

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LA CARRETERA
TINGO – KUÉLAP (AM-111) Y EL SISTEMA DE TELECABINAS HACIA LA
ZONA ARQUEOLÓGICA MONUMENTAL KUÉLAP**

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

Karen Pilar Biberos Bendezú

ASESOR: Ian Vázquez Rowe, PhD

Lima, diciembre de 2018

A mis padres, Marcia y Edwin.



Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Dirección de Gestión de la Investigación (DGI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por financiar el proyecto. Asimismo, al Ing. Julio Yépez García, gerente de Telecabinas Kuélap por la información brindada. De igual modo, a todas las personas que apoyaron directa o indirectamente en la realización de esta investigación.

De manera especial, quiero agradecer a mi asesor, Ian Vázquez Rowe, por su valiosa orientación, apoyo y tiempo para tornar este proyecto realidad y por confiar en mí a lo largo de estos dos años.

A la PUCP, a los profesores que contribuyeron con mi formación y al Ing. José Reyes Ñique por sus recomendaciones en el desarrollo de esta tesis.

A las Misiones Universitarias y al Grupo Civilízate por enseñarme que hay una tarea pendiente más allá de las aulas.

A mis amigos, por no dudar en extender una mano para apoyarme y alentarme a seguir adelante.

A mi familia, a mis padres, Marcia y Edwin, por ser mis pilares de vida y por su inmenso esfuerzo y motivación. A ellos debo mis logros e infinita gratitud. A mi tío Eduardo, por apoyarme en la aventura de asumir nuevos retos. A mi tía Dina, por animarme a seguir mis sueños. Y por supuesto, a mi hermana, Cinthia, por su apoyo y consejos de siempre.

Finalmente, mi mayor agradecimiento a Dios por permitirme culminar este proyecto.

RESUMEN

El turismo —transporte, alimentación y alojamiento—, representa el 8% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y se prevé que dicha cifra se duplique al 2025. Al mismo tiempo, el sector sufrirá las consecuencias del cambio climático dependiendo de la ubicación de los destinos. Particularmente, el Perú es altamente vulnerable a dicho fenómeno y el turismo representa parte importante de su economía —cerca del 4% del Producto Bruto Interno (PBI)—. Para enfrentar el cambio climático, el país se ha comprometido a una reducción de sus emisiones para 2030 en el Acuerdo de París. En tal sentido, se espera que el transporte relacionado al turismo pueda contribuir en el logro de dichos objetivos.

En este contexto, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida Comparativo para contrastar los impactos ambientales de dos alternativas de infraestructuras de transporte que permiten el acceso al Complejo Arqueológico de Kuélap. La primera de ellas es la carretera Tingo-Kuélap, vía a nivel de afirmado de 33 km y la segunda, el Sistema de Telecabinas Kuélap (ST) de 4 km, que incluye un viaje de 3 km en carretera afirmada. Se evaluaron las etapas de construcción, operación y mantenimiento de ambos sistemas. Asimismo, se analizaron siete categorías de impacto utilizando los métodos de evaluación ReCiPe 2016 e IPCC 2013.

Los resultados, reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta, mostraron que el Sistema de Telecabinas es la opción más adecuada para reducir los impactos ambientales en comparación con la carretera afirmada. Por ejemplo, las emisiones de GEI para el ST fueron un orden de magnitud menores (2.0 kg CO₂ eq) que para la carretera (17.0 kg CO₂ eq). Resultados similares se obtuvieron para la formación de material particulado y otras categorías de impacto relacionadas con la calidad del aire. Curiosamente, sin embargo, más del 50% del impacto en todas las categorías es el resultado de la fase de uso del tramo corto de carretera en el ST. En el caso de la carretera de 33 km, el mayor impacto fue atribuible a la fase de uso, en particular a las emisiones de escape de los vehículos y el material de re-suspensión de la superficie de la carretera.

Se concluye que factores como el uso de energía eléctrica y una matriz eléctrica local baja en carbono llevaron al ST a generar sustancialmente menos impactos que los generados por el tráfico vehicular en la carretera Tingo-Kuélap. Asimismo, se demostró que es posible reducir el impacto ambiental en la fase de operación del ST en un 48% mediante el uso de buses eléctricos a lo largo de la carretera de 3 km.

Finalmente, los resultados obtenidos pueden ser aplicados para propiciar mejoras en la ejecución y operación de teleféricos tanto turísticos como urbanos que el Estado ha proyectado ejecutar en un futuro próximo.



SUMMARY

Tourism - transportation, food and accommodation - represents 8% of global greenhouse gas emissions (GHG) and it is expected that this figure will double by 2025. At the same time, the sector will suffer the consequences of climate change depending on of the location of the destinations. In particular, Peru is highly vulnerable to this phenomenon and tourism represents an important part of its economy—about 4% of the Gross Domestic Product (GDP). In order to face climate change, the country has committed to a reduction of its emissions by 2030 in the Paris Agreement. In this regard, it is expected that transport related to tourism could contribute to the achievement of these objectives.

In this context, a Comparative Life Cycle Analysis was carried out to compare the environmental impacts of two transport infrastructure alternatives that allow the access to the Kuélap Archaeological Complex. The first of these is the Tingo-Kuélap road, a 33 km unpaved road and the second, the Kuélap Cable Car System (CS) of 4 km, which includes a 3 km road trip. The construction, operation and maintenance stages of both systems were evaluated. In addition, seven impact categories were analyzed using the ReCiPe 2016 and IPCC 2013 evaluation methods.

The results, reported by passenger on a round trip, showed that the Cable Car System is the most appropriate option to reduce environmental impacts compared to the road. For example, GHG emissions for the CS were an order of magnitude lower (2.0 kg CO₂ eq) than for the highway (17.0 kg CO₂ eq). Similar results were obtained for particulate material formation and other impact categories related to air quality. Interestingly, however, more than 50% of the impact in all categories is the result of the phase of use of the short stretch of unpaved road in the CS. In the case of the 33 km road, the greatest impact was attributable to the phase of use, in particular to the exhaust emissions of the vehicles and the re-suspension material of the road surface.

It is concluded that factors such as the use of electricity and a low-carbon local electricity matrix led the CS to generate substantially fewer impacts than those generated by vehicular traffic on the Tingo-Kuélap road. Likewise, it was shown that it is possible to reduce the environmental impact in the ST operation phase by 48% through the use of electric buses along the 3 km road. Finally, the results obtained can be applied to promote improvements in the execution and operation of both tourist and urban cable cars that the country has planned to execute in the near future.

Contenido

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Infraestructura turística en el Perú: Transporte | 1 |
| 1.2. Fortaleza de Kuélap..... | 2 |
| 1.3. Justificación | 6 |
| 1.4. Objetivos..... | 6 |
| CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA..... | 8 |
| 2.1. Turismo y cambio climático..... | 8 |
| 2.2. Sistemas de transporte por cable..... | 9 |
| 2.3. Carretera Tingo – Kuélap..... | 11 |
| 2.4. Análisis de Ciclo de Vida: Herramienta de evaluación ambiental | 13 |
| 2.5. ACV aplicados a sistemas de transporte: Carreteras y teleféricos | 15 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA | 17 |
| 3.1. Definición de objetivos y alcance | 17 |
| 3.1.1. Unidad funcional | 18 |
| 3.1.2. Límites de los sistemas analizados..... | 18 |
| 3.1.2.1. Sistema 1: Carretera Tingo – Kuélap (AM-111) | 19 |
| 3.1.2.2. Sistema 2: Telecabinas..... | 20 |
| 3.2. Inventario de Ciclo de Vida | 21 |
| 3.2.1. Recolección de datos..... | 21 |
| 3.2.2. Carretera Tingo – Kuélap - Ruta AM 111 | 23 |
| 3.2.2.1. Construcción..... | 23 |
| 3.2.2.2. Mantenimiento | 27 |
| 3.2.2.3. Uso | 28 |
| 3.2.2.4. Modelado de emisiones de escape vehicular..... | 31 |
| 3.2.2.5. Modelado de material particulado para una carretera sin pavimentar | 37 |
| 3.2.3. Telecabinas | 43 |
| 3.2.3.1. Construcción y mantenimiento..... | 43 |
| 3.2.3.1. Modelado de emisiones de maquinaria..... | 53 |
| 3.2.3.2. Funcionamiento | 56 |
| 3.3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida | 59 |
| 3.3.1. Selección de categorías de impacto | 61 |
| 3.4. Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida | 63 |
| 3.5. Análisis de escenarios | 63 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS..... | 65 |
| 4.1. Carretera Nuevo Tingo – Kuélap..... | 65 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Sistema de Telecabinas Kuélap..... | 66 |
| 4.3. Comparación de ambos sistemas en el escenario base | 70 |
| CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 72 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES..... | 84 |
| REFERENCIAS | 86 |



Lista de figuras

Figura 1.1 Ruta Chachapoyas -Kuélap. Tramo A-B: Chachapoyas – Achamaqui (Dv. Ingenio). Tramo B-C: Achamaqui (Dv. Ingenio) – Tingo. Tramo C-D: Tingo (Dv. Kuélap) – La Malca (Kuélap).

Figura 1.2 Carretera Chachapoyas – Kuélap.

Figura 1.3 Trazo de proyecto Sistema de Telecabinas Kuélap.

Figura 2.1 Tipos de sistemas de transporte por cable

Figura 2.2 Clasificación de sistemas de transporte por cable.

Figura 2.3 Croquis Carretera Tingo - Kuélap.

Figura 2.4 Carretera Tingo – Kuélap. Emp PE-08B – Tingo – Longuita – Maria – Kuelap. Red Vial Departamental - Ruta AM 111.

Figura 3.1 Metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

Figura 3.2 Carretera Tingo – Kuélap (AM-111) y Sistema de Telecabinas Kuélap.

Figura 3.3 Límites del Sistema 1 – Carretera Nuevo Tingo - Kuélap (AM111).

Figura 3.4. Límites del Sistema 2 – Telecabinas Kuélap.

Figura 3.5 Capa de revestimiento granular de la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap. Elaboración propia

Figura 3.6 Carretera Tingo – Kuélap (AM 111).

Figura 3.7 Carretera Tingo – Kuélap (AM 111).

Figura 3.8 Vista de la Estación de Embarque

Figura 3.9 Construcción del Andén de Salida. Se muestra la colocación de la estación motriz del sistema de telecabinas.

Figura 3.10 Construcción del Andén de Llegada.

Figura 3.11 Pilona del sistema.

Figura 3.12 Detalle de pedestal de apoyo de una de las pilonas.

Figura 3.13 Cabinas del sistema con capacidad para 8 personas.

Figura 3.14 Traslado en helicóptero de pieza de torre de línea.

Figura 3.15 Categorías de impacto de ReCiPe 2016.

Figura 3.16. Elementos de la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.

Figura 5.1 Comparación de Impactos ambientales de la Carretera Tingo – Kuélap y el Sistema de Telecabinas.

Figura 5.2 Impacto ambiental de la categoría de GW para los escenarios A1 y A2.

Figura 5.3 Impacto ambiental de la categoría de GW para los escenarios B1-B8.

Figura 5.4 Impacto ambiental de la categoría de FRS para los escenarios B1-B8.

Figura 5.5 Impacto ambiental de la categoría de OF (SH) para los escenarios B1-B8.

Figura 5.6 Impacto ambiental de la categoría de OF (Eco) para los escenarios B1-B8.



Lista de tablas

Tabla 1.1 Características de la vía Chachapoyas – Kuélap

Tabla 3.1. Parámetros de diseño a considerar

Tabla 3.2 Maquinaria usada en la construcción global de 33.13 km de la carretera.

Tabla 3.3 Materiales empleados en el mantenimiento de 12 km de la carretera.

Tabla 3.4 Maquinaria usada en el mantenimiento de 12 km de la carretera.

Tabla 3.5. Llegada de visitantes al Complejo Arqueológico de Kuélap.

Tabla 3.6 Tipos de transporte en la ruta Nuevo Tingo – Kuélap.

Tabla 3.7 Tipos de vehículos dedicados al turismo en la ruta Nuevo Tingo-Kuélap.

Tabla 3.8. Categoría de vehículo según la clasificación EMEP

Tabla 3.9 Emisiones de maquinaria para la construcción de la carretera.

Tabla 3.10 Emisiones de maquinaria para el mantenimiento de la carretera.

Tabla 3.11 Emisiones de PC correspondientes a 1 km de carretera. Emisiones de Diésel

Tabla 3.12 Emisiones de LCV correspondientes a 1 km de carretera.

Tabla 3.13. Constantes para las ecuaciones a y b.

Tabla 3.14 Factores de emisión de partículas de re-suspensión por tipo de vehículo (g/km).

Tabla 3.15. Valores de C.

Tabla 3.16. Factores de emisión de partículas de re-suspensión por tipo de vehículo (g/km).

Tabla 3.17. Factores de emisión de partículas de desgaste del freno por tipo de vehículo (mg/km) y emisiones globales de partículas de desgaste de freno por viaje.

Tabla 3.18. Factores de emisión de partículas de desgaste de neumáticos por tipo de vehículo (mg/km) y emisiones globales de partículas de desgaste de neumáticos por viaje.

Adaptado de: MOVES 2014.

Tabla 3.19 Resumen de consideraciones en el modelado de emisiones. Se muestra el nivel y el estándar de emisiones EURO utilizada para el modelado en la carretera

Tabla 3.20 Maquinaria usada en la construcción global de 3.13 km de carretera.

Tabla 3.21 Inventario de materiales de la Estación de Embarque. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

Tabla 3.22. Inventario de materiales del Andén de Salida. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

Tabla 3.23. Inventario de materiales del Andén de Llegada. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

Tabla 3.24 Características del diseño de la línea.

Tabla 3.25. Inventario de las estaciones, línea y vehículo. La unidad de referencia es la construcción del total del sistema de telecabinas a lo largo de 4 km. Los datos de vehículo se reportan sólo para 1 cabina.

Tabla 3.26 Emisiones de maquinaria en el Sistema de Telecabinas.

Tabla 3.27 Pasajeros transportados por el sistema turístico de telecabinas hacia el Complejo Arqueológico de Kuélap.

Tabla 3.28 Emisiones de los buses en circulación del tramo EE-AS correspondientes a 1km de carretera.

Tabla 3.29 Categorías de impacto consideradas en el ACV realizado y justificación

Tabla 3.30 Categorías de impacto

Tabla 3.31 Descripción de escenarios analizados

Tabla 4.1 Impactos ambientales del tráfico vehicular en la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap.

Tabla 4.2 Impactos ambientales del sistema global de carretera Nuevo Tingo – Kuélap.

Tabla 4.3 Impactos ambientales de la construcción de las edificaciones del sistema de telecabinas Kuélap.

Tabla 4.4 Impactos ambientales de la construcción de cada elemento de la Línea

Tabla 4.5 Impactos ambientales de la carretera EE-AS.

Tabla 4.6 Resultados de impacto ambiental para la operación del Sistema de Telecabinas.

Tabla 4.7 Impactos ambientales del sistema global de telecabinas.

Tabla 4.8 Comparación de impacto ambiental de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap y el Sistema de Telecabinas.

Tabla 5.1 Análisis de escenarios.

Tabla 5.2 Comparación de las emisiones de CO₂eq (t) generadas en el ACV de la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap con las reportadas en otros estudios de ACV.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Infraestructura turística en el Perú: Transporte

El sector turismo aporta cerca del 4% del Producto Bruto Interno (PBI) del Perú (MINCETUR, 2016), la tasa más alta entre los países de Sudamérica de acuerdo al Consejo Mundial de Viajes y Turismo (WTTC, 2017). Sin embargo, una de las dificultades para el desarrollo del mismo es la actual brecha en infraestructura del país. Según cálculos de la Asociación para el Fomento de la Infraestructura Nacional (AFIN, 2017), esta supera los US\$165.000 millones, de los cuales el sector transporte representa la mayor parte, con el 34%. Las cifras se reflejan directamente en el impulso del turismo: en el 2016 Perú recibió el 11.3% de los turistas internacionales que arribaron a Sudamérica, poco más del 1.8% de los que llegaron al continente americano y apenas el 0.3% del total mundial (UNWTO, 2016).

La necesidad de mejora en la infraestructura terrestre del Perú fue una de las principales desventajas identificadas por el Foro Económico Mundial (WEF, 2017), análisis que considera entre sus indicadores la calidad de las carreteras y el porcentaje de vías pavimentadas. El 90% de las carreteras de la Red Vial Departamental (RVD) y el 99% de la Red Vial Vecinal (RVV) no se encuentran pavimentadas. Por su parte, las carreteras de la Red Vial Nacional están pavimentadas al 67% (PerúCámaras, 2017). La peligrosidad de las vías causada por las difíciles condiciones geográficas y climatológicas se convierte en una potencial causa de accidentes, principalmente en las zonas altoandinas del país (La República, 2018). Para llegar a algunos destinos turísticos es inexorable recorrer carreteras de difícil acceso. Por ejemplo, a la ciudadela de Choquequirao, en Apurímac, sólo es posible acceder después de 2 días de caminata en ascenso hasta los 3000 msnm (PROMPERÚ, 2018).

Para facilitar el acceso a las zonas de interés turístico, además de la mejora de la transitabilidad de las carreteras, algunas de las propuestas varían entre diversificar los modos de transporte mediante vía aérea, fluvial o marítima. En el Perú, el uso de teleféricos para los traslados ha cobrado importancia con los resultados obtenidos a partir del caso de Telecabinas Kuélap, de modo que la Agencia de Promoción de la Inversión Privada (ProInversión) tiene proyectado el refuerzo de estudios de inversiones en teleféricos a raíz del interés expuesto por parte del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (ProInversión, 2017). Asimismo, el Gobierno ha asignado una inversión de 200 millones de soles en la construcción del destino turístico del teleférico de Choquequirao (MINCETUR, 2018). Asimismo, una empresa privada tiene proyectado ejecutar el teleférico de Calca en Cusco,

el cual permitirá llegar al sitio arqueológico de Huchuy Qosqo desde donde se puede ver el Valle Sagrado de los Incas así como del nevado Pituisiray (La República, 2018).

A nivel mundial, existen iniciativas realizadas con éxito que se podrían replicar en el contexto nacional para potenciar la accesibilidad de los destinos turísticos. Entre ellas destacan el teleférico de Masada, ubicado en Tamar, Israel, que permite el acceso a la fortaleza de Masada, sede del Palacio del Rey Herodes y Patrimonio de la Humanidad, donde además a lo largo de su recorrido se aprecia el Mar Muerto y el desierto de Judea (UNESCO, 2001a). Por otro lado, el teleférico del Monte Hua en Shanxi, China permite llegar al Monte Hua, una de las cinco montañas sagradas del taoísmo (UNESCO, 2001b). A nivel regional, está el teleférico de Monserrate, en Colombia, que comunica a Bogotá con el cerro de Monserrate, donde se encuentra el Santuario del mismo nombre (CerroMonserrate, s.f.). En Medellín, destaca el teleférico Metrocable, que además de facilitar el transporte urbano, lleva al Parque Ecoturístico Arví. Por otra parte, Brasil cuenta con el teleférico de Río de Janeiro que conduce al Complejo turístico del Pan de Azúcar (Bondinho, s.f.). Asimismo, Bolivia, cuenta con el teleférico de La Paz, el cual está destinado principalmente al transporte urbano, sin embargo ya forma parte de la oferta turística de la ciudad (Mi Teleférico, s.f.).

1.2. Fortaleza de Kuélap

La Zona Arqueológica Monumental Kuélap se ubica a 3000 msnm en la margen izquierda del río Utcubamba en el distrito de Tingo, provincia de Luya, departamento de Amazonas. Ha sido declarada Zona Arqueológica Intangible de acuerdo a la Ley N° 27286 y es candidata a la lista de Patrimonio Mundial por la UNESCO (UNESCO, 2011). Constituye uno de los principales destinos turísticos del país con un promedio de 100 000 visitantes por año (MINCETUR, 2018). Sin embargo, el principal obstáculo afrontado para desarrollar plenamente su potencial fue, durante varios años, el difícil acceso de visitantes a dicho monumento. Hasta inicios del 2017, para llegar al Complejo Arquitectónico Fortaleza de Kuélap desde la ciudad de Chachapoyas, existía una única ruta terrestre compuesta por tres tramos descritos en la Tabla 1.1 y Figura 1.1.

