Union Road Federation. Disponible en: <http://www.irfnet.eu/images/Statistics/BAT-AD-Stats-2015Inside-ERF.pdf> [Último acceso: 14 de abril de 2016].

EPA US (2006) AP-42, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Section 13.2.2 Unpaved Roads

Fearnside, P.M. (2000) Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change*, 46(1-2), 115-158.

Fearnside, P.M. (1996) Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecol. Manag.* 80(1), 21-34.

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., ... Helkowski, J. H. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.

Godar, J., Tizado, E. J., Pokorny, B. (2012) Who is responsible for deforestation in the Amazon? A spatially explicit analysis along the Transamazon Highway in Brazil. *Forest Ecol. Manag.* 267, 58-73.

García-Torres, S. S. S. (2014). Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Godar, J., Tizado, E. J., & Pokorny, B. (2012). Who is responsible for deforestation in the Amazon? A spatially explicit analysis along the Transamazon Highway in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 267, 58-73.

Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A.;Struijs J., Van Zelm R, (2013). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation, Extraído de: <http://www.lcia-recipe.net> [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Goosem, M. (2002). Effects of tropical rainforest roads on small mammals: fragmentation, edge effects and traffic disturbance. *Wildl. Res.* 29, 277–289.

GOREMAD (2015). Plan de Desarrollo Regional Concertado de Madre de Dios 2014 – 2021. Reporte.

Guinée, J. B. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment*. New York: Kluwer Academic Publishers.

Hakkinen, T., Mäkelä, K. (1996) Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements, in Environmental Adaption of Concrete. Technical Research Center of Finland. Research Notes 1752.

Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., ... & Sala, S. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18(3), 683-697.

Houghton, R.A., Skole, D.L., Nobre, C.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T., Chomentowski, W.H. (2000) Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Science*, 403, 301-304.

Houghton, R. A., & Hackler, J. L. (1999). Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology*, 5(4), 481-492.

Huang, Y., Bird, R., Heidrich, O. (2009a) Development of a Life Cycle Assessment Tool for Construction and Maintenance of Asphalt Pavements. *J. Clean. Prod.* 17, 283-296.

Huang, Y., Bird, R., Bell., M. (2009b) A Comparative Study of the Emissions by Road Maintenance Works and the Disrupted Traffic Using Life Cycle Assessment and MicroSimulation. *Transport Res. D-TR*, 14, 197-204. IPCC (2013) *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

INEI (2005) *Estimaciones Departamentales de la Población 1995-2015* Web. 11 Apr. 2015. Extraído de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0015/cap-51.htm [Último acceso: 14 de abril de 2016].

ISO (2004), ISO 14004 Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso. International Standards Organization.

ISO (2006a) ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Standards Organization.

ISO (2006b) ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment requirements and management. International Standards Organization.

Finkbeiner, M., Saur, K., Eyerer, P., Matsuno, Y., & Inaba, A. (1999). Analysis of the Potential for a Comprehensive Approach Towards LCA and EMS in Japan. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(3), 127-132.

Florent, Q., Enrico, B. (2015) Combining Agent-Based Modeling and Life Cycle Assessment for the Evaluation of Mobility Policies. *Environ. Sci. Technol.* 49(3), 17441751.

Kunert, N., Aparecido, L.M.T., Higuchi, N., dos Santos, J., Trumbore, S. (2015) Higher tree transpiration due to road-associated edge effects in a tropical moist lowland forest. *Agr. Forest Meteorol.* 213, 183-192.

Laurance, W.F., Goosem, M., Laurance, S.G.W. (2009) Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecol. Evol.* 24(12), 659-669.

Laurance, W.F., Venter, O., Gopalasamy, R.C., Sloan, S., Edwards, D.P., Phalan, B., Balmford, A., O'Connell, C.S., van der Ree, R., Burgués Arrea, I., Mueller, N.D., Goosem, M. (2011) A global strategy for road building. *Nature*, 513, 229-232.

Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O'Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M., ... Van Der Ree, R. (2014) A global strategy for road building. *Nature*, 513(7517), 229-232.

Laurance, W.F., Peletier-Jellema, A., Geenen, B., Koster, H., Verweij, P., Van Dijck, P., ...Van Kuijk, M. (2015) Reducing the global environmental impacts of rapid infrastructure expansion. *Curr. Biol.* 25(7), R259-R262.

Lewandowska, A. (2011). Environmental life cycle assessment as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS) part 1: Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment Int J Life Cycle Assess*, 178-186.

Lewandowska, A., Kurczewski, P., Kulczycka, J., Joachimiak, K., Matuszak-Flejszman, A., Baumann, H., & Ciroth, A. (2013). LCA as an element in environmental management systems—comparison of conditions in selected organisations in Poland, Sweden and Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(2), 472-480.