Tabla 1.1 Características de la vía Chachapoyas – Kuélap

| Tramo | Origen - Destino | Distancia | Tiempo de viaje | Carretera | Estado de la vía |
|--------------|---|-----------|-----------------|-------------------------------|---|
| A - B | Chachapoyas – Achamaqui (Dv. Ingenio). | 12.5 km | 30 min. | PE-08B Red Vial Nacional | Asfaltada. Buenas condiciones. Tramos sinuosos |
| B - C | Achamaqui (Dv. Ingenio) – Nuevo Tingo | 22.5 km | 45 min. | PE-08B Red Vial Nacional | Soluciones básicas. Paralela al cauce del río Utcubamba |
| C - D | Nuevo Tingo (Dv. Kuélap) – La Malca (Kuélap). | 35 km | 90 min. | AM-111 Red Vial Departamental | Afirmada. Angosta sección de vía de fuertes pendientes |

Fuente: “Estudio a Nivel de Perfil del Proyecto: “Mejoramiento de los servicios turísticos públicos Zona Arqueológica Monumental Kuélap, Distrito de Tingo, Provincia de Luya, Amazonas”. Elaboración propia

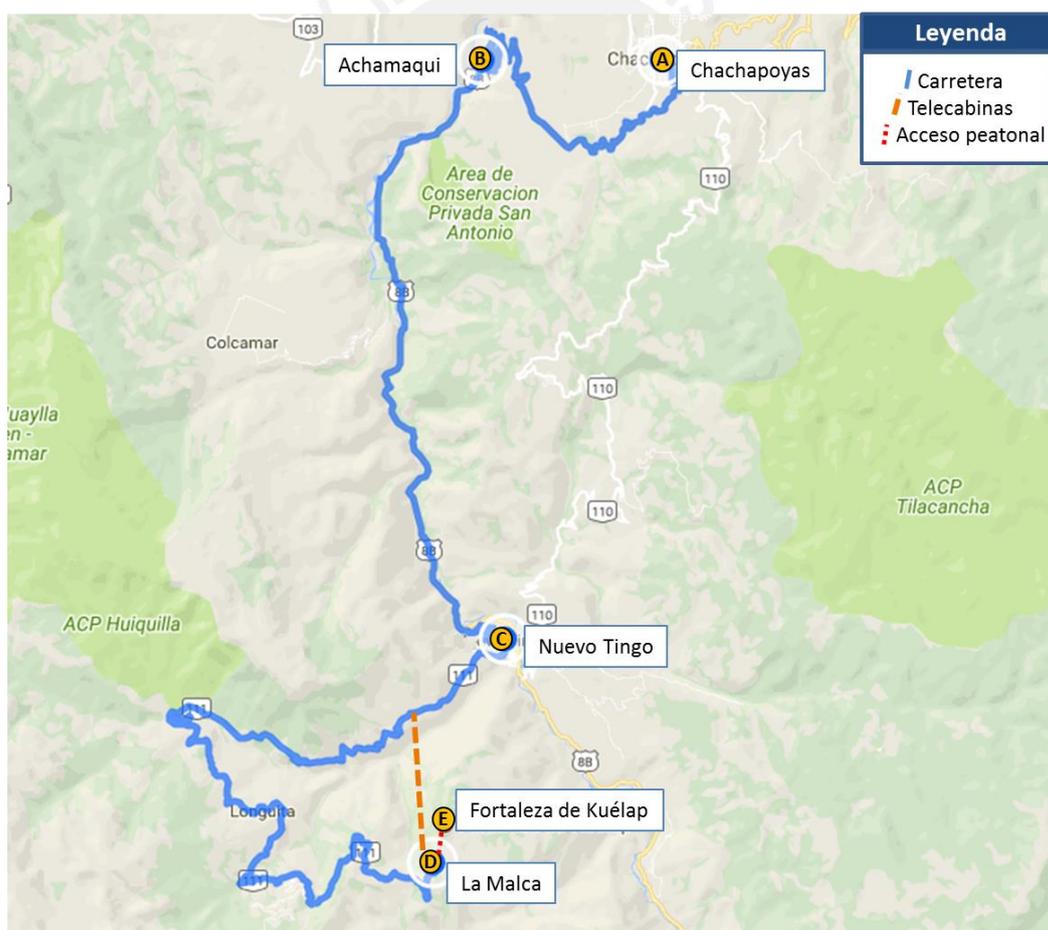
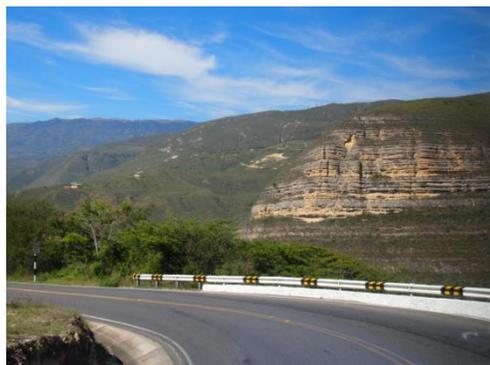


Figura 1.1 Ruta Chachapoyas -Kuélap. Tramo A-B: Chachapoyas – Achamaqui (Dv. Ingenio). Tramo B-C: Achamaqui (Dv. Ingenio) – Tingo. Tramo C-D: Tingo (Dv. Kuélap) – La Malca (Kuélap).

Fuente: Google Maps. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 1.2, el último tramo (tramo C-D) de la vía Chachapoyas – Kuélap: la ruta Nuevo Tingo – Kuélap (AM-111) presenta deficiencias en términos de accesibilidad, pues transcurre por una carretera afirmada y angosta, cuyo trazado bordea las montañas y se caracteriza por la presencia de fuertes pendientes y profundos abismos. Además, durante el periodo de lluvias intensas se producen deslizamientos de terreno que impiden el libre tránsito de vehículos (Consortio IDOM, 2013) e incrementan la probabilidad de ocurrencia de accidentes.



Tramo AB. Chachapoyas – Achamaqui (Dv. Ingenio).



Tramo BC. Achamaqui (Dv. Ingenio) – Nuevo Tingo



Tramo CD. Nuevo Tingo (Dv. Kuélap) – La Malca (Kuélap).

Figura 1.2 Carretera Chachapoyas – Kuélap.

Fuente: Propia

Con el fin de disminuir el tiempo de viaje de Nuevo Tingo a Kuélap de 90 a 20 minutos y facilitar la accesibilidad a la Zona Arqueológica Monumental Kuélap, se plantea el proyecto “Telecabinas Kuélap”, el primer sistema de transporte de este tipo en el país. Sus características permiten realizar un trayecto directo a lo largo de 4 km, de manera que se logra evitar el último tramo de recorrido (tramo C-D) que supone una mayor distancia.

La ejecución de la obra estuvo a cargo del Consortio Telecabinas Kuélap, integrado por la empresa peruana Ingenieros Civiles y Contratistas Generales S.A. (ICCGSA) y la compañía francesa Pomagalski S.A.S. (POMA). El proyecto comprendió la construcción de la Estación

de Embarque, el mejoramiento de 3.1 kilómetros de carretera, la construcción del Andén de Salida, la Línea, y el Andén de Llegada (ver Figura 1.3).



Figura 1.3 Trazo de proyecto Sistema de Telecabinas Kuélap.
Fuente: ProInversión, 2016.

El nuevo sistema de transporte está orientado a reforzar el atractivo del Circuito Turístico Nororiental con la creación de un nuevo polo de desarrollo turístico (MINCETUR, 2017). De acuerdo a la Cámara Nacional de Turismo (CANATUR), el incremento del flujo de turistas nacionales y extranjeros podría convertir a Kuélap en el segundo destino más visitado del país después de Machu Picchu (CANATUR, 2016). Para facilitar dicho incremento es fundamental complementar la accesibilidad al recinto mediante conectividad aérea. Por ello, recientemente dos aerolíneas han implementado vuelos directos de Lima a Chachapoyas. La alternativa se suma a los vuelos ya existentes hacia el aeropuerto de Jaén, desde donde se viaja en auto por 4 horas a Chachapoyas.

Por lo antes expuesto, es evidente que la región Amazonas posee un gran potencial turístico; pese a ello, este no ha sido aprovechado en su verdadera dimensión. Este departamento es el sétimo con mayores niveles de pobreza en el Perú, cuenta con 10 distritos ubicados entre los 150 más pobres del Perú, con una tasa de pobreza que oscila entre el 66% y el 92% (INEI, 2013). Ante tal panorama, la ejecución de proyectos que impulsen el incremento del flujo turístico es positiva pues traerá consigo la generación de mejores ingresos económicos de la población en el corredor turístico Chachapoyas – Kuélap (Consortio IDOM, 2013).

1.3. Justificación

Los compromisos del Perú asumidos en el Acuerdo de París, Contribuciones Nacionalmente Determinadas - *National Determined Contributions* (NDC) contemplan una reducción del 30% respecto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) proyectadas para el año 2030, como parte de un escenario Business as Usual (BaU) (MINAM, 2016). Ante ello, se propone comparar, desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental, el nuevo Sistema de Telecabinas Kuélap, que permite el acceso a la Fortaleza del mismo nombre, y la carretera Tingo - Kuélap. Todo ello con el fin de determinar si el nuevo sistema de transporte, además de permitir acortar distancias y acceder al destino turístico en el menor tiempo posible, tiene la capacidad de reducir los impactos ambientales de la zona vinculados a la carretera.

Precisamente para realizar una evaluación holística de los impactos ambientales entre una alternativa de transporte y otra se lleva a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), metodología que evalúa, de la forma más objetiva posible, los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida (ISO, 2006a). La realización del ACV ha sido ampliamente recomendada en la literatura para comparar el impacto de tecnologías diferentes para lograr fines similares (EPA, 2006). Otra de las ventajas de la aplicación del ACV es la posibilidad de análisis de todas las fases del ciclo de vida de ambos sistemas sin subestimar los impactos de alguna de ellas.

Por otro lado, se debe considerar además que, si bien no se tendrán las emisiones de GEI provenientes del tráfico vehicular de años anteriores, el incremento del número de turistas en la zona o la construcción del sistema podrían tener efectos adversos en el cálculo global de impactos. En este sentido, los resultados obtenidos podrían alertar sobre la transferencia de impactos ambientales de un medio a otro o de una fase de ciclo de vida a otra (EPA, 2006). Por otro lado, con la aplicación del ACV será posible detectar las etapas del ciclo de vida de ambos sistemas que podrán ser optimizadas a fin de reducir los impactos ambientales. Las recomendaciones podrán ser aplicadas para propiciar mejoras en la operación del teleférico de Kuélap, así como también en la ejecución de proyectos de transporte similares desarrollados a futuro.

1.4. Objetivos

Objetivo General

Analizar y comparar los impactos ambientales generados por el acceso a la Zona Arqueológica Monumental Kuélap tanto por el sistema de telecabinas como por la carretera

Nuevo Tingo – Kuélap (AM 111), aplicando la herramienta de gestión ambiental denominada ACV.

Objetivos Específicos

- Reunir datos referentes a las características técnicas de los proyectos de sistema de telecabinas y la carretera Tingo - Kuélap.
- Generar un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) que presente las emisiones de contaminantes liberadas al ambiente y la cantidad de energía y materiales consumida.
- Cuantificar los indicadores ambientales relacionados con el calentamiento global, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, eutrofización de aguas dulces y agotamiento de recursos para cada escenario analizado mediante la evaluación de ACV con el software SimaPro.
- Interpretar los resultados obtenidos producto del ACV aplicado al sistema de telecabinas y a la carretera y compararlos.
- Realizar los análisis de escenarios correspondientes para determinar los posibles efectos del cambio de una variable del sistema en los resultados.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Turismo y cambio climático

El turismo es una fuente significativa de emisiones de GEI. De acuerdo a Lenzen et al, (2018), causa el 8% de las emisiones globales y se prevé que la cifra se duplique para el 2050 (UN Environment, 2018). Al mismo tiempo, es una potencial víctima del cambio climático dado que no es inmune a los impactos observados y probablemente futuros de este fenómeno. Sin embargo, dependiendo de la ubicación del destino y de su disponibilidad y capacidad para hacer frente a los cambios, los impactos en la economía en cada país serán variables. De ese modo, los destinos de vacaciones actualmente más populares podrían tornarse demasiado cálidos, y los destinos que actualmente son demasiado fríos verían un aumento en su popularidad (Berrittella et al, 2006).

Dado que algunos destinos se verán seriamente afectados, aquellos países que basan su economía en el turismo enfrentarán directamente las consecuencias del cambio climático. Por lo tanto, estudios sobre los efectos del cambio climático se han llevado a cabo para medir sus impactos sobre esta actividad económica (Bosshart and Frick, 2006; Nordin, 2005). De igual manera, se han tratado de generar nuevos escenarios sobre el flujo del turismo para analizar la tendencia futura en el cambio de destinos turísticos que surgirá a consecuencia del cambio climático (Hamilton, 2005). Asimismo, en el 2008, la Organización Mundial del Turismo (OMT), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) emitieron un reporte sobre turismo y cambio climático que contiene un inventario de emisiones de GEI del turismo global referentes a transporte y alojamiento (UNWTO-UNEP-WMO, 2008).

La mayor proporción del impacto ambiental generado por el turismo se le atribuye al transporte: aéreo y terrestre. Para hacer frente a la problemática de este último y proteger los atractivos turísticos, Tang et al. (2015) plantean que debe fomentarse la alta eficiencia energética y la reducción de las emisiones de carbono procedentes de los distintos modos de transporte. Para ello, proponen la utilización de sistemas de transporte a base de electricidad, dado que la producción de tal energía concentra la contaminación atmosférica en la región de producción donde está más regulada por las normas nacionales de construcción. Sin embargo, en la región de consumo causa relativamente menos contaminación que otros tipos de energía como la proporcionada por los combustibles fósiles.

2.2. Sistemas de transporte por cable

Los sistemas de transporte por cable comprenden aquellas instalaciones en las que se emplean cables metálicos colocados a lo largo del recorrido a realizar, ya sea para constituir la vía de circulación de los vehículos o para transmitirle a los mismos un esfuerzo motor (Arcay et al., 2003). De acuerdo al Reglamento Europeo relativo a las instalaciones de transporte de personas por cable (Eur-Lex, 2016), estas pueden ser de 3 tipos (ver Figura 2.1).

| Funiculares | Teleféricos | Telesquíes |
|--|--|--|
| <p>Sistemas cuyos vehículos son arrastrados por uno o más cables a lo largo de rieles que pueden descansar sobre el suelo o sobre estructuras fijas.</p> | <p>Sistemas cuyos vehículos son desplazados en suspensión y son propulsados por uno o más cables. Esta categoría incluye las telecabinas y los telesillas.</p> | <p>Sistemas que, mediante un cable, halan a usuarios dotados de equipos adecuados por una pista preparada para tal efecto.</p> |
|  |  |  |
| <p>Funicular hacia el Santuario de Monserrate. Fuente: Funicular Monserrate (s.f.)</p> | <p>Teleférico hacia la Gran Muralla China. Fuente: Doppelmayr/Garaventa</p> | <p>Telesquí. Fuente: Leitner Ropeways</p> |

Figura 2.1 Tipos de sistemas de transporte por cable
Elaboración propia a partir de Eur-Lex, 2016

Estas instalaciones pueden clasificarse de acuerdo a distintos criterios (ver Figura 2.2). Antes de ello, conviene definir previamente los principales tipos de cables utilizados en su funcionamiento:

- Cable portante: es la vía de circulación y soporta la carga, también se conoce como cable carril o portador.
- Cable tractor: transmite la fuerza para el movimiento, también se conoce como cable de tracción.
- Cable transportador: soporta la carga y transmite la fuerza para el movimiento, se conoce también como portador-tractor.

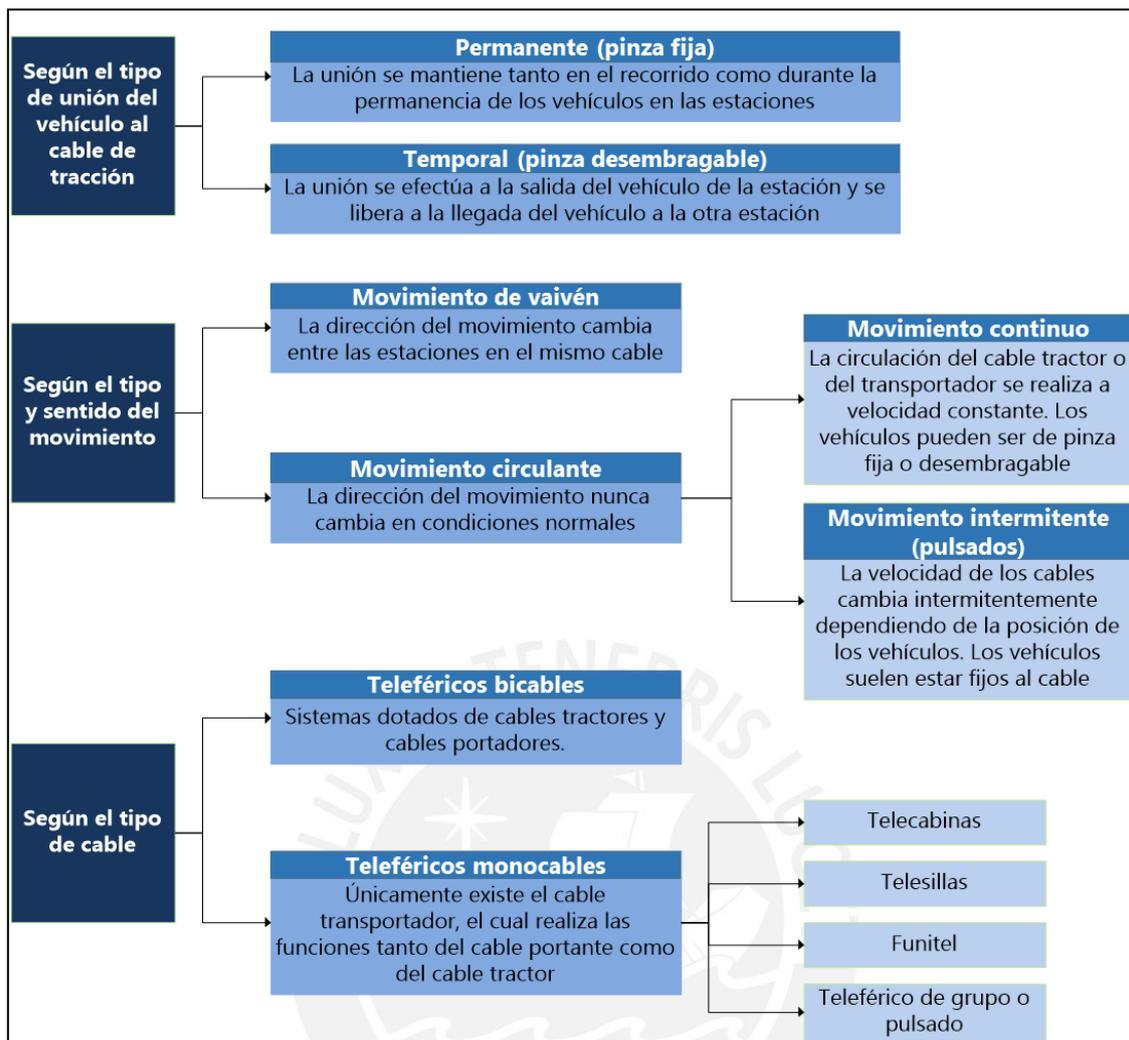


Figura 2.2 Clasificación de sistemas de transporte por cable.

Elaboración propia a partir de "Transporte por cable". Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Universidade de A Coruña

Teleféricos monocables: Telecabinas

Como se observa en la Figura 2.2, las telecabinas instaladas en Kuélap pertenecen a la categoría de teleféricos mono-cables. Por lo tanto, el cable portador – tractor de acero asume una doble función: sustentar la carga y transmitir la tracción. Además, el sistema es de movimiento circulante y continuo, es decir, el cable portador - tractor está constantemente en movimiento y los vehículos contornean las estaciones extremas (ICCGSA, 2017).

En este tipo de sistemas, la cabina está suspendida desde dos terminales, a veces sobre torres de soporte intermedias y cada una tiene capacidades habituales entre 4 y 12 usuarios por viaje. Se trata de un sistema adecuado cuando se requieren capacidades de transporte altas, típicas de recorridos turísticos sobre ciudades, parques naturales o ferias de exposiciones. El cable es impulsado por un *bull-wheel* (rueda giratoria) en el terminal, que

está conectado a un motor eléctrico. En instalaciones de pinza desembragable, las cabinas se separan de la cuerda de arrastre en las terminales (Alshalalfah et al., 2012) para permitir el ingreso de pasajeros. Por otro lado, las torres de apoyo están hechas de estructuras metálicas tubulares o en celosía. Los vanos deben ser reducidos lo que conlleva un gran número de torres con el correspondiente impacto paisajístico. A su vez, las torres suelen ser menores que las de los teleféricos bicable por ser mayores en cantidad (UC, 2003).

2.3. Carretera Tingo – Kuélap

Desde la carretera de Ruta Nacional PE-08B, Chachapoyas –Leymebamba, se puede ingresar a la ruta a Kuélap por dos accesos. El primero parte de la localidad de Tingo Viejo en el Km. 472+700 (PE-08B), desde donde se ingresa a la carretera Tingo – Kuélap, designada como Tramo de proyecto. El segundo acceso parte del cruce en el Km 474+100 (PE-08B) con la variante a Nuevo Tingo, en el cual se recorre una distancia de 3.53 km. para unirse finalmente en la plaza principal de Nuevo Tingo a la ruta departamental que conduce a Kuélap (ver Figura 2.3).

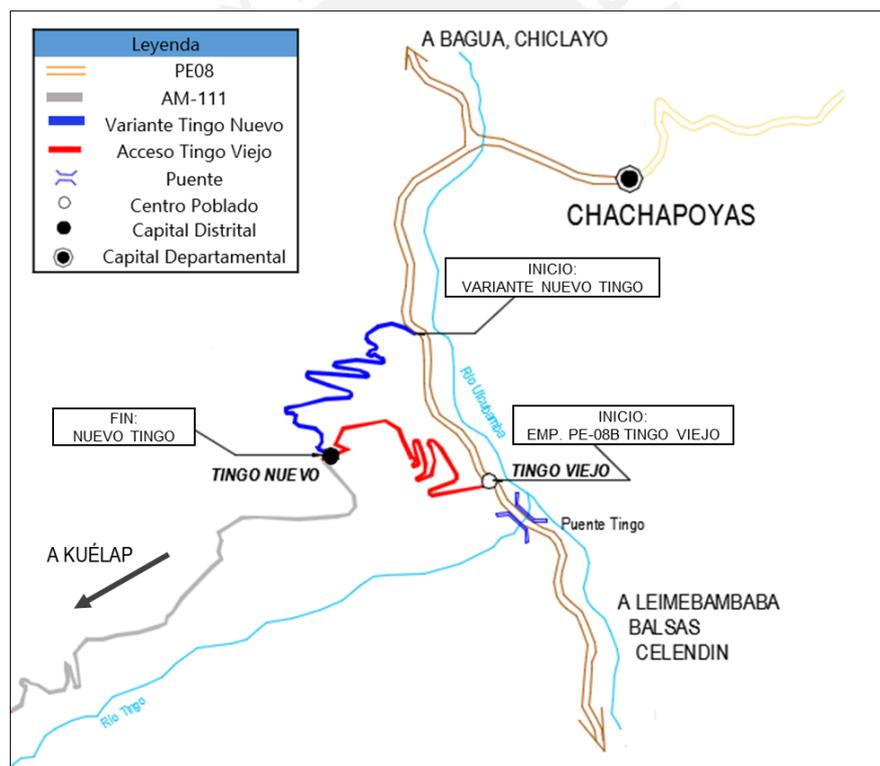


Figura 2.3 Croquis Carretera Tingo - Kuélap.

Adaptado de: Croquis Camino Vecinal Tingo – Kuélap de Mantenimiento periódico ruta AM-111 (2017), longitud 12+000 km Emp. PE-08B – Tingo – Longuita - María

Antecedentes

La carretera Tingo – Kuélap fue construida a nivel de trocha carrozable entre 1982 y 1986 con financiamiento y ejecución de la Corporación Departamental de Desarrollo (CORDE) - Amazonas. El objetivo principal fue generar el acceso vehicular hacia la Fortaleza de Kuélap y unir en el desarrollo de la vía las capitales de los distritos de Tingo, Longuita y María (ver Figura 2.4). La difusión del potencial arqueológico y turístico de la Fortaleza incrementó considerablemente el flujo vehicular producto de la demanda turística lo que evidenció las dificultades que se presentan actualmente para el tránsito vehicular.

Durante los años 1999 y 2000, con el fin de disminuir la distancia y el tiempo de recorrido de Chachapoyas a la Fortaleza de Kuélap, se construyó el tramo de la Variante a Nuevo Tingo a cargo del Gobierno Regional de Amazonas. Así, se reducía el recorrido sin tener que pasar por el poblado de Tingo Viejo, hasta ese entonces la única vía de acceso. En el año 2006 se inician las obras para la Rehabilitación del tramo de la Carretera Emp. PE-08 - Tingo - Kuélap y la Variante a Nuevo Tingo con financiamiento de Provías descentralizado del MTC. Controversias en la administración del contrato llevaron a la paralización de las actividades al año siguiente. En consecuencia, se dejaron de ejecutar partidas programadas de obras de arte tales como alcantarillas, badenes y muros de contención, señalización, entre otros proyectados. A la fecha, el caso está en la fase final de arbitraje ante el Tribunal OSCE, mientras que las obras realizadas en la vía se encuentran deterioradas por el tránsito durante los años posteriores a su intervención y por los efectos climatológicos, y no han recibido ningún tipo de mantenimiento por la controversia entre la Entidad y el Contratista.

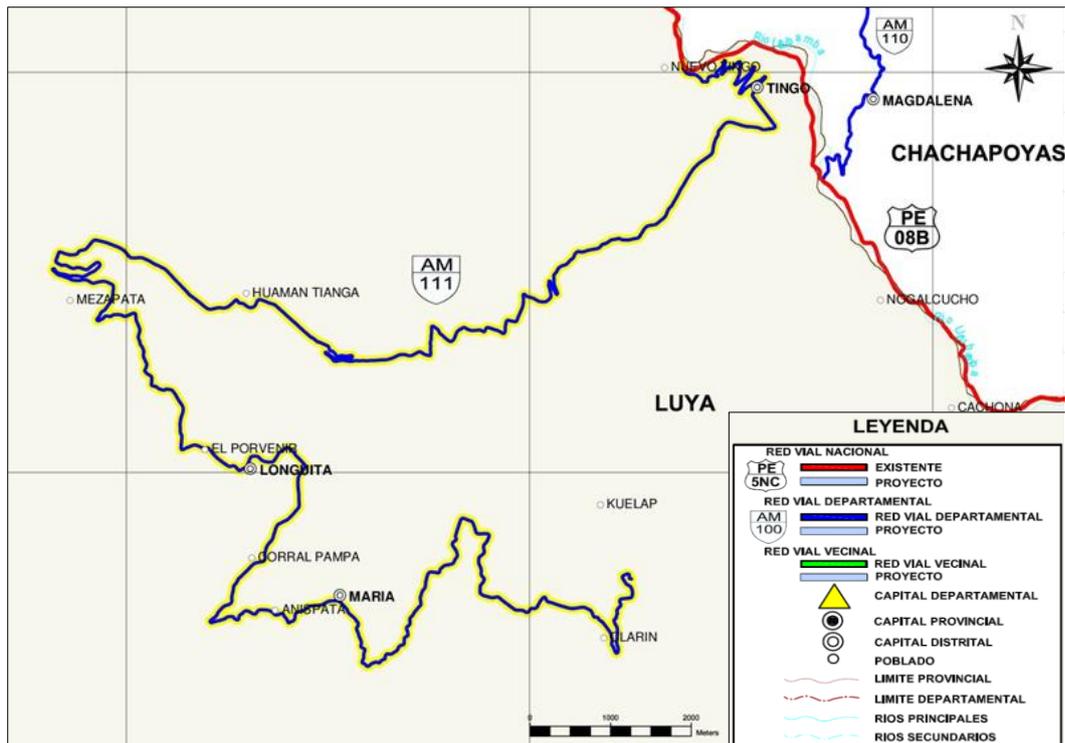


Figura 2.4 Carretera Tingo – Kuélap. Emp PE-08B – Tingo – Longuita – Maria – Kuelap.
Red Vial Departamental - Ruta AM 111.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

2.4. Análisis de Ciclo de Vida: Herramienta de evaluación ambiental

Las emisiones al ambiente, el consumo de recursos, así como otras intervenciones asociadas con la obtención de productos contribuyen a un amplio rango de impactos ambientales como cambio climático, agotamiento de ozono, eutrofización, acidificación, toxicidad humana, daño a ecosistemas, agotamiento de recursos, agua, etc. En el marco de la gestión ambiental, una de las herramientas disponibles para cuantificar los impactos anteriormente mencionados es el ACV, regulado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) mediante las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b). El ACV es la compilación y evaluación de las entradas, salidas y los potenciales impactos ambientales de un sistema productivo a lo largo de todo su ciclo de vida (ISO, 2006). La metodología proporciona un conjunto completo de indicadores ambientales, los cuales ofrecen información sobre los efectos potenciales de las actividades humanas en los fenómenos ambientales de interés. Esto resulta crucial para evaluar la sostenibilidad ambiental de los sistemas antrópicos (McBride et al., 2011).

En el Perú, el ACV se encuentra presente en las normas técnicas. Desde el año 1998 se cuenta con la NTP 14040, que al 2017 ya se encuentra en su segunda edición y desde el 2013 con la NTP 14044, referidas a la evaluación de ciclo de vida. En la legislación nacional, el artículo 75 de la Ley General del Ambiente señala “*que el titular de operaciones*

debe adoptar prioritariamente las medidas de prevención del riesgo, daño ambiental y protección ambiental que correspondan en cada una de las etapas de sus operaciones, bajo el concepto de ciclo de vida de los bienes que produzca o los servicios que provea”.

Sus aplicaciones están basadas en la perspectiva holística que la metodología proporciona sobre el desempeño ambiental de los productos. Por esta razón, se ha convertido en un concepto fundamental tanto para la gestión ambiental en la industria como para la formulación de políticas ambientales en el gobierno (Baumann y Tillman, 2004). Sobre este último atributo, la creciente importancia del ACV en la evaluación de políticas (Meul et al., 2014; Moretti et al., 2014; Thabrew et al., 2009) condujo a un fuerte impulso en su aplicación para evaluar proyectos de desarrollo sostenible, planes y programas (Moretti et al., 2016).

En particular, la metodología ha sido ampliamente utilizada como herramienta de toma de decisiones en diferentes niveles (empresas, sectores, regiones, etc.) y por diversos agentes (gerentes, proveedores, clientes y formuladores de políticas) (Jeswani et al., 2010). Las razones de su preferencia son, principalmente, su capacidad para capturar problemas ambientales relevantes, su solidez analítica y su eficiencia en la simplificación de sistemas complejos (Meul et al., 2014). En efecto, el ACV podría ofrecer información predictiva sobre las cargas ambientales potenciales causadas por diferentes alternativas (Zhao, 2008) y detectar puntos sensibles en los que es posible intervenir con las soluciones más avanzadas tecnológicamente (Scipioni et al., 2009). Esta característica, a su vez, permite que la metodología ACV pueda ser utilizada en la fase de planificación temprana de proyectos para comparar distintas opciones de soluciones para infraestructura (Slagstad, 2013). En esta fase es posible proporcionar resultados cuantitativos a los responsables de la toma de decisiones por medio de la cuantificación de los beneficios ambientales producto de la implementación de soluciones constructivas alternativas. Sin embargo, es preciso mencionar las limitaciones del ACV generadas por la disponibilidad e incertidumbre de los datos en la fase de planificación temprana (Slagstad, 2013).

Por otra parte, existe la posibilidad de desarrollar modelos replicables de ACV para diferentes tipos de obras de infraestructura. Es decir, una guía para los profesionales y los responsables de la toma de decisiones (Du G. & Karoumi R., 2012). Por ejemplo, en Suecia se desarrolló una guía de ACV que presentó el procedimiento general para cuantificar las emisiones y el consumo de energía a través del ciclo de vida de puentes ferroviarios. En dicho proyecto, se determinó que la implementación de ACV tiene grandes expectativas para establecer nuevos criterios de diseño, optimización y ayudar en el proceso de toma de

decisiones entre las diferentes propuestas de diseño (Du G. & Karoumi R., 2012), beneficios que podrían ser extrapolados de igual manera a otros proyectos de infraestructura.

2.5. ACV aplicados a sistemas de transporte: Carreteras y teleféricos

En la actualidad, la infraestructura de transporte y en especial la referente a carreteras resulta indispensable para el desarrollo económico de cualquier país, por lo cual a nivel mundial se destinan grandes inversiones en su construcción (OCDE, 2015). Los requerimientos de materia prima de la industria continuarán incrementándose y se tendrá que enfrentar una demanda creciente. El desafío es satisfacer esta demanda usando prácticas de ingeniería ambientalmente sostenibles (Santero, 2010). En los últimos años, la importancia del sector ha llevado al desarrollo de la investigación en torno a los impactos ambientales derivados de esta industria. Es así que se inicia con la aplicación de ACV en carreteras y a la fecha es posible encontrar en la literatura variados estudios en distintos contextos geográficos principalmente en países europeos.

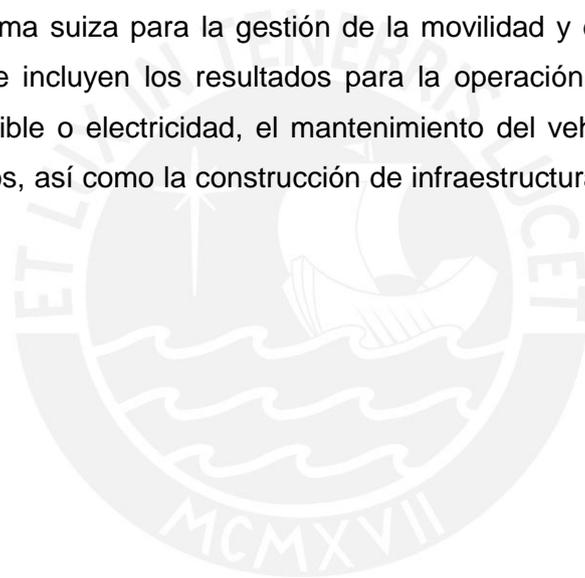
En este contexto, se han propuesto metodologías para la evaluación ambiental de carreteras mediante el ACV (Stripple, 2001, Hoang, 2005). Además se han realizado ACV de la construcción de carreteras convencionales de pavimento rígido y flexible (Athena 1999, Pontarollo et al. 2001). Por otra parte, se han desarrollado estudios enfocados en el uso de material reciclado en la construcción de pavimentos como ceniza volante y concreto reciclado (Mroueh et al. 2000, Mroueh et al. 2001, Ventura et al. 2008) además de residuos de la incineración de desechos (Birgisdottir, 2005). Mientras tanto, otros estudios han hecho énfasis en alguna de las fases del ciclo de vida de carreteras como por ejemplo el uso (Araújo et al, 2014) o el mantenimiento (Huang et al, 2009).

A nivel regional, en Latinoamérica, los estudios de ACV se han enfocado principalmente en el sector agrícola-alimentario, bioenergético y de edificaciones (Quispe et al., 2017). Sin embargo, en el Perú, en el 2016 se inició la investigación en el sector de infraestructura de transportes con el ACV de la construcción de una carretera en una zona de amortiguamiento en la provincia de Manu, Madre de Dios (Larrea – Gallegos et al., 2016). El estudio realizado fue el primero en la aplicación de ACV a una vía sin pavimentar y en un emplazamiento de bosque tropical. En un contexto diferente y con opuestas condiciones geográficas, de construcción y uso, se aplicó también un ACV a la carretera pavimentada de la Panamericana Sur en Lima (Verán et al., 2019).

En el caso de sistemas de transporte por cable, es escasa la publicación científica relativa a la aplicación del ACV. No obstante, al presentarse como alternativa de transporte sostenible (CWA, 2018) y dadas las preocupaciones ambientales, últimamente se ha empezado a

desarrollar la investigación al respecto. En esa línea, se han realizado análisis de huella de carbono de carreteras y teleféricos de acceso a destinos turísticos (Dou et al., 2012), así como también estudios de huella ecológica para teleféricos urbanos (Erharter et al., 2017). Por otro lado, existen estudios comparativos relativos a emisiones de CO_2_{eq} de teleféricos en áreas de interés histórico (Tang, 2015). Además, a nivel regional, existen precedentes de monitoreo de emisiones de GEI generadas por la operación de teleféricos en Colombia (ETMVA, 2012).

En Suiza, a partir del 2016, inventarios de ciclo de vida nacionales incluyeron los servicios de transporte en teleférico (Messmer & Frischknecht, 2016). Los procesos recién creados y actualizados se vincularon con KBOB v2.2: 2016, la base de datos suiza de inventario de ciclo de vida basada en ecoinvent v2.2. (KBOB et al. 2016). Se llevó a cabo también el ACV y los resultados de los indicadores de impacto ambiental se compilaron en Mobitool - Faktoren v2.0, plataforma suiza para la gestión de la movilidad y datos medioambientales (Stolz et al., 2016). Se incluyen los resultados para la operación directa del vehículo, el suministro de combustible o electricidad, el mantenimiento del vehículo, la construcción y disposición de vehículos, así como la construcción de infraestructura y el desmantelamiento (KBOB et al. 2016).



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El ACV está compuesto por 4 fases: Definición del objetivo y alcance, análisis de inventario de ciclo de vida, análisis de impacto de ciclo de vida y finalmente interpretación del análisis de ciclo de vida (ISO, 2006). Su naturaleza es iterativa por lo que antes de emitir los resultados finales inevitablemente se revisarán las fases anteriores ya sea para redefinir el alcance del estudio o para realizar cambios en el inventario. Una vez que se sigan todas las fases es posible obtener resultados preliminares que permitirán detectar qué fase del ACV debería modificarse. La iteración del proceso permitirá obtener conclusiones consistentes con el alcance y objetivos del estudio. En la Figura 3.1 se observan las cuatro fases que componen un ACV.

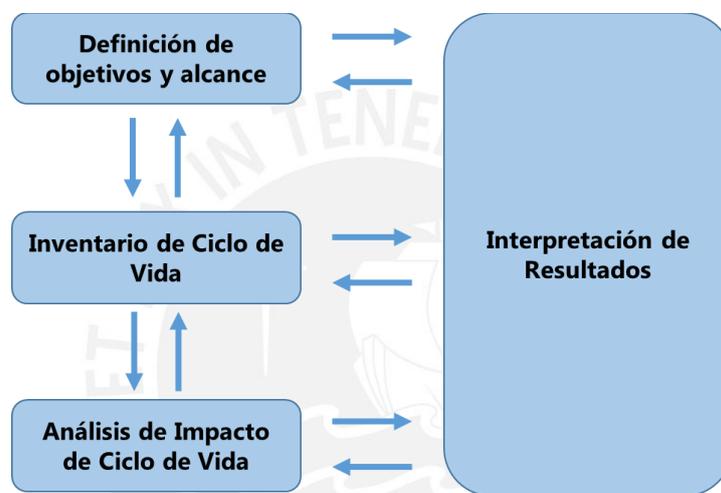


Figura 3.1 Metodología de Análisis de Ciclo de Vida.
Fuente: ISO 14044

3.1. Definición de objetivos y alcance

El objetivo del presente ACV es evaluar los impactos ambientales directos e indirectos generados por los dos sistemas de transporte que comunican la localidad de Nuevo Tingo con la Zona Arqueológica Monumental Kuélap: La carretera Nuevo Tingo – Kuélap (AM111) y el teleférico de Kuélap. Los resultados están destinados a proponer recomendaciones en el funcionamiento de sistemas de transporte aéreo por cable y en el diseño y construcción de futuros proyectos similares.

El alcance del ACV, el cual abarca los límites del sistema y el nivel de detalle del estudio, depende del objetivo que se persigue. Por otro lado, al tratarse de un estudio comparativo, es necesario evaluar la equivalencia de los sistemas antes de interpretar los resultados. En consecuencia, el alcance del estudio debe definirse de tal manera que ambos sistemas puedan compararse. Esto se logra utilizando la misma unidad funcional y consideraciones

metodológicas equivalentes, como los límites del sistema, la calidad de los datos, los criterios de decisión sobre la evaluación de los insumos y los resultados y la evaluación del impacto (ISO, 2006). En los subcapítulos siguientes se describe el alcance del estudio.

3.1.1. Unidad funcional

Para el desarrollo de la propuesta y comparación de resultados es necesario considerar una unidad funcional (UF), esto es, el desempeño en términos cuantitativos del sistema global del proceso para su utilización como unidad de referencia (ISO, 2006). Para ello, en primer lugar, se debe definir la función del sistema en base al objeto de comparación. La función escogida es un viaje unitario, es decir, un pasajero, de ida y vuelta desde la localidad de Nuevo Tingo hasta la Fortaleza de Kuélap.

La literatura indica que, debido a la alta heterogeneidad de los productos ofertados por el turismo, es muchas veces difícil establecer una adecuada unidad funcional en estudios enfocados en el sector (Michailidou, 2016, Filimonau et al. 2011). En otros estudios basados en la medición directa de emisiones de carbono de diferentes tipos de transporte turístico, la unidad escogida fue un pasajero por viaje o un pasajero por kilómetro (Tang, 2015). En este estudio, los kilómetros recorridos entre el punto de origen y destino varían según el tipo de transporte utilizado. Por lo tanto, la unidad funcional (UF) elegida ha sido un pasajero en un viaje de ida y vuelta hacia la Fortaleza de Kuélap.

3.1.2. Límites de los sistemas analizados

Se definen los límites del sistema considerando qué actividades del proceso tomar en cuenta y el grado de detalle con el que deberán ser estudiadas. Asimismo, se determinan las entradas y salidas a considerar. Se debe tener en cuenta que cualquier omisión de alguna actividad del ciclo de vida en el análisis solo está permitida siempre y cuando no altere significativamente las conclusiones del estudio (ISO, 2006).

Con el fin de obtener uniformidad en el análisis, se parte de la misma ubicación geográfica en ambos sistemas y se llega también a una ubicación geográfica en común. De igual manera ocurre con el punto de llegada (ver Figura 3.2).



Figura 3.2 Carretera Tingo – Kuélap (AM-111) y Sistema de Telecabinas Kuélap. Elaboración propia.

3.1.2.1. Sistema 1: Carretera Tingo – Kuélap (AM-111)

Se consideró el tramo de carretera AM-111 comprendido entre la Estación de Embarque (177820.7760 m, 9294301.2340 m) y el Andén de Llegada (176258.3340 m, 9288737.3800 m) lo cual suma un total de 33.13 km. La carretera en estudio está considerada como trocha carrozable, el nivel más básico en la clasificación de vías (MTC, 2014). Además, se encuentra a nivel de afirmado y se tiene un proyecto de mejoramiento de vía de un pequeño tramo con soluciones básicas. Sin embargo, esta actividad quedará fuera de los límites del sistema. 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). En tal sentido, para el análisis se consideró que en general las características de la carretera no varían significativamente en un período de 20 años.

Las fases analizadas fueron la construcción, uso y mantenimiento. En la construcción se incluye principalmente las partidas de movimiento de tierras, afirmado y obras de arte. El fin de vida se excluyó de los límites del sistema ya que, a la fecha, se desconocen las características técnicas de la vía que reemplazará en un futuro a la carretera Tingo – Kuélap. Precisamente en función de ellas estarán los procedimientos de disposición final de residuos, como por ejemplo el material a ser removido. En la Figura 3.3, se puede observar la delimitación del sistema.