Martius, C., Wassmann, R., Thein, U., Bandeira, A. G., Rennenberg, H., Junk, W., Seiler, W. (1993) Methane Emission from Wood-Feeding Termites in Amazonia. *Chemosphere* 26, 623–632.

Martius, C., Fearnside, P. M., Bandeira, A. G., Wassmann, R. (1996) Deforestation and Methane. Release from Termites in Amazonia. *Chemosphere* 33, 517–536.

MEF (2008) Peruvian Ministerio de Economía y Finanzas. Ficha de Registro: Banco de Proyectos SNIP. Extraído de: <http://ofi4.mef.gob.pe/bp/ConsultarPIP/frmConsultarPIP.asp?accion=consultar&txtCodigo=51558>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

MINAM (2005) Ley General del Ambiente. Ministerio del Ambiente. Documento Oficial.

MINAM (2011) Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental y su Reglamento. Ministerio del Ambiente. Documento Oficial.

MINAM (2015) Contribución prevista y determinada a nivel nacional (INDC) de la República del Perú. Ministerio del Ambiente. Retrived from:

<http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/09/ESPA%C3%91OL.pdf>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

MINAM (2016a) ¿Por qué no debe aprobarse el predictamen de insistencia de la ley sobre la carretera de Madre de Dios, tramo Nuevo Edén - Boca Manu - Boca Colorado? Ministerio del Ambiente. Extraído de: <http://www.minam.gob.pe/wpcontent/uploads/2016/02/Dossier-Carretera-BocaManu.pdf>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

MINAM (2016b) Buena noticia: Comisión de Transportes del Congreso archivó proyecto de ley que promovía carretera que afectaba el Manu. Ministerio del Ambiente. Extraído de: <http://www.minam.gob.pe/perunatural/2016/06/14/buena-noticia-comision-de-transportes-del-congreso-archivo-proyecto-de-ley-que-promovia-carretera-que-afectaba-el-manu/> [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Mokany, K., Raison, R.J., Prokushkin AS (2006) Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob. Change Biol.* 12, 84–96.

Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M., Ruotoistenmäki, A. (2000) Life Cycle Assessment of Road Construction. Finnish National Road Administration. Finnra Reports 17/2000.

MTC (2008) Manual para diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

MTC (2014). D.S 036-2011-MTC Mapa Vial Madre de Dios.

Muench, S. (2010) Roadway Construction Sustainability Impacts: Review of Life-Cycle Assessments. *Transp. Res. Record: J. Trans. Res. Board* 2151, 36-45.

Naughton-Treves, L., Grossberg, R., Treves, A. (2003a) Paying for tolerance: rural citizens' attitudes toward wolf depredation and compensation. *Conserv. Biol.* 17(6), 1500-1511.

Naughton-Treves, L., Mena, J.L., Treves, A., Alvarez, N., Radeloff, V.C. (2003b) Wildlife Survival Beyond Park Boundaries: The Impact of Slash-and-Burn Agriculture and Hunting on Mammals in Tambopata, Peru. *Conserv. Biol.* 17(4), 1106-1117.

Oliveira, P. J., Asner, G. P., Knapp, D. E., Almeyda, A., Galván-Gildemeister, R., Keene, S., ... & Smith, R. C. (2007) Land-use allocation protects the Peruvian Amazon. *Science*, 317(5842), 1233-1236.

Paredes, O (2012) De Antis de los Inkas, a bosques ignotos y hechizados de aventureros e invasores. *La Amazonía Sur-Oriental del Perú a través de los misioneros y viajeros. Amazonía viajeros, turistas y poblaciones indígenas.* 49-89

Park, K., Hwang, Y., Seo, S., Seo, H. (2003) Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *J. Constr. Eng. Manag.* 129(1), 25-31. PetroPerú (2016a) Especificaciones técnicas Diésel B5. Extraído de: <http://www.petroperu.com.pe/portalweb/archivos/DIESELB5-2014.pdf>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

PetroPerú (2016b) Especificaciones técnicas Gasolina Sin Plomo G90. Extraído de: <http://www.petroperu.com.pe/portalweb/archivos/GasolinaPetroperuG90-2014.pdf>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Quispe, I., Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Arena, A.P., Suppen, N. (2016) Preface: Life Cycle Assessment: A tool for innovation in Latin America. *Int. J. Life Cycle Assess.* doi=10.1007/s11367-016-1178-6.

Querini, F., Benetto, E. (2015) Combining Agent-Based Modeling and Life Cycle Assessment for the Evaluation of Mobility Policies. *Environ. Sci. Technol.* 49(3), 17441751.

Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B. (2008a) A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 290–300.

Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B. (2008b) A survey of unresolved problems in lifecycle assessment. Part 2: impact assessment and interpretation. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 374-388.