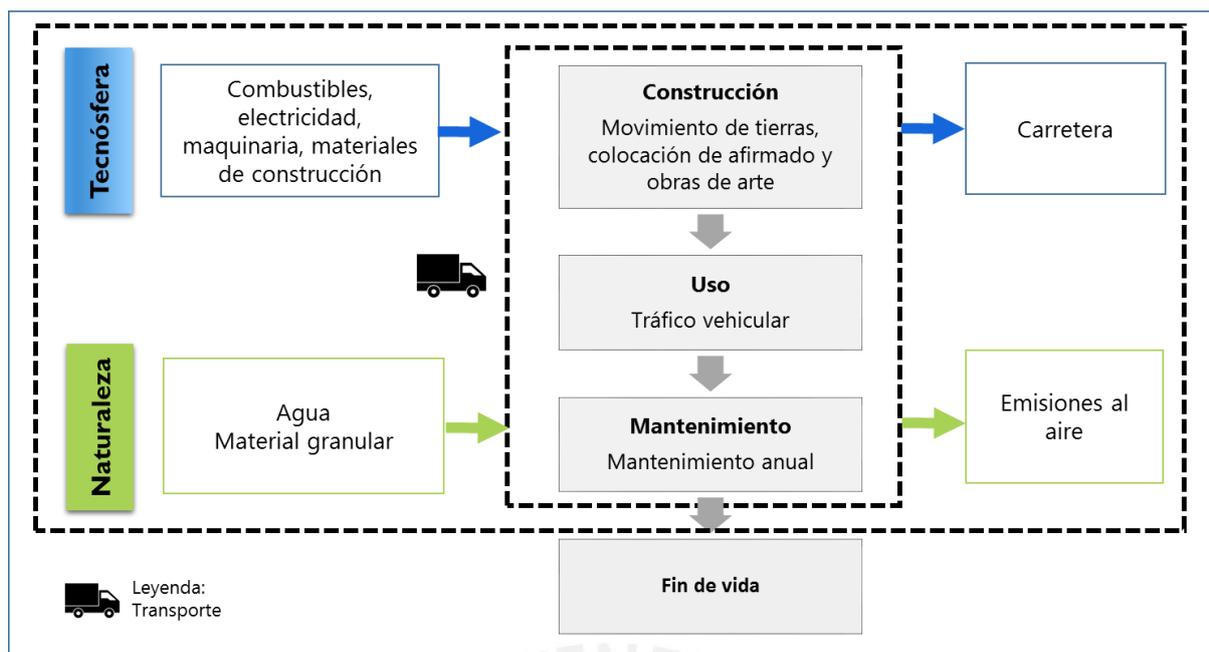


Figura 3.3 Límites del Sistema 1 – Carretera Nuevo Tingo - Kuélap (AM111).
Elaboración propia.

3.1.2.2. Sistema 2: Telecabinas

Las fases analizadas fueron la construcción, operación y mantenimiento. Se consideró la construcción de la Estación de Embarque (EE), los Andenes de Salida (AS) y Llegada (ALL) y la Línea, compuesta por la obra electromecánica, las torres y las cabinas. Además se incluyó la construcción, uso y mantenimiento del tramo de 3.13 km de conexión entre la Estación de Embarque y el Andén de Salida. Su análisis se realizó escalando los valores de la carretera Tingo – Kuélap para 3.13 km. Por otro lado, el fin de vida se excluyó de los límites del sistema al presentarse incertidumbre en los procedimientos de disposición final que serán adoptados una vez que finalice el periodo de concesión del proyecto.

El tiempo de vida útil se consideró de 50 años para las edificaciones y de 20 años para la obra electromecánica pues es el período de concesión que posee el Consorcio, además fue el utilizado por el inventario de la base de datos KBOB. El año de referencia para su construcción fue 2017. Para la operación se consideraron los meses desde agosto (5 meses después de la inauguración, tiempo en el que se considera que la afluencia se estabiliza) a diciembre de 2017 y se completó con datos de enero a julio de 2018. Se puede observar la delimitación del sistema en la Figura 3.4.

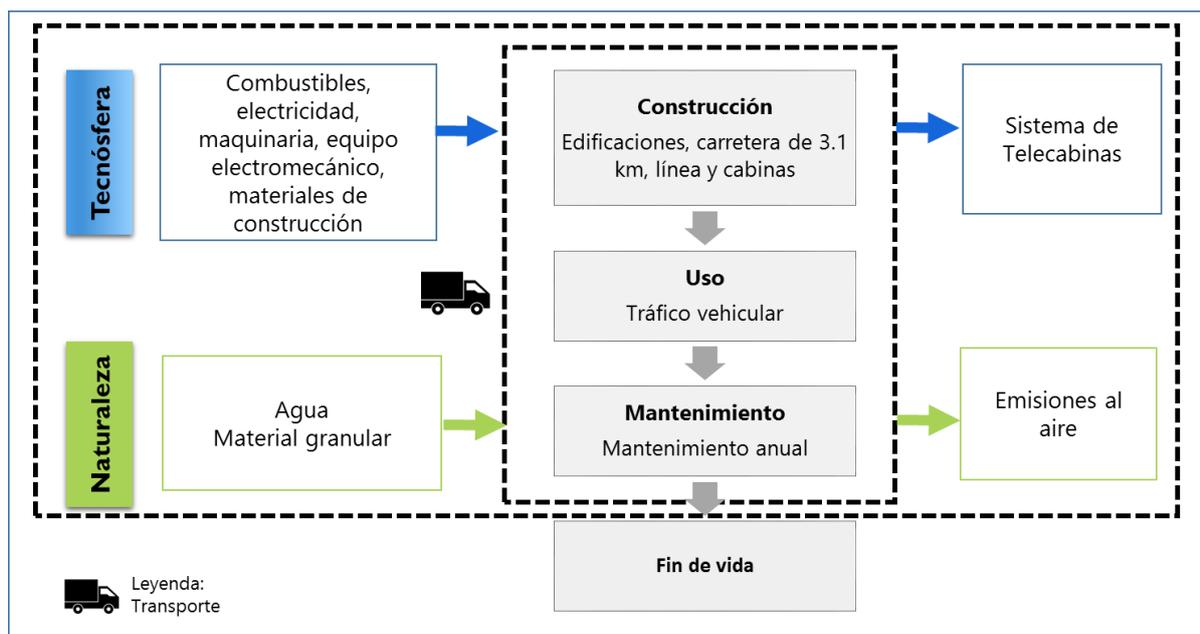


Figura 3.4. Límites del Sistema 2 – Telecabinas Kuélap.
Elaboración propia.

3.2. Inventario de Ciclo de Vida

En esta etapa se compilan y cuantifican las entradas (requerimientos de energía y materias primas) y salidas del proceso (emisiones a la atmósfera, residuos sólidos) durante su ciclo de vida. Los datos fueron tomados teniendo como información primaria, mediciones realizadas en la visita a campo y como información secundaria a Ecoinvent® v.3.4, la base de datos europea más completa y de mayor calidad (Aranda, 2010). Esta base de datos, desarrollada por el Swiss Center for Life Cycle Inventories, reúne datos de inventario de ciclo de vida para diferentes sectores: energía, transporte, materiales de producción, compuestos químicos, productos agrícolas, entre otros.

Los datos recolectados fueron utilizados para cuantificar las entradas y salidas de cada actividad del proceso. El resultado es un inventario completo que presenta las cantidades de contaminantes liberados al ambiente y la cantidad de energía y materiales consumida (SAIC, 2006). En esta etapa es necesario considerar la naturaleza iterativa del ACV pues las decisiones referentes a los datos a incluir se basarán en un análisis de sensibilidad para determinar su importancia. Por lo tanto, el límite inicial del sistema podría ir variando (ISO, 2006).

3.2.1. Recolección de datos

Teniendo en cuenta que el pensamiento de ciclo de vida considera todas las etapas del proceso desde la adquisición o generación de materias primas a partir de recursos naturales

hasta el vertido final de residuos (ISO, 2006), se levantó información referente a ambos proyectos mediante revisiones a los expedientes técnicos de los mismos. Asimismo, se llevó a cabo una visita de campo en el mes de noviembre del 2017, en la cual se realizó el recorrido hacia la Zona Arqueológica Monumental Kuélap por carretera y por teleférico. En dicha visita, se corroboraron los datos de los documentos técnicos y se obtuvo el material fotográfico correspondiente a ambos proyectos de infraestructura. Además, se coordinaron entrevistas con los agentes involucrados tales como autoridades regionales y representantes de las unidades ejecutoras para la obtención de información técnica. A continuación, los datos fueron divididos en información primaria y secundaria.

Datos Primarios:

Se tuvo acceso a expedientes técnicos y documentos referentes a los proyectos en estudio mediante la Ley N°27806 “Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública”. De esta manera, se obtuvo información del Gobierno Regional de Amazonas, el Ministerio de Cultura y Plan COPESCO Nacional, entidad encargada de la ejecución de infraestructura turística en el país.

a) Telecabinas

Los datos referentes a la construcción de las telecabinas en el periodo comprendido entre los años 2015 - 2017 fueron obtenidos principalmente del expediente técnico del Proyecto de Inversión Pública con código SNIP 268002: “Mejoramiento de los servicios turísticos públicos Zona Arqueológica Monumental de Kuélap, distrito de Tingo, provincia de Luya” de Plan COPESCO Nacional. Asimismo, para afinar algunos datos, se realizó un cuestionario y entrevista al Gerente del Proyecto. También se programó una visita de campo en el mes de noviembre de 2017 con el fin de corroborar la información de los documentos técnicos. En cuanto a la operación, el registro del número de visitantes a Kuélap en el 2017-2018, usuarios de las telecabinas y las proyecciones de visitantes en los próximos años se obtuvieron de la Dirección de Turismo del Gobierno Regional de Amazonas y del portal web del Ministerio de Cultura (MC, 2018).

b) Carretera

Se contó con los expedientes técnicos de los proyectos “Mantenimiento periódico (mecanizado manual) ruta AM – 111, longitud 12 + 000 km Emp. PE – 08b – Tingo – Longuita - María Kuélap” y “Mejoramiento del servicio de transitabilidad vehicular, carretera a Kuélap desde la progresiva km 0+000 hasta la Estación de Embarque Teleférico”. De igual manera, el plano topográfico de la carretera en estudio se

obtuvo del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Por otra parte, datos referentes al tráfico vehicular se obtuvieron del “Estudio de Tráfico Nuevo Tingo - Kuélap para el proyecto de implementación de telecabinas” encargado por el Ministerio de Cultura en el año 2008 (MC, 2008). Adicionalmente, se realizó el recorrido por carretera, donde se comprobaron las condiciones del estado actual de la misma y se reunió el material fotográfico correspondiente.

Datos secundarios:

Se utilizó información procedente de bases de datos como Ecoinvent ® v.3.4, revistas locales y fichas técnicas de los equipos electromecánicos de POMAGALSKI. Por otra parte, el modelado de emisiones vehiculares resultantes del tráfico vehicular siguió los lineamientos de la “Guía de Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos” actualizada a junio del 2017 del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación de la Agencia Europea del Medio Ambiente, EMEP- EEA, por sus siglas en inglés. Para las emisiones de material particulado se utilizaron diferentes manuales descritos en el capítulo siguiente. Por otro lado, el consumo por hora y la vida útil de la maquinaria de construcción se obtuvieron de la publicación correspondiente de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO, 2011).

3.2.2. Carretera Tingo – Kuélap - Ruta AM 111

La carretera Tingo - Kuélap pertenece a la Red Vial Departamental Ruta AM-111 y une el distrito de Nuevo Tingo con la comunidad de Kuélap. Se modelaron las etapas de construcción, uso y mantenimiento.

3.2.2.1. Construcción

Para la elaboración del ICV, se solicitó el expediente técnico de la construcción de la vía a la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de Amazonas. No obstante, la entidad refirió no contar con el mismo debido a la antigüedad de la obra. Por tal motivo, para analizar algunos procesos en la etapa de construcción, y con el fin de lograr obtener datos próximos a los reales, se optó por generar un rediseño del tramo con el uso del software CIVIL3D.

La unidad de referencia considerada fue el tramo de 33.13 km de la vía en estudio. Se rediseñó la carretera en CIVIL 3D siguiendo la ruta original a partir de la Carta Nacional del cuadrante 13-H en escala 1/100000 proporcionada por el IGN. Para la mayoría de parámetros requeridos, se adoptaron los lineamientos del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (MTC, 2014). Para aquellos restantes, se replicaron las características técnicas

de la vía actual descritas en el expediente técnico de Mantenimiento. Sin embargo, por la antigüedad de la vía, estos no precisamente están acordes con los lineamientos del Manual. Las características adoptadas en el modelo se pueden observar en la Tabla 3.1 y Figura 3.5.

Tabla 3.1. Parámetros de diseño a considerar

| Parámetro | Valor | Observaciones |
|----------------------------------|----------------------|--|
| IMDA | 135 veh/día | - |
| Categoría | Tercera Clase | - |
| Longitud Total | 33.13 km | - |
| Topografía | Tipo 3: accidentada | - |
| Ancho de la calzada (promedio) | 6.6m | - |
| Tipo de pavimento | Afirmado tipo 3 | - |
| Velocidad Directriz | 20 - 25 Km/h | - |
| Cunetas Triangulares s/revestir | 0.60x 0.40 m. | - |
| Pendiente | máx. 6 -8 %, min. 2% | - |
| Radio mínimo | 12 m | - |
| Sobre ancho | 0.30 | - |
| Bombeo de Superficie de Rodadura | 3.5% | - |
| Peralte en Curvas | 6% | - |
| Talud de Corte Roca Suelta | 1:1 | Se adoptó el parámetro del Manual DG 2014 considerando como altura de corte en todo el tramo 5 a 10 m. |
| Talud de relleno Roca Suelta | 1:1.75 | |



Figura 3.5 Capa de revestimiento granular de la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap.
Elaboración propia

Para el modelado de ICV de la fase de construcción solo se consideraron las partidas de movimiento de tierras, colocación de afirmado y obras de arte. El resto de partidas como señalización y seguridad vial no se tomaron en cuenta por su escasa representatividad respecto de las mencionadas en cuanto a uso de materiales.

Movimiento de tierras

Lo más importante en esta fase es el uso de la maquinaria pesada. En el software utilizado para el cálculo de impactos, el cual se detalla en el capítulo 3.3, se modelaron tanto los consumos de combustible requeridos, como los materiales componentes de la maquinaria. Estos últimos fueron obtenidos a partir de la base de datos Ecoinvent ® v.3.4, descrita también en el capítulo siguiente. A continuación, se describe el procedimiento seguido para el cálculo de inventario de maquinaria utilizada.

Los resultados se observan en la Tabla 3.2.

- El análisis del diagrama de masas generado a partir del modelo en CIVIL 3D permitió determinar las distancias recorridas para el corte y relleno de material.
- A partir de las distancias, se determinó el tipo de maquinaria a utilizar según el siguiente criterio: para distancias largas, se usaron volquetes y palas dado que muestran ser más eficientes para estos casos, mientras que para distancias cortas se optó por el uso de cargadores frontales.
- De acuerdo al rendimiento de cada equipo, determinado en base al catálogo de Caterpillar (CAT, 2009), se determinó el número de vehículos a emplear y, en consecuencia, el número de horas máquina necesarias.

Tabla 3.2 Maquinaria usada en la construcción global de 33.13 km de la carretera. Valores de horas máquina fueron obtenidos a partir del modelo generado en CIVIL 3D

| Tipo de maquinaria | Horas máquina (hm) | Tipo de combustible | Consumo por hora (gl/h) | Diésel total (gl) | Vida útil (años) | Vida útil (horas) |
|---|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| CAMION VOLQUETE 15M ³ | 14763 | Diésel | 8.79 | 129770 | 9 | 12500 |
| EXCAVADORA S/ORUGAS 225HP | 10334 | Diésel | 7.5 | 77507 | 5 | 10000 |
| CARGADOR FRONTAL S/LLANTAS 125-155HP 3YD ³ | 3182 | Diésel | 4.6 | 14639 | 5 | 10000 |

Colocación de afirmado y obras de arte

El expediente técnico del mantenimiento periódico de un tramo de la carretera (DRTC- Amazonas, 2018) considera la colocación de una capa de 15 cm de afirmado de similares características a las de la vía original a lo largo de 12 km. Esta información fue aprovechada para preparar el ICV de la colocación de afirmado en la construcción de la carretera. Para ello, los datos fueron extrapolados para los 33.13 km. de vía.

De igual manera, se tomó la información procedente de este documento para el caso de obras de arte (DRTC-Amazonas, 2018). El expediente señala que, dada la nula rehabilitación de la vía desde el 2007, las obras de arte, tanto cunetas como alcantarillas, se encuentran parcial o totalmente colmatadas por incapacidad vertedora. Otras, por su mala ubicación, y drenar hacia terrenos agrícolas, han sido taponadas y clausuradas por los mismos propietarios de dichos terrenos. Por este motivo, el proyecto de mantenimiento (DRTC-Amazonas, 2017) considera la reconstrucción total de las obras de arte. La información detallada sobre la colocación de afirmado y obras de arte se aprecia en las Tablas 3.3 y 3.4. Las características de la vía se ilustran en las Figuras 3.6 y 3.7.



Figura 3.6 Carretera Tingo – Kuélap (AM 111).
Se observa la presencia de arbustos que obstaculizan el paso de los vehículos.
Fuente propia.

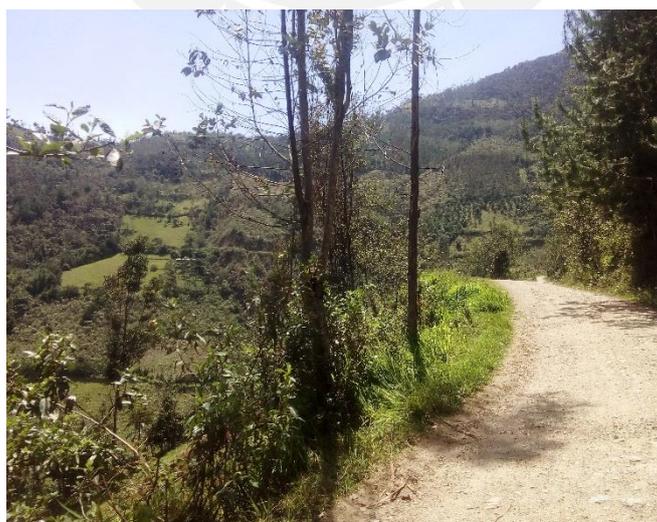


Figura 3.7 Carretera Tingo – Kuélap (AM 111).
Se observa el abismo al lado de la vía.
Fuente propia.

3.2.2.2. Mantenimiento

Los suelos se encuentran deteriorados por efecto del tránsito vehicular, del clima y un deficiente sistema de drenaje debido a la falta de cunetas y alcantarillas que causan escorrentías erosivas al pavimento. El mantenimiento periódico de la carretera afirmada que conduce a la Fortaleza de Kuélap (DRTC-Amazonas, 2018) se realiza con la finalidad de devolver a la plataforma las características de transitabilidad. No se ha realizado mantenimiento alguno desde su última intervención a nivel de rehabilitación realizada por Provías Descentralizado el año 2006 al 2007. En la literatura se indica que el mantenimiento periódico se realiza normalmente cada 4 años. El mantenimiento del expediente técnico con el que se cuenta se realizó después de 12 años por lo que se dividirá entre 3 para considerar un mantenimiento periódico convencional y la correspondiente asignación de vida útil. Como se señaló líneas arriba, los datos de mantenimiento están dados para 12 km de carretera por lo tanto fueron extrapolados para los 33.13 km.

Se consideraron las actividades correspondientes a la conservación de plataforma y taludes, calzada en afirmado drenaje superficial, conservación y reposición de señalización y seguridad vial conservación de puentes. Los datos de ICV se pueden observar en las Tablas 3.3 y 3.4. Por otro lado, el modelado de emisiones de escape vehicular de la maquinaria utilizada en las etapas de construcción y mantenimiento se puede apreciar en el capítulo 3.2.2.4.

Tabla 3.3 Materiales empleados en el mantenimiento de 12 km de la carretera.

| Material | Unidad | Cantidad |
|------------------|----------------|----------|
| Afirmado | m ³ | 15844 |
| Arena gruesa | m ³ | 66.5 |
| Cemento portland | bolsa | 143 |
| Hormigón | m ³ | 5.2 |
| Agua | m ³ | 1670 |

Tabla 3.4 Maquinaria usada en el mantenimiento de 12 km de la carretera.
Valores de horas máquina totales para el proyecto fueron obtenidos del expediente técnico del “Mantenimiento periódico (mecanizado manual) Ruta AM – 111”

| Tipo de maquinaria | Horas máquina (hm) | Tipo de combustible | Consumo por hora (gl) | Diésel total (gl) | Vida útil (años) | Vida útil (horas) |
|--|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| CAMION VOLQUETE 6x4 330 HP 10 M ³ | 703.2 | Diésel | 8.79 | 6181 | 9 | 12500 |
| RODILLO LISO VIBR AUTOPROPULSADO 70-100 HP 7-9 T. | 976 | Diésel | 2.66 | 2596 | 5 | 10000 |
| CARGADOR RETROEXCAVADOR 62 HP 1 YD ³ | 610.8 | Diésel | 2.5 | 1527 | 5 | 10000 |
| RETROEXCAVADORA S/LLANTAS 75 -110 HP 1.3 YD ³ . | 64.53 | Diésel | 2.8 | 180.7 | 5 | 10000 |
| TRACTOR DE ORUGAS DE 300-330 HP | 29.79 | Diésel | 10.3 | 306.8 | 7 | 15000 |
| MOTONIVELADORA DE 125 HP | 976 | Diésel | 4 | 3904 | 7 | 15000 |

3.2.2.3. Uso

Para esta fase se consideraron la producción de combustible y las emisiones derivadas del tráfico vehicular. No existe un peaje en la zona que permita obtener el registro del número de vehículos, por lo que se tomó como referencia la información del “Estudio de Tráfico Tingo Nuevo - Kuélap” realizado antes de la construcción del teleférico. Dicho estudio se realizó en el año 2008 y con el fin de priorizar la calidad de los datos, se optó por modelar el 2008 como año de uso. Por lo tanto, se consideraron las características de la flota vehicular correspondientes a ese año. Asimismo, en ese periodo, el número de visitantes a la Zona Arqueológica fue de 17396 (ver Tabla 3.5). Finalmente, cabe resaltar que para asignar los impactos por pasajeros del sistema global Carretera Nuevo Tingo - Kuélap se utilizó este flujo de visitantes.

Tabla 3.5. Llegada de visitantes al Complejo Arqueológico de Kuélap.
Fuente: Ministerio de Cultura - Dirección Desconcentrada de Cultura – Amazonas.

| 2008 | | | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Mes | Visitantes | | Total |
| | Nacionales | Extranjeros | |
| Enero | 888 | 339 | 1 227 |
| Febrero | 544 | 220 | 764 |
| Marzo | 437 | 289 | 726 |
| Abril | 124 | 149 | 273 |
| Mayo | 595 | 474 | 1 069 |
| Junio | 559 | 331 | 890 |
| Julio | 682 | 1 293 | 1 975 |
| Agosto | 2 797 | 756 | 3 553 |
| Septiembre | 846 | 361 | 1 207 |
| Octubre | 1 310 | 546 | 1 856 |
| Noviembre | 2 075 | 310 | 2 385 |
| Diciembre | 1 146 | 325 | 1 471 |
| Total | 12 003 | 5 393 | 17 396 |

Para los vehículos en circulación en la carretera, los motivos de viaje están divididos en transporte de pasajeros y transporte de carga. Este último consistió en camiones de carga pesada de 2 y 3 ejes destinados al traslado de productos agrícolas. Por otro lado, los motivos de viaje para el transporte de pasajeros fueron principalmente turismo y en menor proporción trabajo (ver Tabla 3.6). Para el estudio sólo se consideró el tráfico vehicular correspondiente al turismo, el cual está compuesto por autos, camionetas y camionetas rurales (combis) (ver Tabla 3.7).

Tabla 3.6 Tipos de transporte en la ruta Nuevo Tingo – Kuélap.

Fuente: Encuestas Origen - Destino pasajeros Kuélap para generar la Matriz de tráfico de pasajeros Origen-Destino. Estudio de Tráfico 2008

| Tipo de Transporte | | | % |
|-------------------------|---------|------|------|
| Transporte de pasajeros | Turismo | 65% | 83% |
| | Trabajo | 35% | |
| | Total | 100% | |
| Transporte de carga | | | 17% |
| Total | | | 100% |

Tabla 3.7 Tipos de vehículos dedicados al turismo en la ruta Nuevo Tingo-Kuélap.
Fuente: Encuestas Origen - Destino pasajeros Kuélap para generar la Matriz de tráfico de pasajeros Origen-Destino. Estudio de Tráfico 2008.

| Tipo de vehículo | Capacidad (personas) | Número de vehículos/día | % |
|------------------|----------------------|-------------------------|------|
| Auto | 4 | 34 | 62% |
| Camioneta | 4 | 11 | 20% |
| Camioneta rural | 15 | 10 | 18% |
| Total | | 55 | 100% |

El material particulado generado por fuentes móviles incluye dos tipos de emisiones. Por un lado, las emisiones de escape, que incluyen material particulado atribuible a procesos relacionados con el motor, como combustión de combustible, quema de aceite y otras partículas expulsadas por el tubo de escape. Por otro lado, las demás emisiones incluyen re-suspensión del polvo de la carretera y desgaste de frenos y neumáticos.

El modelado de emisiones de escape vehicular derivadas de la circulación de autos, camionetas y camionetas rurales se describe a detalle en el capítulo siguiente 3.2.2.4. De igual manera en el capítulo 3.2.2.5, se ilustra el modelado de las partículas de re-suspensión y de desgaste de frenos y neumáticos.

3.2.2.4. Modelado de emisiones de escape vehicular

Las emisiones al aire procedentes de la quema de combustibles fósiles en los vehículos se modelaron siguiendo los lineamientos del capítulo 1.A.3.b del EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016. Esta guía posee 3 niveles de modelado: nivel 1, nivel 2 y nivel 3. La elección de determinado nivel depende del grado de información que se tenga y del uso que se le dará a los resultados de la investigación. Las categorías de vehículo se determinan en base al peso del mismo, como se puede apreciar en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Categoría de vehículo según la clasificación EMEP

| Categoría de vehículo | Clasificación oficial |
|--|--|
| Vehículo de pasajeros - <i>Passenger car (PC)</i> | Vehículos usados para el transporte de pasajeros, con un máximo de 8 asientos, incluido el asiento del conductor |
| <i>Vehículo Comercial Ligero</i> - <i>Light Comercial Vehicle</i> (<i>LCV</i>) | Vehículos para el transporte de carga y con un peso menor a 3.5 toneladas |
| <i>Vehículo de carga pesada</i> - <i>Heavy Duty Vehicles</i> (<i>HDV</i>) | Vehículos para el transporte de carga y con un peso entre 3.5 y 12 toneladas |

El modelado nivel 1 descrito en la ecuación 1, presenta las emisiones en función al consumo de combustible utilizado.

$$E_i = \sum_j (\sum_m (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m})) \dots\dots(1)$$

E_i = emisión del contaminante i (g)

$FC_{j,m}$ = consumo de combustible de vehículo de categoría j usando combustible m (kg)

$EF_{i,j,m}$ = consumo de combustible para un específico factor de emisión del contaminante i para vehículo de categoría j y combustible m (g/kg)

El modelado nivel 2 descrito en la ecuación 2, presenta las emisiones en función a los km. recorridos por vehículo.

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k}) \dots \dots (2)$$

- $E_{i,j}$ = Emisión de contaminante i emitido por el vehículo de categoría j
- $M_{j,k}$ = Distancia anual promedio recorrida por vehículo de categoría j y tecnología k (g/veh-km)
- $N_{j,k}$ = Número de vehículos en la flota de la categoría j y tecnología k
- $E_{i,j}$ = Factor de emisión específico del contaminante i para el vehículo de categoría j y tecnología k (g/veh-km)

Para la fase de construcción, en la partida de movimiento de tierras, se realizó el modelado considerando el nivel 1 y una flota vehicular propia de Perú en 1985 sin normativa EURO. De acuerdo a EMEP, se usarán los factores máximos del nivel 1 en ambos casos que equivalen al peor escenario: sin control de emisiones. Las emisiones se presentan en la Tabla 3.9.

Para la fase de mantenimiento se modelaron las emisiones de acuerdo al nivel 1 y se consideró una flota vehicular correspondiente al apartado de normativa EURO I y posterior. Las emisiones se presentan en la Tabla 3.10.

Para la fase de uso, el modelado de emisiones se realizó utilizando el nivel 2 de la Guía EMEP, como se muestra a continuación en las Tablas N° 3.11 y 3.12. La normativa de emisión EURO de uso predominante para el Perú en el año 2008 es Euro III. Los autos pertenecen a la categoría de Vehículo de Pasajeros – *Passenger Car* (PC) con un consumo de combustible de 55 g/km, mientras que las camionetas y camionetas rurales, pertenecen a la categoría de Vehículo Comercial Ligero - *Light Commercial Vehicle* (LCV) con un consumo de 80 g/km de acuerdo a la Guía EMEP.

Tabla 3.9 Emisiones de maquinaria para la construcción de la carretera.
 Emisiones de Diésel
 Nivel 1
 Vehículo de Carga Pesada
 Emisiones al aire para 1 kg de Diésel
 PRE EURO

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 1.06E+01 | g |
| NMVOC | 3.77E+00 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 3.83E+01 | g |
| PM 2,5 | 1.57E+00 | g |
| Óxido nitroso | 8.90E-02 | g |
| Amoníaco | 1.80E-02 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 7.30E-06 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 3.18E-05 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 2.84E-05 | g |
| Benzo(a)pireno | 4.70E-06 | g |
| Plomo | 1.94E-04 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 3.32E+00 | g |
| Dióxido de carbono (combustible) | 3.14E+00 | kg |
| Dióxido de azufre | 1.00E+01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0.00E+00 | µg |
| Fluoranteno | 1.02E+02 | µg |
| Pireno | 1.50E+02 | µg |
| Perileno | 9.52E-01 | µg |
| Antraceno | 4.12E+01 | µg |
| Benzo(e)pyrene | 9.71E+00 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 1.14E+01 | µg |
| Criseno | 7.73E+01 | µg |
| Fenantreno | 1.10E+02 | µg |
| Naftaleno | 2.70E+02 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 1.62E+00 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 5.19E+01 | pg |
| Arsénico | 4.76E-04 | µg |
| Cadmio | 2.38E-04 | µg |
| Cromo | 4.05E-02 | µg |
| Cobre | 2.71E-02 | µg |
| Mercurio | 2.52E-02 | µg |
| Níquel | 9.52E-04 | µg |
| Selenio | 4.76E-04 | µg |
| Zinc | 8.57E-02 | µg |
| Metano | 3.81E+02 | mg |

Tabla 3.10 Emisiones de maquinaria para el mantenimiento de la carretera.
 Emisiones de Diésel
 Nivel 1
 Vehículo de Carga Pesada
 Emisiones al aire para 1 kg de Diésel
 EURO I y posteriores

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 5.73E+00 | g |
| NM VOC | 1.33E+00 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 2.83E+01 | g |
| PM 2,5 | 6.10E-01 | g |
| Óxido nitroso | 3.00E-02 | g |
| Amoníaco | 1.00E-02 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 8.60E-06 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 3.72E-05 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 3.33E-05 | g |
| Benzo(a)pireno | 5.50E-06 | g |
| Plomo | 1.60E-05 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 1.99E+00 | g |
| Dióxido de carbono (combustible) | 3.14E+00 | kg |
| Dióxido de azufre | 1.00E+01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0.00E+00 | µg |
| Fluoranteno | 1.02E+02 | µg |
| Pireno | 1.50E+02 | µg |
| Perileno | 9.52E-01 | µg |
| Antraceno | 4.12E+01 | µg |
| Benzo(e)pireno | 9.71E+00 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 1.14E+01 | µg |
| Criseno | 7.73E+01 | µg |
| Fenantreno | 1.10E+02 | µg |
| Naftaleno | 2.70E+02 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 1.62E+00 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 6.00E+01 | pg |
| Arsénico | 4.76E-04 | µg |
| Cadmio | 2.38E-04 | µg |
| Cromo | 4.05E-02 | µg |
| Cobre | 2.71E-02 | µg |
| Mercurio | 2.52E-02 | µg |
| Níquel | 9.52E-04 | µg |
| Selenio | 4.76E-04 | µg |
| Zinc | 8.57E-02 | µg |
| Metano | 3.81E+02 | mg |

Tabla 3.11 Emisiones de PC correspondientes a 1 km de carretera. Emisiones de Diésel
 Nivel 2 – Vehículo de pasajeros
 Emisiones al aire
 EURO 3
 Consumo de Diésel: 55 g/km

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 8.90E-02 | g |
| NMVOC | 2.00E-02 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 7.73E-01 | g |
| PM 2,5 | 3.91E-01 | g |
| Óxido nitroso | 7.00E-03 | g |
| Amoníaco | 1.00E-03 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 1.62E-06 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 1.53E-06 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 1.95E-06 | g |
| Benzo(a)pireno | 1.74E-06 | g |
| Plomo | 1.82E-05 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 4.64E-01 | kg |
| Dióxido de carbono (combustible) | 1.73E-01 | kg |
| Dióxido de azufre | 5.50E-01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0.00E+00 | µg |
| Fluoranteno | 3.83E+01 | µg |
| Pireno | 3.90E+01 | µg |
| Perileno | 4.10E-01 | µg |
| Antraceno | 8.65E+00 | µg |
| Benzo(e)pyrene | 2.71E+00 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 7.53E+00 | µg |
| Criseno | 2.76E+01 | µg |
| Fenantreno | 6.51E+02 | µg |
| Naftaleno | 1.37E+00 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 5.60E-01 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 1.22E+01 | Pg |
| Arsénico | 1.00E-04 | µg |
| Cadmio | 5.00E-05 | µg |
| Cromo | 8.50E-03 | µg |
| Cobre | 5.70E-03 | µg |
| Mercurio | 5.30E-03 | µg |
| Níquel | 2.00E-04 | µg |
| Selenio | 1.00E-04 | µg |
| Zinc | 1.80E-02 | µg |
| Metano | 0.00E+00 | mg |

Tabla 3.12 Emisiones de LCV correspondientes a 1 km de carretera.

Emisiones de Diésel
 Nivel 2 – Vehículo Comercial Ligero
 Emisiones al aire
 EURO 3
 Consumo de Diésel: 80 g/km

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 4.73E-01 | g |
| NM VOC | 9.40E-02 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 1.03E+00 | g |
| PM 2,5 | 7.83E-02 | g |
| Óxido nitroso | 9.00E-03 | g |
| Amoníaco | 1.20E-03 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 7.00E-07 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 1.90E-07 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 6.00E-07 | g |
| Benzo(a)pireno | 6.30E-07 | g |
| Plomo | 4.17E-06 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 4.64E-01 | g |
| Dióxido de carbono (combustible) | 2.51E-01 | kg |
| Dióxido de azufre | 8.00E-01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0.00E+00 | µg |
| Fluoranteno | 3.83E+01 | µg |
| Pireno | 3.90E+01 | µg |
| Perileno | 4.10E-01 | µg |
| Antraceno | 8.65E+00 | µg |
| Benzo(e)pyrene | 2.71E+00 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 7.53E+00 | µg |
| Criseno | 2.76E+01 | µg |
| Fenantreno | 6.51E+02 | µg |
| Naftaleno | 1.37E+00 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 5.60E-01 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 1.22E+01 | pg |
| Arsénico | 1.00E-04 | µg |
| Cadmio | 5.00E-05 | µg |
| Cromo | 8.50E-03 | µg |
| Cobre | 5.70E-03 | µg |
| Mercurio | 5.30E-03 | µg |
| Níquel | 2.00E-04 | µg |
| Selenio | 1.00E-04 | µg |
| Zinc | 1.80E-02 | µg |
| Metano | 0.00E+00 | mg |

3.2.2.5. Modelado de material particulado para una carretera sin pavimentar

Dentro del segundo tipo de emisiones, están las partículas de re-suspensión, procedentes de la pulverización del material de la superficie generada por la fuerza de las ruedas sobre la carretera cuando un vehículo transita sobre una vía sin pavimentar. Las partículas se levantan y caen de las ruedas, y la superficie de la carretera queda expuesta a fuertes corrientes de aire una vez que el vehículo ha pasado. Adicionalmente a las partículas de re-suspensión, dentro de esta clase, se considera el material particulado proveniente de las emisiones del desgaste de frenos y neumáticos, el cual se define como la porción aerotransportada del desgaste que puede crearse por abrasión, corrosión y turbulencia.

El tamaño, la composición química y la velocidad de emisión de las partículas derivadas de dichas fuentes contribuyen a las concentraciones de partículas atmosféricas. Sin embargo, se debe precisar que estas partículas están compuestas de diferentes especies y tamaños que las partículas de escape.

Partículas de re-suspensión

La guía EMEP no incluye modelos de emisiones de partículas para vías sin pavimentar, por lo que para el modelado de las partículas de re-suspensión se recurrió al capítulo 13.2.2 de la guía AP.42 del Environmental Protection Agency (EPA). En el citado documento, se presentan dos ecuaciones distintas según el uso de la carretera. La ecuación 1a permite estimar las emisiones en una carretera de uso industrial sin pavimentar, por lo que será empleada para la fase de construcción de la vía. Mientras que para la fase de uso, se utilizará la ecuación 1b, la cual está indicada para emisiones de carretera de uso público. La cantidad de emisiones de polvo de un determinado tramo de vía sin pavimentar dependen de parámetros específicos, como las condiciones de la carretera y el asociado tráfico vehicular. La determinación de estos parámetros permite la corrección del estimado de emisiones a la carretera específica.

$$E = k \times (s/12)^a \times (W/3)^b \dots\dots (1a)$$

$$E = \frac{k \times (s/12)^a \times (S/30)^d}{(M/0.5)^c} - C \dots\dots (1b)$$

E: Factor de emisión de tamaño específico (lb/VMT)

s: Contenido de limo en la superficie (%)

W: Peso promedio del vehículo (ton)

M: Contenido de humedad de la superficie (%)

S: velocidad promedio del vehículo (mph)

C: factor de emisión de escape, desgaste de freno y neumáticos de la flota de vehículos de 1980.

k, a y b: Constantes empíricas

VMT: Milla recorrida por vehículo

VKT: Kilómetro recorrido por vehículo

Tabla 3.13. Constantes para las ecuaciones a y b.

Adaptado de: AP 42. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. EPA, 2006*

| Constante | Carreteras de uso industrial | | Carreteras de uso público | |
|------------|------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | PM 2,5 | PM 10 | PM 2,5 | PM 10 |
| k (lb/VMT) | 0.15 | 1.5 | 0.18 | 1.8 |
| A | 0.9 | 0.9 | 1 | 1 |
| B | 0.45 | 0.45 | - | - |
| C | - | - | 0.2 | 0.2 |
| D | - | - | 0.5 | 0.5 |

“-“ = no usado en la ecuación de factor de emisión

a) Fase de construcción:

Para el contenido de limo en la superficie se tomó el valor de la guía para carreteras de uso industrial en zonas de proyectos de construcción, el cual es de 8.5%. En esta fase se consideró únicamente a la maquinaria pesada, se omitieron los vehículos ligeros utilizados para el transporte del personal a la obra por considerarse su uso mínimo respecto a los vehículos pesados. De este modo, el peso promedio bruto del vehículo a considerar fue de 32 toneladas, tomado del Reglamento Nacional Vehicular (MTC, 2003). Los factores de emisión del manual se convirtieron a unidades del SI considerando que 1lb/VMT = 281.9 g/VK. Al realizar el cálculo se obtuvo los siguientes factores de emisión mostrados en la Tabla 3.14 en unidades de g/km.

Es importante mencionar que para la maquinaria utilizada en la colocación de afirmado de la fase de uso y construcción se contaba con datos globales en horas máquina por lo que no se detallaba la cantidad de kilómetros recorridos por cada volquete o cargador frontal. Para utilizar el factor de emisión calculado se estimó la distancia recorrida por cada equipo teniendo en cuenta la distancia a la cantera respectiva y la capacidad de carga de cada equipo, con lo cual se determinó el recorrido y el número de viajes requeridos.

Tabla 3.14 Factores de emisión de partículas de re-suspensión por tipo de vehículo (g/km).
Basado en: AP 42. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. EPA, 2006.

| Tipo de Vehículo | Factores de Emisión (EPA) | |
|-------------------|---------------------------|--------------|
| | PM2.5 (g/km). | PM10 (g/km). |
| Vehículos pesados | 89.952 | 899.525 |

b) Fase de uso:

Para el contenido de limo en la superficie se tomó el valor de la guía para carreteras de uso público con grava como material predominante en la capa de rodadura, el cual es de 6.4%. La velocidad promedio de 22 km/h se tomó del Estudio de Tráfico, mientras que el contenido de humedad en la superficie se estimó en 10%. Para el valor de C, sustraído en la ecuación, el manual propone utilizar el valor del modelo MOBILE6.2 de la EPA, predecesor del actual MOVES 2014 (ver Tabla 3.15).

Tabla 3.15. Valores de C.
Adaptado de guía MOBILE6.2 de la EPA

| Rango de tamaño de partículas | C: factor de emisión de escape, desgaste de freno y neumáticos de la flota de vehículos de 1980 (lb/VMT) |
|-------------------------------|--|
| PM 2,5 | 0.00036 |
| PM 10 | 0.00047 |

Posteriormente se realizó la conversión de factores de emisión en unidades del SI con lo que se obtuvo los resultados en mg/km mostrados en la Tabla 3.16. Si bien el tráfico vehicular en la fase de uso de la carretera, comprende vehículos livianos y pesados, a lo largo de la presente tesis para la fase de uso de la carretera sólo se analizará el flujo vehicular correspondiente al turismo, el cual está compuesto por vehículos livianos, específicamente autos, camionetas y camionetas rurales (MC, 2008). Al realizar los cálculos, se obtuvieron los factores de emisión mostrados en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Factores de emisión de partículas de re-suspensión por tipo de vehículo (g/km).
Basado en: AP 42. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. EPA, 2006.

| Tipo de Vehículo | Factores de Emisión (EPA) | |
|------------------------------|---------------------------|--------------|
| | PM2.5 (g/km). | PM10 (g/km). |
| Vehículos livianos y pesados | 9.932 | 100.209 |

Partículas del desgaste de frenos

Las ecuaciones de factor de emisión del manual de la EPA sólo estiman partículas de re-suspensión de la superficie de la carretera. Para las emisiones de desgaste de frenos y de los neumáticos, la EPA sugiere estimar los factores por medio del *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) 2014. La utilización de este enfoque elimina la posibilidad de doble conteo de emisiones.

La acción de frenado produce desgaste y la consecuente liberación de una amplia variedad de partículas en el medio ambiente, las cuales dependen principalmente de las características del freno. Existen 2 tipos principales de frenos usados en vehículos convencionales (no híbridos): frenos de disco y frenos de tambor. Ambos utilizan procesos de fricción para resistir el movimiento inercial del vehículo. Asimismo, la composición del forro del freno (*brakeliner*) interviene en la cantidad y la composición de las partículas liberadas. Por un lado, los frenos de disco están revestidos con pastillas de freno, mientras que los frenos de tambor usan zapatas de freno o forros de fricción. Ambos materiales difieren en su tasa de desgaste, el porcentaje de partículas que se transportan en el aire, y el tamaño y la composición de las mismas. El tamaño o la masa total de las pastillas de freno también varían según el tipo de vehículo. Por ejemplo, generalmente, los camiones utilizan frenos más grandes que los vehículos de pasajeros porque la masa del vehículo que se requiere detener es mayor. Adicionalmente, las emisiones también son sensibles a geometría de los frenos, ruedas y llantas, pues el flujo de aire a través de las llantas para enfriar los frenos y los rotores representa un papel clave en las características de desgaste. Otros factores son los patrones de actividad del conductor, donde un estilo de manejo más agresivo naturalmente causará un mayor desgaste y emisiones.