Reid, L.M., Ziemer, R.R., Furniss, M.J. (1994) What do we need to know about roads? Workshop at Humboldt Interagency Watershed Analysis Center in McKinleyville. 1 de junio de 1994.

Reyna, E., 1942. Fitzcarrald, el rey del caucho: (contribución peruana al centenario del descubrimiento del Río Amazonas por españoles – Año Amazónico). Lima: Taller gráfico de P Barrantes.

RPCV (2015). Red Peruana de Ciclo de Vida. Pontificia Universidad Católica del Perú. Extraído de: <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/index.php/es/que-hacemos/consultoria.html> [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A. (2011) Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *P. Natl. A. Sci.* 108(24), 9899–9904.

Sánchez, L., & Hacking, T. (2012). An approach to linking environmental impact assessment and environmental management systems. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 25-38.

Sangle, S. & Nema, A. (2001). Maximizing the Benefits of Maximizing the Benefits of Environmental Management Systems through Life Cycle Assessment [Presentación]. Extraído de: lccenter.org/lca-lcm/pdf/lca-ems.pdf [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Santero, N. (2010) Life cycle assessment of pavements: A critical review of existing literature and research. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Scullion, J.J., Vogt, K.A., Sienkiewicz, A., Gmur, S.J., y Trujillo, C. (2014). Assessing the Influence of Land-cover Change and Conflicting Land-use Authorizations on Ecosystem Conversion on the Forest Frontier of Madre De Dios, Peru. *Biological Conservation*, 247-258.

SERNANP (2013). Parque Nacional del Manu: Plan Maestro, periodo 2013 – 2018. *Ministerio de Agricultura.*

SERNANP (2014). Sobre El Parque Nacional Del Manu." *Ministerio Del Ambiente*.
Extraído de: <http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/sernanp-sobre-el-parque-nacional-del-manu> [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Shepard, G.H., Rummenhoeller, K., Ohl-Schacherer, Yu, D.W. (2010) Trouble in Paradise: indigenous populations, anthropological policies, and biodiversity conservation in Manu National Park, Peru. *J. Sustain. Forestry* 29, 252-301.

Stripple, H. (2001) Life Cycle Assessment of Road. A pilot study for inventory analysis. Swedish Environmental Research Institute (IVL). Second revised edition; Gothenburg, Sweden.

Suárez, E., Zapata-Rios, G., Utreras, V., Strindberg, S., Vargas, J. (2013) Controlling access to oil roads protects forest cover, but not wildlife communities: a case study from the rainforest of Yasuní Biosphere Reserve (Ecuador). *Anim. Conserv.* 16(3), 265-274.

Tähkämö, L., Halonen, L. (2015) Life cycle assessment of road lighting luminaires e Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. *J. Clean. Prod.* 93, 234-242.

The Guardian (2016) Damaged Peru pipeline leaks 3,000 barrels of oil into Amazon region. *The Guardian*, 23 de febrero de 2016. Disponible en:

<http://www.theguardian.com/world/2016/feb/23/damaged-peru-pipeline-leaks-3000barrels-of-oil-into-amazon-region>. [Último acceso: 14 de abril de 2016].

Treloar, G.J., Love, P.E., Crawford, R.H. (2004) Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *J. Constr. Eng. M. ASCE* 130(1), 43-49.

Tillman, A.M., Ekvall, T., Baumann, H., Rydberg, T. (1994). Choice of system boundaries in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2, 21-29.

Tillman, A.M. (2000). Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 113-123.

Van der Werf GR, Morton DC, DeFries RS, Olivier JGJ, Kasibhatla PS, Jackson RB, Collatz GJ, Randerson JT. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nat Geosci*, 2:737–738.

Vázquez-Rowe, I., Marvuglia, A., Rege, S., Benetto, E. (2014) Applying consequential LCA to support energy policy: Land use change effects of bioenergy production. *Sci. Total Environ.* 472, 78-89.

Vázquez-Rowe, I., Reyna, J., García-Torres, S., Kahhat, R. (2015) Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? *Appl. Energy* 159, 108-116.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Quispe, I., & Bentín, M. (2016a). Environmental profile of green asparagus production in a hyper-arid zone in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2505-2517.

Vázquez-Rowe, I., Cáceres, AL., Torres-García, JR., Quispe, I., Kahhat, Ramzy (2016b). Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *Journal of Cleaner Production*

Vector Open Stock (2016) Disponible en:
<https://www.vectoropenstock.com/vectors/preview/4412/vector-jungle-tree> [Último
acceso: 14 de abril de 2016]

Weidema, B.P. (2015) Comparing Three Life Cycle Impact Assessment Methods from an
Endpoint Perspective. J. Ind. Ecol. 19, 20-26.