MOVES 2014 presenta una revisión de la literatura de investigaciones relativas a cálculo de emisiones de material particulado provenientes del desgaste de frenos. A la fecha éstas aún son limitadas y lo son aún más aquellas referidas a las distribuciones de tamaño y tipo de partículas generadas. Para el estudio, se tomaron los factores propuestos por Garg et al. y citados en MOVES 2014, dado que diferencian los valores de MP según el tipo de vehículo en autos y camionetas grandes como se muestra. Para el desgaste de frenos y neumáticos, se consideró únicamente el tráfico vehicular correspondiente a la fase de uso, por ser considerablemente mayor en volumen al de la fase de construcción, siendo las emisiones procedentes de esta fase, mínimas. De esta forma, se incluyeron autos, camionetas y camionetas rurales y se obtuvieron las emisiones globales descritas en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Factores de emisión de partículas de desgaste del freno por tipo de vehículo (mg/km) y emisiones globales de partículas de desgaste de freno por viaje.

Adaptado de: MOVES 2014.

| Tipo de Vehículo | Factores de Emisión (Tomado de Garg et al., 2000) | |
|-----------------------------|--|---------------|
| | PM2.5 (mg/km). | PM10 (mg/km). |
| Autos | 3.4 | 4.6 |
| Camioneta grande | 8.9 | 12.1 |
| Nuevo Tingo - Kuélap | Distancia recorrida: 66.26 km | |
| Tipo de Vehículo | Emisiones totales F.E. x Distancia recorrida | |
| | PM 2.5 (mg) | PM10 (mg) |
| Autos | 225.28 | 304.80 |
| Camioneta grande | 589.71 | 801.75 |

Partículas de desgaste de neumáticos

El contacto de fricción entre el neumático y la superficie de la carretera produce el desgaste de los neumáticos. Se genera el desprendimiento de partículas grandes y pequeñas, que luego son liberadas como partículas suspendidas en el aire, depositadas en la superficie de la carretera o retenidas en el cubo de la rueda de forma temporal o permanente hasta ser eliminadas por lavado. Este desgaste se produce a una tasa que depende de una serie de factores.

En primer lugar, la superficie de la carretera provoca fricción y abrasión y, por lo tanto, la rugosidad de la misma afecta directamente a la tasa de desgaste, la cual será mayor para carreteras sin pavimentar como la analizada en la presente investigación. Asimismo, las características de la ruta, el estilo de conducción y las influencias estacionales también influyen en el desgaste de los neumáticos. La ruta y el estilo de conducción determinan los valores de aceleración, cuya intensidad aumenta el desgaste de los neumáticos. La aceleración del vehículo determina las fuerzas aplicadas al neumático y, el desgaste debido a la interface neumático-superficie de rodadura está determinado por y es directamente proporcional a estas fuerzas (Le Maître, 1998). Características de la geometría de la carretera como la variación de pendiente son un factor clave que aumenta el desgaste de la banda de rodadura. Por otro lado, las características estacionales como variaciones de temperatura y humedad también tienen relevancia. Por ejemplo, las tasas de desgaste son más bajas en condiciones húmedas en comparación con las secas. Finalmente, también intervienen las características del vehículo como el peso, la suspensión, la geometría de la dirección y el material y de manera significativa el diseño de los neumáticos: la forma del neumático (definida como la rigidez), el volumen de caucho y el tipo de goma, etc. Debido a

las diferentes especificaciones de fabricación, las diferentes marcas de neumáticos se desgastan a diferentes velocidades.

Para determinar las emisiones de partículas provenientes del desgaste de los neumáticos se emplearon los factores de emisión provenientes del modelo generado para diferentes tipos de vehículos en condados urbanos de Estados Unidos propuesto por MOVES 2014. La limitación respecto de la carretera analizada radica en su característica de entorno rural. El modelo diferencia tipos de vehículos ligeros y de carga pesada como se aprecia en la Tabla 3.19. Para este cálculo, nuevamente no se consideró la etapa de construcción y mantenimiento, dado que las emisiones provenientes de estas fases fueron despreciables en comparación con las de la fase de uso.

Tabla 3.18. Factores de emisión de partículas de desgaste de neumáticos por tipo de vehículo (mg/km) y emisiones globales de partículas de desgaste de neumáticos por viaje. Adaptado de: MOVES 2014.

| Tipo de Vehículo | Factores de Emisión (Tomado de MOVES 2014) | |
|---------------------------|---|---------------|
| | PM2.5 (mg/km). | PM10 (mg/km). |
| Auto | 0.9 | 6.1 |
| Camioneta/Camioneta rural | 0.9 | 6.2 |
| Vehículo de carga pesada | 1.9 | 12.8 |
| Nuevo Tingo - Kuélap | Distancia recorrida: 33.13 km | |
| Tipo de Vehículo | Emisiones totales FE x Distancia recorrida | |
| | PM 2.5 (mg) | PM10 (mg) |
| Auto | 61.76 | 403.5 |
| Camioneta/Camioneta rural | 61.76 | 411.7 |
| Vehículo de carga pesada | 127.6 | 848.1 |

Finalmente las consideraciones de los capítulos 3.2.2.4 Modelado de emisiones de escape vehicular y 3.2.2.5 Modelado de emisiones de material particulado se describen en la Tabla 3.20.

Tabla 3.19 Resumen de consideraciones en el modelado de emisiones. Se muestra el nivel y el estándar de emisiones EURO utilizada para el modelado en la carretera

| Fase | Emisiones de escape vehicular | | Emisiones de material particulado | | |
|---------------|--|------------|---|------------------------|--------------------|
| | | | Partículas de re-suspensión | Desgaste de neumáticos | Desgaste de frenos |
| Construcción | Maquinaria | TIER 2 | Solo volquetes | - | - |
| | | PRE EURO | | | |
| Uso | Autos, camionetas, camionetas rurales (combis) | TIER 2 | Autos, camionetas y camionetas rurales (combis) | | |
| | | EURO 3/III | | | |
| Mantenimiento | Maquinaria | TIER 1 | Solo volquetes | - | - |
| | | EURO III | | | |

3.2.3. Telecabinas

3.2.3.1. Construcción y mantenimiento

Se consideró la construcción de la Estación de Embarque, Andén de Salida, Andén de Llegada, las cabinas, las torres y el equipo electromecánico. A estos tres últimos componentes se les hará referencia de manera global como la Línea. Se incluyeron los materiales de construcción y accesorios correspondientes a las partidas de estructuras, arquitectura, instalaciones eléctricas y sanitarias, los cuales serán detallados en los subcapítulos siguientes. Además, se consideraron los equipos y el combustible usado en su construcción. Por otro lado, los datos relativos a la maquinaria utilizada se tomaron del expediente técnico y se muestran a continuación en la Tabla 3.20.

En cuanto al mantenimiento, el concesionario refirió el uso de aceites y grasas para el funcionamiento del sistema. Sin embargo, al ser utilizados en cantidades mínimas, no fueron considerados en el estudio.

Tabla 3.20 Maquinaria usada en la construcción global de 3.13 km de carretera. Valores de horas máquina fueron obtenidos a partir del modelo generado en CIVIL 3D.

| Tipo de maquinaria | Horas máquina (hm) | Tipo de combustible | Consumo (gl/h) | Diésel total (gl) | Vida útil (años) | Vida útil (horas) |
|---|--------------------|---------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|
| CAMION VOLQUETE 15M ³ | 956.1 | Diésel | 8.79 | 8404 | 9 | 12500 |
| CAMION CISTERNA 4000 GLN | 106.6 | Diésel | 5.59 | 596 | 6 | 6900 |
| RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 70-100HP 7-9 TON | 106.6 | Diésel | 2.66 | 283.6 | 5 | 10000 |
| CARGADOR FRONTAL S/LLANTAS 125-155HP 3Y3 S/OP | 268.9 | Diésel | 4.6 | 1237 | 5 | 10000 |
| EXCAVADORA S/ORUGAS 225HP | 262.5 | Diésel | 7.5 | 1969 | 5 | 10000 |
| MOTONIVELADORA DE 130-135 HP | 106.6 | Diésel | 4.75 | 506.5 | 7.5 | 15000 |

3.2.3.1.1. Estación de Embarque

La Estación de Embarque es el centro de recepción al turista y está ubicada a pocos metros de la plaza principal de Nuevo Tingo (177820.7760 m, 9294301.2340 m). Aquí se organiza a los grupos y se prepara preliminarmente al turista con la información de seguridad. La edificación, con un área de 668.3 m², cuenta con dos niveles (ver Figura 3.8). El acceso principal y público se da por el nivel bajo, y el acceso de los autobuses que conectan la estación con el Andén de Salida por el nivel alto. En el primer piso cuenta con un área para oficinas y almacenes del concesionario y un área de estacionamiento para el público, asimismo cuenta con SSHH para los empleados. El segundo nivel tiene áreas para los visitantes, boletería, cafetería, una zona de espera y SSHH. En los exteriores se encuentran veredas, rampas y escaleras externas. En cuanto al techo, en las tres edificaciones está conformado por tijerales de madera con cobertura de paja.

En la elaboración del inventario se consideraron las partidas de estructuras, arquitectura, instalaciones eléctricas y sanitarias. Se realizó el metrado de materiales de cada especialidad. Se excluyeron ciertos materiales por presentarse en cantidades no significativas y de acuerdo a la literatura, por poseer un mínimo impacto ambiental. En la Tabla 3.21 se muestran los datos del ICV.



Figura 3.8 Vista de la Estación de Embarque

Tabla 3.21 Inventario de materiales de la Estación de Embarque. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

| Estación de Embarque | | | |
|----------------------|--------------------------------------|----------------|----------|
| Especialidad | Material | Und | Cantidad |
| Estructuras | Concreto simple - falso piso | m ³ | 25.13 |
| | Concreto simple – piso | m ³ | 49.85 |
| | Concreto simple – columnetas | m ³ | 6.926 |
| | Concreto ciclópeo - cimiento corrido | m ³ | 80.46 |
| | Concreto ciclópeo – sobrecimiento | m ³ | 6.161 |
| | Concreto armado | m ³ | 372.1 |
| | Acero (barras) | kg | 24627 |
| | Madera (triplay fenólico) | m ³ | 23.21 |
| | Madera (estructura de madera) | m ³ | 32.51 |
| | Ladrillo de techo | kg | 22448 |
| Arquitectura | Ladrillos | kg | 88998 |
| | Mortero 1:5 - Asentado de ladrillo | m ³ | 18.65 |
| | Mortero 1:5 – Tarrajeo | m ³ | 36.1 |
| | Mortero 1:5 - Contrapiso | m ³ | 35.58 |
| | Cerámica | kg | 10514 |
| | Piso vinílico | kg | 252 |
| | Polipropileno | kg | 93.66 |
| | Madera – cobertura | m ³ | 16.77 |
| | Pintura látex | kg | 246.2 |
| II.EE. | PVC | kg | 596.7 |
| | Cobre | kg | 93.43 |
| II.SS. | PVC | kg | 239 |

3.2.3.1.2. Carretera Estación de Embarque – Andén de Salida

El tramo de 3.1 kilómetros de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap sirve de conexión entre la Estación de Embarque (177820.7760 m, 9294301.2340 m) y el Andén de Salida (175566.4320 m, 9292729.8080 m). La vía es un tramo. El tiempo de recorrido estimado es de 10 minutos en buses del concesionario con una capacidad de 25 personas.

Para el ICV, la ruta se modeló escalando los valores de la carretera de Nuevo Tingo – Kuélap de 33.13 km. a 3.13 km. Por ende las consideraciones al respecto se encuentran descritas en los capítulos 3.2.2.1 y 3.2.2.2 de Construcción y Mantenimiento, respectivamente. Para la fase de uso se consideró únicamente la circulación de buses con normativa EURO III. Cabe resaltar, que a la fecha se tiene proyectado pavimentar el tramo de carretera. Sin embargo, este proceso no se considerará en el ICV dado que dicho escenario futuro queda fuera de los límites del sistema.

3.2.3.1.3. Andén de Salida

El Andén de Salida es la segunda parada del sistema, y punto de inicio del recorrido en telecabina. Se encuentra ubicado en la margen izquierda de la carretera Tingo-Kuélap y para efectos del estudio, en el km 3+00 del sistema (175566.4320 m, 9292729.8080 m). En esta edificación de 618.2 m² se encuentra parte del equipo electromecánico: la estación motriz, formada por una estructura chasis móvil, montada sobre dos pilares de hormigón armado (ver Figura 3.9). La maquinaria instalada es aérea (grupo motor sobre el chasis de la estación), con cobertura metálica y de policarbonato.

Cuenta con dos niveles: sótano y primer piso. En el sótano están ubicadas las áreas para el transformador de media a baja tensión y el grupo electrógeno. En el primer piso, se tiene el área de embarque y desembarque de los pasajeros, así como el cuarto de control de la telecabina y un área de comedor y baño para los empleados. Cuenta con una zona destinada al estacionamiento y mantenimiento de las 26 cabinas. Además, se ubica la estación de salida o estación motriz propia del sistema de telecabinas.

En la elaboración del inventario se consideró las partidas de estructuras, arquitectura, instalaciones eléctricas y sanitarias. Se realizó el metrado de materiales de cada especialidad. Se excluyeron ciertos materiales del inventario por presentarse en cantidades no significativas y de acuerdo a la literatura poseer mínimo impacto ambiental. En la Tabla 3.22 se muestran los datos del inventario para el Andén de Salida.



Figura 3.9 Construcción del Andén de Salida. Se muestra la colocación de la estación motriz del sistema de telecabinas.

Fuente: ICCGSA

Tabla 3.22. Inventario de materiales del Andén de Salida. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

| Andén de Salida | | | |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|----------|
| Especialidad | Material | Und | Cantidad |
| Estructuras | Concreto simple - falso piso | m ³ | 56.01 |
| | Concreto ciclópeo - cimiento corrido | m ³ | 333.4 |
| | Concreto ciclópeo - muros de gravedad | m ³ | 353.7 |
| | Concreto armado | m ³ | 434.4 |
| | Acero (barras) | kg | 28280 |
| | Acero (conexiones de madera) | kg | 6477 |
| | Madera (Triplay fenólico) | m ³ | 32.49 |
| | Madera (estructura de madera) | m ³ | 49.38 |
| | Acero (estructura metálica) | kg | 13370 |
| | Ladrillo de techo | und | 7714 |
| Arquitectura | Ladrillos | kg | 27560 |
| | Mortero 1:5 - Asentado de ladrillo | m ³ | 7.60 |
| | Mortero 1:5 - Tarrajeo / Contrapiso | m ³ | 14.56 |
| | Mortero 1:5 - Tarrajeo / Contrapiso | m ³ | 28.58 |
| | Ceramic tiles | kg | 2985 |
| | Piso vinílico | kg | 101.2 |
| | Polipropileno | kg | 109.6 |
| | Madera – cobertura | m ³ | 17.69 |
| | Pintura latex | kg | 54.25 |
| II.EE. | PVC | kg | 225.3 |
| | Cobre | kg | 19.68 |
| II.SS. | PVC | kg | 51.26 |

3.2.3.1.4. Andén de Llegada

El Andén de Llegada se encuentra ubicado en la zona denominada “La Malca”, en el km 33+130 (176258.3340 m, 9288737.3800 m). Es la última parada del sistema, y punto de llegada al acceso a Kuélap. La edificación, de un solo nivel, está conformada por la estación de reenvío, de tecnología aérea, la cual está formada por una estructura chasis móvil, montada sobre dos pilares de hormigón armado, con cobertura metálica y de policarbonato (ver Figura 3.10). Además, cuenta con los siguientes ambientes: área de embarque y desembarque de los visitantes, área de control, comedor y SSHH para los empleados.

La cobertura tanto del Andén de Salida como del Andén de Llegada fue pensada para ser un gran gesto tecnológico y a su vez un reencuentro con la tecnología ancestral. La estructura del techo es de madera con nodos, refuerzos y apliques metálicos. Por otro lado, la estructura de los ambientes está recubierta por enchape de piedra, correspondiente al área de atención y servicios.

Se consideraron las partidas de Estructuras, Arquitectura, Instalaciones Eléctricas y Sanitarias y el inventario se elaboró de manera análoga al Andén de Salida, como se puede observar en la Tabla N° 3.23.



Figura 3.10 Construcción del Andén de Llegada.
Fuente: MINCETUR

Tabla 3.23. Inventario de materiales del Andén de Llegada. La unidad de referencia es la construcción global de la edificación.

| Andén de Llegada | | | |
|------------------|--------------------------------------|----------------|----------|
| Especialidad | Material | Und | Cantidad |
| Estructuras | Concreto simple - falso piso | m ³ | 21.96 |
| | Concreto simple - columnetas | m ³ | 2.04 |
| | Concreto ciclópeo - cimienta corrido | m ³ | 32.75 |
| | Concreto ciclópeo - sobrecimientos | m ³ | 3.064 |
| | Concreto armado | m ³ | 105.2 |
| | Acero (barras) | kg | 7948 |
| | Acero (conexiones de madera) | kg | 2382 |
| | Madera (Triplay fenólico) | m ³ | 8.44 |
| | Madera (estructura de madera) | m ³ | 14.63 |
| Arquitectura | Ladrillos muro | kg | 10210 |
| | Mortero 1:4 - Asentado de ladrillo | m ³ | 2.85 |
| | Mortero 1:5 - Tarrajeo / Contrapiso | m ³ | 2.53 |
| | Mortero 1:5 - Tarrajeo / Contrapiso | m ³ | 6.132 |
| | Piso de cerámica | kg | 2698 |
| | Piso vinílico | kg | 60.26 |
| | Polipropileno | kg | 40.07 |
| | Madera | m ³ | 6.01 |
| | Pintura látex | kg | 13.51 |
| II.EE. | PVC | kg | 78.06 |
| | Cobre | kg | 12.58 |
| II.SS. | PVC | kg | 50.08 |

3.2.3.1.5. Línea global

Las estaciones, línea y cabinas forman parte de la obra electromecánica, diseñada y ejecutada por el otro miembro del consorcio: la compañía Pomagalski SA., grupo francés dedicado al diseño, desarrollo e instalación de sistemas de transporte para industrias específicas, con un enfoque especial en transporte de tipo teleférico. Los equipos necesarios para el movimiento del sistema son la estación motriz, ubicada en el Andén de Salida y la estación de retorno, ubicada en el Andén de Llegada. Por otro lado, la línea está compuesta por las zapatas, pedestales, torres de línea y el cable. Asimismo, los vehículos empleados en el sistema son cabinas con capacidad para 8 personas. Para una mejor comprensión del inventario, en este apartado, a todos los componentes mencionados líneas arriba se les hará referencia como la Línea (global), mientras que a las zapatas, pedestales, torres de línea y cable se les hará referencia como la línea. Por otro lado, cabe resaltar que,

en el capítulo 4, el término Línea estará referido también a la Línea global. El diseño de ingeniería básico del sistema está descrito en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24 Características del diseño de la línea.

Fuente: ICCGSA, 2016

| Características | Descripción |
|-----------------------------|--|
| Velocidad de la línea | 0 – 6 metros/segundo |
| Capacidad de diseño | 1000 pasajeros/hora/sentido |
| Cable principal | Cable portador – tractor de acero con núcleo de polietileno |
| Modo de operación | Movimiento continuo, es decir, el cable portador - tractor está constantemente en movimiento y los vehículos contornean las estaciones extremas |
| Principio de funcionamiento | El sistema cuenta con una velocidad mayor en el trayecto entre el andén de salida y andén de llegada, y cuando las cabinas llegan a estos extremos, su velocidad disminuye, éstas se desacoplan del cable a través de sus pinzas, lo que permite el embarque y desembarque de los pasajeros. |

El sistema cuenta con 23 torres de línea o pilonas de acero colocadas a lo largo del perfil de línea (ver Figuras 3.11 y 3.12). Cada torre está compuesta por varios tramos (de 4 a 6), lo cual depende de su altura. Las cimentaciones constan de zapatas de concreto armado, sobre las cuales se encuentran pedestales de concreto, en los que se ha dejado empotrados pernos de anclaje sobre los que se apoya la base de la torre metálica.



Figura 3.11 Pilona del sistema.
Fuente propia



Figura 3.12 Detalle de pedestal de apoyo de una de las pilonas.
Fuente propia

Para el traslado de pasajeros, el sistema cuenta con 26 cabinas compuestas principalmente de acero galvanizado y policarbonato (ver Figura 3.13). Para un mayor detalle de la

composición de las mismas, se tomó como referencia el inventario de la base de datos KBOB que estima el peso promedio de una cabina suiza de capacidad de 35 personas en 2876 kg (BAK 2011). La base de datos asume que la cabina es similar en características al vagón de un tren con la excepción de la presencia de mobiliario en su interior, por lo que escala dichos datos de acuerdo al peso de la cabina. Para el presente estudio, los datos de KBOB se escalan de acuerdo al peso de la cabina, la cual corresponde al modelo Diamond de 1150 kg con capacidad para 8 personas (Gangloff, 1990).

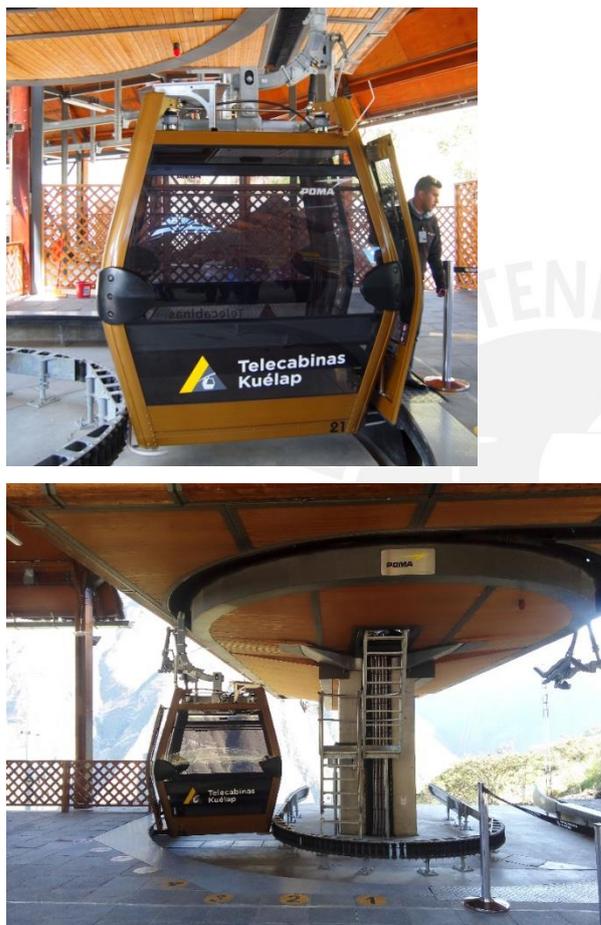


Figura 3.13 Cabinas del sistema con capacidad para 8 personas.
Fuente propia

Traslado de materiales

Se utilizaron 2 helicópteros, cada una con una distinta función (ver Figura 3.14). Por un lado, el primero, de carga de 11 ton, fue empleado para el montaje de 19 pilonas ubicadas en las laderas de la quebrada del Río Tingo con pendientes muy pronunciadas y de difícil acceso. Cada torre está compuesta por varios tramos (de 4 a 6), cada uno de estos tramos pesa un promedio de 5 a 6 toneladas. Por otro lado, el segundo, de carga de 700kg, se utilizó para el vaciado de concreto en las 23 torres de línea a través de baldes que permitían el traslado de 1/4 de cubo de concreto en cada vuelo. Para las bases de las pilonas se

requería aproximadamente 60 cubos en cada una, por lo que el helicóptero debía hacer 240 viajes, realizados en dos a tres días, dependiendo en gran medida del clima. En base a las consideraciones descritas, para la elaboración del ICV se estimó el número de horas de vuelo en helicóptero en 32 horas para el montaje de pilonas y 550 horas para el vaciado de concreto. Asimismo, para el consumo de combustible del helicóptero se consideró aproximadamente 25 kg/hora de acuerdo a la base de datos Ecoinvent.



Figura 3.14 Traslado en helicóptero de pieza de torre de línea.
Fuente: Sitio web de Telecabinas Kuélap.

Desde la perspectiva de ciclo de vida se debe analizar también el transporte de materiales desde el lugar de producción. De acuerdo con la información proporcionada en entrevistas fue posible conocer que todo el sistema electromecánico del proyecto provenía de Francia. Par ello, se consideró el transporte desde la ciudad de Voreppe, Francia, lugar donde está situada la fábrica hasta el puerto de Le Havre, en el mismo país. Asimismo, se consideró el transporte marítimo de Le Havre, Francia hacia el puerto de Paita, Perú. Finalmente, se incluyó el transporte terrestre de Paita hacia Amazonas. La unidad de medida es tonelada por kilómetro (tkm). Para el cálculo de las distancias de transporte marítimo se utilizó el programa SeaRoutes desarrollado por la compañía Maritime Data Systems (MDS, 2017). Se puede apreciar el detalle del inventario en la Tabla N° 3.25 mostrada a continuación.

Tabla 3.25. Inventario de las estaciones, línea y vehículo. La unidad de referencia es la construcción del total del sistema de telecabinas a lo largo de 4 km. Los datos de vehículo se reportan sólo para 1 cabina.

| Línea global | | | | | |
|--------------|-----------------------|---|----------------|----------|---------|
| Elemento | Componente | Material | Und | Cantidad | |
| Estaciones | Estación motriz | Acero | kg | 90744 | |
| | Estación de retorno | Acero | kg | 78855 | |
| | | Transporte marítimo FR-PAITA | | tkm | 1736330 |
| | | Transporte terrestre PAITA-AM | | tkm | 103964 |
| | | Transporte terrestre VOREPPE-LE HAVRE | | tkm | 127369 |
| Línea | Zapatatas, pedestales | Concreto 280 kg/cm ² | m ³ | 1329 | |
| | | Acero fy= 4200kg/cm ² | kg | 119859 | |
| | Torres de línea | Acero aluminizado | kg | 146208 | |
| | | Transporte marítimo FR-PAITA | tkm | 1496857 | |
| | | Transporte terrestre PAITA-AM | tkm | 89626 | |
| | | Transporte terrestre VOREPPE-LE HAVRE | tkm | 109802 | |
| | Cable | Acero en torones | kg | 69138 | |
| | | Núcleo polietileno STABILO | kg | 7302 | |
| | | Transporte marítimo FR-PAITA | tkm | 782579 | |
| | | Transporte terrestre PAITA-AM | tkm | 46858 | |
| | | Transporte terrestre VOREPPE-LE HAVRE | tkm | 57406 | |
| Vehículo | Cabinas | Acero | kg | 844.5 | |
| | | Aluminio | kg | 73.89 | |
| | | Cobre | kg | 51.9 | |
| | | Polietileno HDPE | kg | 96.33 | |
| | | Vidrio flat | kg | 53.66 | |
| | | Alkyd paint | kg | 9.457 | |
| | | Rock wool | kg | 9.457 | |
| | | Plomo | kg | 10.73 | |
| | | Transporte marítimo FR-PAITA | tkm | 11773 | |
| | | Transporte terrestre PAITA-AM | tkm | 704.9 | |
| | | Transporte terrestre y VOREPPE-LE HAVRE | tkm | 863.6 | |

3.2.3.1. Modelado de emisiones de maquinaria

Las emisiones de la maquinaria pesada se modelaron con el nivel 1 pues de acuerdo a la guía es aplicable a países con flota vehicular antigua, como en el caso de Perú. La maquinaria utilizada está comprendida dentro de la clasificación de Vehículos de carga pesada - Heavy Duty Vehicles (HDV), se considerarán los factores de emisión correspondientes al rubro EURO I y posterior considerando la flota vehicular peruana actual

con normativa EURO III. En base a ello se modelaron sus emisiones con la metodología de EMEP mencionada anteriormente en el capítulo 3.2.2.4.

El consumo de combustible por km para un vehículo de carga pesada HDV a Diésel fue tomado de la guía EMEP, la cual presenta un valor de 210 g/km. Finalmente, de acuerdo a los factores de emisión de Nivel 1, se calculó la emisión de cada contaminante, y se obtuvo los resultados de la Tabla 3.26 mostrada a continuación.



Tabla 3.26 Emisiones de maquinaria en el Sistema de Telecabinas.
 Emisiones de Diésel Nivel 1
 Vehículo de Carga Pesada
 Emisiones al aire para 1 kg de Diésel
 EURO I y posterior

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 5.73E+00 | g |
| NMVOC | 1.33E+00 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 2.83E+01 | g |
| PM 2,5 | 6.10E-01 | g |
| Óxido nitroso | 3.00E-02 | g |
| Amoníaco | 1.00E-02 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 8.60E-06 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 3.72E-05 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 3.33E-05 | g |
| Benzo(a)pireno | 5.50E-06 | g |
| Plomo | 1.60E-05 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 1.99E+00 | g |
| Dióxido de carbono (combustible) | 3.14E+00 | kg |
| Dióxido de azufre | 1.00E+01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0.00E+00 | µg |
| Fluoranteno | 1.02E+02 | µg |
| Pireno | 1.50E+02 | µg |
| Perileno | 9.52E-01 | µg |
| Antraceno | 4.12E+01 | µg |
| Benzo(e)pyrene | 9.71E+00 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 1.14E+01 | µg |
| Criseno | 7.73E+01 | µg |
| Fenantreno | 1.10E+02 | µg |
| Naftaleno | 2.70E+02 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 1.62E+00 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 6.00E+01 | pg |
| Arsénico | 4.76E-04 | µg |
| Cadmio | 2.38E-04 | µg |
| Cromo | 4.05E-02 | µg |
| Cobre | 2.71E-02 | µg |
| Mercurio | 2.52E-02 | µg |
| Níquel | 9.52E-04 | µg |
| Selenio | 4.76E-04 | µg |
| Zinc | 8.57E-02 | µg |
| Metano | 3.81E+02 | mg |

3.2.3.2. Funcionamiento

Para la vida útil del sistema se consideró un periodo de 20 años de acuerdo a información de la literatura (KBOB, 2016). Cabe resaltar que esta se podría extender de acuerdo al mantenimiento del sistema. En la fase de operación se consideró la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de las cabinas, estimada en 1200 kWh por día. El funcionamiento es de martes a domingo y feriados de 8 a 4 pm. Los días lunes se realiza el mantenimiento preventivo programado y una semana al año se realiza el mantenimiento anual programado (Telecabinas Kuélap, 2018). Por tal motivo, se consideraron 313 días efectivos de funcionamiento al año.

Para el escenario de línea base, se consideró la matriz eléctrica del departamento de Amazonas, compuesta en un 97% por energía hidráulica y un 3% de energía térmica. Para realizar la asignación por UF de los visitantes se tomó el registro de pasajeros transportados por el sistema de telecabinas de MINCETUR. Dado que el sistema de telecabinas fue inaugurado en marzo del 2017, no se tuvo un registro total anual, por lo tanto para completar la información de los primeros meses del año, se tomó los valores del 2018. Cabe precisar que para generar un escenario en el que la afluencia de visitantes no se vea influenciada por la novedad del proyecto, para el 2017 se tomó los valores a partir del mes de agosto (ver Tabla 3.27).

De igual modo, en esta etapa se consideraron los buses que circulan en el tramo EE-AS. Sus emisiones se modelaron de acuerdo al nivel 2 de la guía EMEP y considerando la normativa de emisión EURO III. Los resultados se presentan en la Tabla 3.28.

Tabla 3.27 Pasajeros transportados por el sistema turístico de telecabinas hacia el Complejo Arqueológico de Kuélap.

Fuente: Comité de Promoción de la Inversión Privada. ELABORACIÓN: MINCETUR/VMT/DGIETA

| Año | Mes | Visitantes (Nacionales y extranjeros) |
|--------------|------------|--|
| 2018 | Enero | 14 554 |
| | Febrero | 9 694 |
| | Marzo | 10 592 |
| | Abril | 5 480 |
| | Mayo | 6 908 |
| | Junio | 7 395 |
| | Julio | 15 726 |
| 2017 | Agosto | 18 986 |
| | Septiembre | 10 731 |
| | Octubre | 11 377 |
| | Noviembre | 10 854 |
| | Diciembre | 8 997 |
| Total | | 131294 |

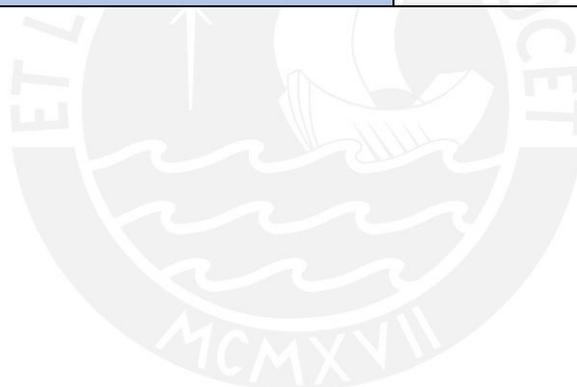


Tabla 3.28 Emisiones de los buses en circulación del tramo EE-AS correspondientes a 1km de carretera.

Emisiones de Diésel Nivel 2
 Vehículo de Carga Pesada - Bus
 Emisiones al aire para 1 kg de Diésel
 EURO I y posteriores
 Consumo de Diésel: 301 g/km

| Sustancia | Cantidad | Unidad |
|----------------------------------|----------|--------|
| Monóxido de carbono | 2.67 | g |
| NMVOC | 0.409 | g |
| Óxidos de nitrógeno | 9.38 | g |
| PM 2,5 | 0.207 | g |
| Óxido nitroso | 0.001 | g |
| Amoníaco | 0.029 | g |
| Indeno(1,2,3-cd)pireno | 1.40E-06 | g |
| Benzo(k)fluoranteno | 6.09E-06 | g |
| Benzo(b)fluoranteno | 5.45E-06 | g |
| Benzo(a)pireno | 9.00E-07 | g |
| Plomo | 1.62E-05 | g |
| Dióxido de carbono (aceite) | 0.861 | g |
| Dióxido de carbono (combustible) | 0.94514 | kg |
| Dióxido de azufre | 3.01 | g |
| Benzo(g,h,i)fluoranteno | 0 | µg |
| Fluoranteno | 21.39 | µg |
| Pireno | 31.59 | µg |
| Perileno | 0.2 | µg |
| Antraceno | 2.04 | µg |
| Benzo(e)pyrene | 2.39 | µg |
| Benzo(a)antraceno | 16.24 | µg |
| Criseno | 23 | µg |
| Fenantreno | 56.66 | µg |
| Naftaleno | 8.65 | µg |
| Dibenz(a,h)antraceno | 0.34 | µg |
| Bifenilpoliclorado | 12.6 | pg |
| Arsénico | 0.0001 | µg |
| Cadmio | 5.00E-05 | µg |
| Cromo | 0.0085 | µg |
| Cobre | 0.0057 | µg |
| Mercurio | 0.0053 | µg |
| Níquel | 0.0002 | µg |
| Selenio | 0.0001 | µg |
| Zinc | 0.018 | µg |
| Metano | 80 | mg |

3.3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida

La EICV, tercera fase de un ACV, está enfocada en entender y evaluar la magnitud y la significancia de los potenciales impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Para ello proporciona información adicional que será de utilidad para el análisis de los resultados del ICV (ISO 14044). Por otra parte, con los resultados provenientes de la EICV se tiene una base más sólida para hacer comparaciones entre productos, lo cual representa una ventaja para este estudio. Se muestran las diferencias relativas entre los potenciales impactos ambientales de cada opción que permitan determinar cuál podría tener un impacto potencial mayor (EPA, 2006).

Los métodos de EICV describen el mecanismo ambiental de las sustancias emitidas, así como también cuantifican las consecuencias ambientales para una sustancia extraída o emitida. Están compuestos por categorías, las cuales pueden ser denominadas midpoint o endpoint. Los indicadores midpoint permiten caracterizar diferentes problemas ambientales, como el cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, la formación de ozono fotoquímico, la acidificación, la eutrofización y el agotamiento de los recursos. Por otro lado, los indicadores endpoint se refieren a categorías de daños reales, como daños a los recursos, daños a la salud humana y daños en el ecosistema (Buonocore et al, 2016).

ReCiPe, IPCC, CML y TRACI son algunos ejemplos de métodos de EICV. ReCiPe 2016 posee 18 categorías de impacto midpoint y 3 endpoint, como se puede observar en la Figura 3.15 mientras que IPCC 2013, desarrollado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, sólo incluye la categoría de impacto midpoint de Cambio Climático.



Figura 3.15 Categorías de impacto de ReCiPe 2016.

Fuente: ReCiPe 2016

Elementos obligatorios y opcionales forman parte de la EICV, los cuales son detallados a continuación en la Figura 3.16.

| Componentes de la EICV | |
|---|--|
| Obligatorios | Opcionales |
| <p>Selección</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identificación de categorías de impacto y métodos de caracterización | <p>Normalización</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación del valor de los resultados de los indicadores de categoría con respecto a la información de referencia. |
| <p>Clasificación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asignación de los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas. | <p>Agrupación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Clasificación y posible jerarquización de las categorías de impacto. |
| <p>Caracterización</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de resultados del indicador de la categoría mediante la conversión de los resultados del ICV a través de los Factores de Caracterización. | <p>Ponderación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversión y posible agrupación de resultados de indicadores de categorías de impacto usando factores numéricos basados en opciones valorativas. |
| | <p>Análisis de calidad de datos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de gravedad • Análisis de incertidumbre • Análisis de sensibilidad |

Figura 3.16. Elementos de la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.

Fuente: ISO14044

Como parte del estudio, sólo se incluyó los componentes obligatorios. En estudios futuros se podrá realizar un Análisis de Calidad de los Datos, el cual mediante diferentes técnicas hace posible una mejor comprensión de la fiabilidad de los resultados de los indicadores. Por un lado, está el Análisis de Sensibilidad, el cual determina cómo los cambios en los datos y las opciones metodológicas afectan los resultados de la EICV (ISO, 2006). Por otro lado, está el Análisis de Incertidumbre, el cual determina cómo las incertidumbres en los datos y las suposiciones intervienen en los cálculos y cómo afectan la confiabilidad de los resultados de la EICV.

Existen una amplia variedad de herramientas de software disponibles para llevar a cabo un ACV. Estas tienen como componentes principales la presencia y variedad tanto de bases de datos, como de métodos de EICV (IHOBE, 2009). Algunos de estos programas son GaBi, Umberto, OpenLCA y SimaPro. En el estudio, se utilizará SimaPro v8.4.0 Analyst (PRé Consultants, 2018). El programa, desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, permite realizar el ACV mediante el uso de bases de datos de inventario generadas por el propio usuario o provenientes de fuentes bibliográficas como el caso de Ecoinvent ® v.3.4, base de datos utilizada en la presente investigación. Por otro lado, posee integrados los métodos de EICV como ReCiPe, IPCC, CML, TRACI, entre otras.

SimaPro v8.4.0 Analyst asigna los datos procedentes del ICV a cada categoría de impacto (clasificación). A continuación, efectúa la conversión de dichos datos en unidades comunes dentro de cada categoría de impacto mediante el uso de factores de caracterización (caracterización). Dichos factores varían según el método de evaluación de impactos elegido.

3.3.1. Selección de categorías de impacto

Se utilizó la metodología ReCiPe 2016, de la que se eligieron 5 categorías de impacto midpoint. Por otro lado, para la categoría de cambio climático no se utilizará la categoría ofrecida por ReCiPe 2016 dado que esta se basa en la metodología de IPCC 2013. Por tal motivo, se preferirá utilizar la fuente original, la metodología proveniente de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático: IPCC 2013.

La selección de categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de caracterización usados en la metodología de EICV debe ser consistente con el objetivo del estudio (ISO 14044). Asimismo, se deben cubrir todos los problemas ambientales relevantes. Las categorías deben ser independientes entre sí para evitar doble conteo. Los métodos para la caracterización deben ser científicamente aprobados y debe existir una forma de conectar los resultados de inventario a las categorías. Siguiendo las indicaciones

mencionadas provenientes de la ISO14044 se escogieron las categorías de impacto a evaluar mostradas en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29 Categorías de impacto consideradas en el ACV realizado y justificación

| | |
|--|--|
| Calentamiento global | Las consecuencias del efecto invernadero incluyen un aumento de la temperatura que conduce a cambios climáticos regionales y al deshielo de los casquetes polares y glaciares, lo que resulta en niveles elevados del mar. Esta categoría, considerada frecuentemente en los estudios de ACV, fue incluida debido a los compromisos del Perú en el Tratado de París y la relevancia de la problemática a nivel mundial. |
| Formación de material particulado | La presencia de material particulado en el aire, especialmente con un diámetro menor a 2,5 μm (PM2.5), es la causante de enfermedades respiratorias (OMS 2003). Los resultados en esta categoría producto de obras de infraestructura son relevantes debido a la utilización de maquinaria pesada y las características del terreno de acceso a la zona (ruta no pavimentada). |
| Formación de oxidantes fotoquímicos | El ozono no se emite directamente a la atmósfera, pero se forma como resultado de reacciones fotoquímicas de NO_x y compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOCs). (EPA, 2005). Representa un peligro para la salud humana y el crecimiento de la vegetación (Gerosa et al., 2015). El considerable número de emisiones de NMVOCs producto del tráfico vehicular en la carretera AM-111 propició la inclusión de esta categoría. |
| Acidificación terrestre | La acidificación es causada por la liberación de protones en los ecosistemas terrestres o acuáticos. Sus efectos en ambiente terrestre son lixiviación de metales tóxicos de suelos y roca, daño a bosques y a edificios. Los contaminantes acidificantes más importantes son el SO_2 , NO_x y NH_3 . |
| Eutrofización de aguas dulces | Niveles altos de nutrientes en el agua, mayoritariamente fósforo y nitrógeno generan un incremento de la productividad biológica lo cual resulta en un consumo de oxígeno en los cuerpos de agua. |
| Agotamiento de recursos | Esta categoría involucra al agotamiento de combustibles fósiles y el agotamiento de minerales. Se consideró sólo la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, establecido como el potencial de costo excedente como consecuencia de la adopción de técnicas alternativas de extracción de combustibles fósiles producto de la demanda futura. No se consideró la categoría de agotamiento de minerales. |

Por otra parte, no se consideraron ciertas categorías como agotamiento de ozono estratosférico, pues a la fecha el cumplimiento de los compromisos del Protocolo de Montreal ha frenado la destrucción de la capa de ozono. Asimismo, se excluyeron las categorías de toxicidades, dada la complejidad de su evaluación y el alcance de la tesis. En cuanto al uso del agua, el objetivo de la investigación no es ahondar en un estudio de huella hídrica por lo que la categoría no se analizará. Por otro lado, dado que no ha habido un

cambio de uso de suelo de la zona en los últimos 35 años, no se evaluará la categoría de uso de suelo.

Se pueden apreciar en la Tabla N° 3.30 las categorías de impacto escogidas para el análisis.

Tabla 3.30 Categorías de impacto

| Metodología | Categoría | Factor de caracterización | Sigla |
|-------------|--|---------------------------|----------|
| IPCC 2013 | Calentamiento global | kg CO ₂ eq | GW |
| ReCiPe 2016 | Formación de material particulado | kg PM _{2.5} eq | FPMF |
| | Formación de ozono troposférico (relativo a la Salud Humana) | kg NO _x eq | OF (SH) |
| | Formación de ozono troposférico (relativo a la Calidad del Ecosistema) | kg NO _x eq | OF (Eco) |
| | Acidificación terrestre | kg SO ₂ eq | TA |
| | Eutrofización de aguas dulces | kg P eq | FE |
| | Agotamiento de combustibles fósiles | kg oil eq | FRS |

3.4. Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida

Finalmente, se realizó la Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida a partir del ICV y EICV. En esta etapa se analizan los resultados, se deducen conclusiones y se obtienen recomendaciones a partir de los resultados de las fases anteriores (ISO, 2006). Con la información procedente de la interpretación, se compararon los resultados de ambos Análisis de Ciclo de Vida considerando cada categoría de impacto.

3.5. Análisis de escenarios

Adicionalmente, se sometió al sistema de telecabinas a alteraciones en las variables involucradas para generar escenarios alternativos, descritos a continuación.

Tabla 3.31 Descripción de escenarios analizados

| Escenario | Descripción | Justificación |
|-----------|---|--|
| A1 | Escenario base carretera Nuevo Tingo – Kuélap. | Principal escenario en estudio. |
| A2 | Modificación de número de pasajeros hacia Kuélap considerando el 2016 como año de análisis. | Dado que no fue posible realizar el ACV de la carretera con datos de tráfico vehicular del 2016, se creó el escenario A2 que asignó los impactos de acuerdo al número de visitantes en dicho año, el cual fue casi 5 veces mayor al registrado en el año 2008. |
| B1 | Escenario base telecabinas Kuélap. | Principal escenario en estudio. |
| B2 | Uso de matriz eléctrica nacional. | Se realizó esta modificación con el objetivo de analizar los efectos de la alteración de la matriz eléctrica en otros contextos geográficos. La influencia de las energías renovables en dicha matriz es variable dependiendo de la región analizada. Asimismo, la carga ambiental del funcionamiento del teleférico depende directamente de ello. |
| B3 | Disminución de 15% en el flujo turístico. | Se analizó este escenario con el fin de determinar la influencia de la disminución del flujo turístico en el impacto ambiental de las telecabinas. |
| B4 | Incremento de 15% en el flujo turístico. | Se modificó el número de visitantes de acuerdo a las proyecciones del MINCETUR para los próximos años. En consecuencia, también tuvo que incrementarse de manera directamente proporcional el número de viajes de los buses de la concesión. |
| B5 | Incremento de 30% en el flujo turístico. | En este escenario se modificó el número de visitantes con el objetivo de analizar las consecuencias de un mayor número de visitantes en un horizonte de tiempo mayor al de las proyecciones del MINCETUR. |
| B6 | Uso de buses con normativa EURO IV en la carretera Estación de Embarque – Andén de Salida. | Esta normativa ha sido adoptada en el país para la importación de vehículos a partir de abril de 2018 (MINAM, 2017). Se optó por generar este escenario con el objetivo de analizar los efectos ambientales del cambio de la flota vehicular de la concesión en el tramo EE-AS. |
| B7 | Uso de buses con normativa EURO VI en la carretera Estación de Embarque – Andén de Salida. | A la fecha, la normativa de emisiones EURO VI se encuentra vigente en la Unión Europea. Se consideró oportuno analizar este escenario alternativo dado que en un futuro este estándar de emisiones será utilizado en el Perú. En consecuencia, será útil analizar los impactos derivados de la adopción de este estándar de emisiones. |
| B8 | Uso de buses eléctricos en la carretera Estación de Embarque – Andén de Salida. | El escenario planteado considera la sustitución de buses diésel por buses eléctricos. La alternativa de considerar el uso de buses eléctricos en el tramo EE-AS surge a partir del alto impacto reportado por parte del tráfico vehicular de los buses diésel en dicho tramo. |

CAPÍTULO 4.RESULTADOS

4.1. Carretera Nuevo Tingo – Kuélap

Tráfico vehicular en la carretera

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de impacto ambiental derivados del tráfico para el viaje de ida y vuelta en la carretera Nuevo Tingo – Kuélap, el cual suma un total de 66.26 km. El tiempo de análisis fue considerado de 1 año. Los resultados de este apartado se muestran en función al total de pasajeros que circulan en 1 año, es decir, no se asignaron a la UF de 1 pasajero en un viaje. Se puede apreciar que para todas las categorías el mayor impacto corresponde, en primer lugar, a las emisiones de escape vehicular producto del tráfico de autos (*Passenger Car - PC*) y, en segundo lugar, al tráfico de camionetas y camionetas rurales (*Light comercial Vehicle - LCV*). Por otro lado, las emisiones de partículas provenientes de la re-suspensión del material de la superficie de la vía y del desgaste de neumáticos y frenos fueron responsables de 95% de impacto en la categoría de FPMF.

Tabla 4.1 Impactos ambientales del tráfico vehicular en la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap. Resultados referidos al tráfico vehicular durante 1 año de uso de la vía.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|-------------------------|------------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|-------------|
| | ton CO ₂ eq | ton PM2.5 eq | ton NO _x eq | ton NO _x eq | ton SO ₂ eq | kg P eq | ton oil eq |
| PC | 253 | 0.240 | 0.352 | 0.356 | 0.422 | 1.68 | 25.2 |
| LCV | 72.2 | 0.103 | 0.295 | 0.300 | 0.368 | 1.50 | 22.4 |
| Emisiones de partículas | 0 | 5.93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>Subtotal</i> | <i>325</i> | <i>6.27</i> | <i>0.646</i> | <i>0.656</i> | <i>0.791</i> | <i>3.17</i> | <i>47.6</i> |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Resultados globales para la carretera Nuevo Tingo - Kuélap

En la Tabla 4.2, se presentan los resultados globales para la carretera Nuevo Tingo – Kuélap asignados a la UF. En ese sentido, los impactos obtenidos están referidos a un pasajero en un viaje de ida y vuelta en un año de análisis. Para ello, se consideró la afluencia turística propia del año 2008. De esta manera, se determinó que la fase de uso tuvo el mayor porcentaje de impacto en las categorías de GW y FPMF con valores cercanos al 60 y 80%, respectivamente. Por otra parte, para las categorías de OF, TA y FE la construcción de la carretera fue responsable del mayor impacto con cerca del 60%.

Adicionalmente, el mantenimiento de la vía presentó impactos cercanos al 20% en todas las categorías analizadas, excepto en GW y FPMF, donde los impactos no sobrepasaron el 10%.

Tabla 4.2 Impactos ambientales del sistema global de carretera Nuevo Tingo – Kuélap. Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación de la vía.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|---------------|-----------------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------|
| | kg CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | g P eq | kg oil eq |
| Construcción | 5.57 | 33.2 | 57 | 57.8 | 40.5 | 0.226 | 1.72 |
| Uso | 10.1 | 195 | 20.1 | 20.4 | 24.5 | 0.099 | 1.48 |
| Mantenimiento | 1.49 | 8.42 | 12.4 | 12.6 | 9.89 | 0.074 | 0.464 |
| Total | 17.1 | 236 | 89.4 | 90.7 | 74.9 | 0.399 | 3.67 |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

4.2. Sistema de Telecabinas Kuélap

Construcción de edificaciones

Al comparar únicamente las tres edificaciones que componen el sistema, los resultados muestran que la construcción del Andén de Salida representa el mayor impacto con más del 50% en todas las categorías. En segundo lugar, se encuentra la construcción de la Estación de Embarque y finalmente, la construcción del Andén de Llegada. Particularmente, el mayor impacto del Andén de Salida se presenta en la categoría de calentamiento global (GW) con un 55% de contribución, seguido por la Estación de Embarque con 35% y el Andén de Llegada con 10%. En el resto de categorías la tendencia es muy similar como se puede apreciar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Impactos ambientales de la construcción de las edificaciones del sistema de telecabinas Kuélap.

Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|----------------------|----------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|
| | g CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | mg P eq | g oil eq |
| Estación de Embarque | 46.6 | 0.0624 | 0.105 | 0.11 | 0.116 | 10.5 | 8.16 |
| Andén de Salida | 72.2 | 0.0752 | 0.161 | 0.168 | 0.166 | 15.6 | 11.8 |
| Andén de Llegada | 13.1 | 0.0189 | 0.030 | 0.032 | 0.035 | 3.47 | 2.31 |
| Subtotal | 132 | 0.157 | 0.297 | 0.31 | 0.317 | 29.5 | 22.3 |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Construcción de la Línea

En la Tabla 4.4, se observa que las zapatas y pedestales, seguidas por las estaciones y las torres de línea, son los elementos responsables del mayor porcentaje de impacto ambiental en todas las categorías analizadas, a excepción de FPMF y FE. En la categoría de GW alcanzan cerca del 40% de impacto, mientras que en OF y FRS, el 30%. Por otro lado, en la categoría de FE, el mayor impacto ambiental – 25% – deriva de la fabricación de las cabinas. Paralelamente, en la categoría de FPMF, el mayor impacto corresponde a la fabricación de las estaciones motriz y retorno también con el 25%.

Tabla 4.4 Impactos ambientales de la construcción de cada elemento de la Línea
Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|---------------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|------------|
| | g CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | mg P eq | g oil eq |
| Estación motriz y retorno | 159 | 0.315 | 0.505 | 0.526 | 0.673 | 79.6 | 36.4 |
| Zapatas y pedestales | 297 | 0.300 | 0.579 | 0.608 | 0.684 | 83.8 | 44.9 |
| Torres | 137 | 0.272 | 0.462 | 0.48 | 0.590 | 68.6 | 31.4 |
| Cable | 72.9 | 0.139 | 0.242 | 0.252 | 0.309 | 33.3 | 19.9 |
| Cabina | 28.3 | 0.129 | 0.115 | 0.119 | 0.357 | 86.4 | 7.63 |
| Subtotal | 694 | 1.15 | 1.9 | 1.99 | 2.61 | 352 | 140 |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Construcción y mantenimiento de la vía EE – AS

Los resultados de impacto ambiental de la construcción y mantenimiento del tramo de 3.13 km que une la Estación de Embarque con el Andén de Salida se muestran referidos a un pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas (ver Tabla 4.5). Se observa que la etapa que representó el mayor impacto ambiental fue la construcción de la vía, con valores cercanos al 50% en todas las categorías analizadas. Particularmente, el mayor impacto obtenido por dicha etapa se da en la categoría de OF, con cerca del 60% de impacto.

Tabla 4.5 Impactos ambientales de la carretera EE-AS.

Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|-----------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|-------------|
| | g CO ₂ eq | g PM _{2.5} eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | mg P eq | g oil eq |
| Construcción | 41.2 | 0.246 | 0.422 | 0.428 | 0.300 | 1.68 | 12.8 |
| Mantenimiento | 34.5 | 0.195 | 0.288 | 0.291 | 0.229 | 1.72 | 10.7 |
| <i>Subtotal</i> | <i>75.7</i> | <i>0.441</i> | <i>0.71</i> | <i>0.719</i> | <i>0.529</i> | <i>3.4</i> | <i>23.5</i> |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF(Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Operación del sistema

Se compararon los impactos ambientales producto de la operación de las telecabinas, representada exclusivamente por el uso de energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, y el tráfico vehicular generado por los buses del concesionario en el tramo EE-AS. Se puede observar en la Tabla 4.6 que este último genera impactos sustancialmente mayores a los del funcionamiento de las telecabinas en todas las categorías. Por ejemplo, representa el 92%, 99% y 97% en las categorías de GW, OF y TA, respectivamente. Únicamente en la categoría de FE el impacto del funcionamiento de las telecabinas alcanza un valor representativo de alrededor del 20%.

Tabla 4.6 Resultados de impacto ambiental para la operación del Sistema de Telecabinas. Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|-------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|------------|
| | g CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | mg P eq | g oil eq |
| Operación TC | 83.3 | 0.0729 | 0.106 | 0.11 | 0.218 | 5.65 | 27.6 |
| Tráfico vehicular | 978 | 9.49 | 8.54 | 8.62 | 6.69 | 20.4 | 306 |
| <i>Subtotal</i> | <i>1060</i> | <i>9.56</i> | <i>8.65</i> | <i>8.73</i> | <i>6.9</i> | <i>26</i> | <i>333</i> |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF(Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Resultados globales para el Sistema de Telecabinas

Finalmente, se realizó el análisis global del Sistema de Telecabinas y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.7. En este apartado se ha incluido la maquinaria correspondiente tanto para la construcción de las 3 edificaciones (estaciones) como para la construcción de la Línea. La maquinaria relativa a la carretera EE-AS forma parte del componente del mismo nombre.

Los resultados reflejan que el responsable del mayor impacto en todas las categorías analizadas, a excepción de FE, es el tráfico vehicular de los buses de la concesión en el tramo EE-AS. Para las categorías de GW, FPMF, OF y TA, este componente alcanzó valores cercanos al 50, 85, 70 y 60%, respectivamente. Por otro lado, en la categoría de FE, la Línea representó el mayor impacto con un 85% del total. La construcción de las edificaciones generó impactos mínimos en todas las categorías con contribuciones que oscilan entre el 2 y 9%. De igual manera, la construcción y mantenimiento de la carretera de 3.13 km obtuvo bajos porcentajes en todas las categorías con impactos menores al 7%. Por otra parte, la operación de las telecabinas tuvo un comportamiento similar en todas las categorías con impactos menores al 5% del total.

Tabla 4.7 Impactos ambientales del sistema global de telecabinas. Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta en 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|--------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|------------|
| | kg CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | mg P eq | g oil eq |
| Edificaciones | 0.132 | 0.157 | 0.297 | 0.31 | 0.317 | 29.5 | 22.3 |
| Línea | 0.694 | 1.15 | 1.9 | 1.99 | 2.61 | 352 | 140 |
| Carretera EE-AS | 0.0757 | 0.441 | 0.71 | 0.719 | 0.529 | 3.4 | 23.5 |
| Operación - Telecabinas | 0.0833 | 0.0729 | 0.106 | 0.11 | 0.218 | 5.65 | 27.6 |
| Tráfico vehicular EE-AS | 0.978 | 9.49 | 8.54 | 8.62 | 6.69 | 20.4 | 306 |
| Maquinaria - Telecabinas | 0.0904 | 0.116 | 0.548 | 0.554 | 0.518 | 3.09 | 28.7 |
| Total | 2.05 | 11.4 | 12.1 | 12.3 | 10.9 | 414 | 548 |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF(Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

4.3. Comparación de ambos sistemas en el escenario base

Finalmente, se compararon los resultados para ambos sistemas de acuerdo a la UF escogida. Es preciso recalcar las diferencias en el escenario temporal de comparación. Para la construcción y uso de la carretera se consideraron los datos de los años 1985 y 2008 respectivamente, mientras que para la construcción del sistema de telecabinas se consideró el año 2017. En la Tabla 4.8, se presentan los resultados obtenidos por pasajero en un viaje de ida y vuelta para 1 año de operación de ambos sistemas. Por ende, la asignación de impactos varió de acuerdo a la afluencia de turistas, es decir, para el año 2016 esta fue casi 4 veces mayor. Teniendo en cuenta dichas consideraciones, se determinó que la carretera Nuevo Tingo – Kuélap presentó los mayores impactos ambientales en casi todas las categorías respecto del Sistema de Telecabinas por diferencias significativas. En cuanto a FPMF, se presentó la mayor diferencia con el 95%, mientras que en la categoría de GW, el impacto de la carretera fue un 88% mayor. La misma tendencia siguieron los resultados para las demás categorías analizadas: OF, TA y FRS, con variaciones de entre 80 y 90%. Únicamente en la categoría de FE, el impacto ambiental del sistema de telecabinas fue mayor que el de la carretera con una diferencia de 4%.

Tabla 4.8 Comparación de impacto ambiental de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap y el Sistema de Telecabinas. Resultados por pasajero en un viaje de ida y vuelta hacia la Zona Arqueológica Monumental Kuélap durante 1 año de operación de la carretera o el Sistema de Telecabinas.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|-------------|-----------------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|-----------|
| | kg CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | g P eq | kg oil eq |
| Carretera | 17.1 | 236 | 89.4 | 90.7 | 74.9 | 0.399 | 3.67 |
| Telecabinas | 2.05 | 11.4 | 12.1 | 12.3 | 10.9 | 0.414 | 0.548 |

GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.



CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados reportados por un pasajero en un viaje de ida y vuelta durante un año de análisis mostraron que, en la comparación general, el sistema de transporte por cable es una opción adecuada para reducir los impactos ambientales. A continuación, se analizaron los factores que influenciaron en los resultados obtenidos.

Se determinó que la carretera Nuevo Tingo – Kuélap presentó los mayores impactos ambientales en casi todas las categorías respecto del Sistema de Telecabinas por diferencias significativas. En la categoría de GW, el impacto de la carretera fue un 88% mayor. Específicamente, los resultados de ciclo de vida de la carretera determinan que, de las tres fases estudiadas, aquella que generó el mayor impacto en las categorías de GW y FPMF fue el uso, lo cual va en consonancia con resultados de estudios previos de ACV (Highways Agency, 2003, Milachowski et al., 2011). Para estas categorías de impacto se obtuvieron valores de 60 y 80%, respectivamente. Para GW, el factor determinante fue la emisión de GEI derivada del consumo de combustibles del tráfico vehicular en la carretera Nuevo Tingo - Kuélap.

Al analizar los resultados referentes al recorrido de 1 viaje o 66.26 km (ida y vuelta) durante 1 año de uso de la vía se aprecia que la circulación de autos reporta una variación de cerca del 60% del total frente a las camionetas y camionetas rurales, lo cual varía de forma directamente proporcional con el número de unidades en circulación de cada tipo de vehículo. Por otro lado, el mantenimiento del tramo tuvo impactos aún menores, lo cual va acorde a los resultados obtenidos por Stripple (2001).

Dentro de la etapa de construcción, el movimiento de tierras, producto del accidentado relieve de la zona, fue responsable del 84% del impacto en GW. El porcentaje restante estuvo relacionado con la colocación de afirmado. En ambas actividades, el impacto se atribuyó fundamentalmente a las emisiones de la maquinaria utilizada. Ante ello, se infiere que controlar estas emisiones es un paso crítico en la gestión ambiental de la construcción de carreteras (Ahn, 2009).

Cabe resaltar que no se modeló el uso de explosivos en la etapa de movimiento de tierras, por un lado debido a que no se contó con información de calidad que describa su uso en el proyecto. Además, de acuerdo a la literatura, estos representan solo entre el 5 y 7% de las emisiones de GEI de los procesos de excavación (ASTAE, 2010). Asimismo, en el cómputo del sistema global, estos contribuyen con valores menores al 1% de los impactos en GW

(Jullien et al, 2013). Pese a ello, los explosivos presentan un gran impacto en su producción (Liljenström, 2013).

Por otro lado, en el caso del Sistema de Telecabinas, el tráfico vehicular generado en el tramo de carretera Estación de Embarque – Andén de Salida fue responsable de cerca de la mitad del impacto - 48% - en la categoría de GW. Además, los impactos de este componente, derivados únicamente de la circulación de buses para el traslado de pasajeros desde la Estación de Embarque hasta el Andén de Salida, representan más del 50% en casi todas las categorías al analizar el sistema global. El resultado refleja la importancia de considerar dentro de los límites del sistema a la carretera Estación de Embarque – Andén de Salida pues de lo contrario se estarían subestimando los impactos ocasionados por el Sistema de Telecabinas. Para disminuirlo, son distintas las alternativas que se pueden adoptar, las que van desde la renovación de los vehículos al adecuarlos al estándar EURO IV u optar por el uso de vehículos eléctricos, escenarios que serán discutidos más adelante.

En la categoría de GW, inmediatamente después del tráfico vehicular de los buses del concesionario, se encuentra la construcción de las zapatas y pedestales, con un 15% del impacto, seguida por las pilonas de acero con 7% del total. El transporte marítimo tuvo impactos mínimos en comparación con la producción de los materiales. Los altos volúmenes de acero de las 23 pilonas y el concreto de las zapatas y pedestales de cada una, de dimensiones significativas, fueron determinantes en los resultados. Para disminuir el impacto de la producción de concreto se recomienda el uso de cementos adicionados, los cuales poseen un impacto ambiental mucho menor al del cemento Portland (Vázquez-Rowe, et al, 2019). Precisamente, las opciones de mitigación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas – *National Determined Contributions* (NDC) consideran el uso de este tipo de cementos: el reemplazo de clínker en el cemento por puzolana, escoria siderúrgica y cenizas de cáscara de arroz. Asimismo, en cuanto a las fuentes de energía requeridas para la producción de los materiales de construcción, las NDC proponen la sustitución de carbón por biomasa o gas natural en los hornos de cemento, hierro y acero (MINAM, 2016).

Sobre la categoría de FRS, la carretera tuvo el mayor impacto por el consumo de combustible utilizado por los vehículos en circulación, lo cual no ocurrió con el Sistema de Telecabinas, sistema de transporte dependiente de la electricidad. La operación de las telecabinas alcanzó un bajo porcentaje de impacto al no superar el 5% en todas las categorías analizadas. El principal factor que determinó dichos resultados fue el uso del mix eléctrico del departamento de Amazonas, el cual es predominante en energía hidráulica – 97%– (INEI, 2014). No obstante, si bien este tipo de energía genera mínimos impactos en

cuanto a emisiones de GEI, es importante considerar su directa relación con la disponibilidad del agua. En tal sentido, el país podría mitigar esta vulnerabilidad explotando los Recursos Energéticos Renovables No Convencionales (RER) como por ejemplo energía eólica, solar, biogás, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas (Vázquez-Rowe et al., 2015). Este escenario está siendo últimamente considerado por el gobierno peruano y ya entre los años 2008 y 2013, la generación RER ha permitido mitigar la emisión de 2.1 millones de toneladas de CO₂ eq (OSINERGMIN, 2014). La adopción de estas consideraciones llevaría a futuro a una continua disminución de impactos ambientales en la operación del teleférico, tanto en las categorías de FRS como en GW.

En el caso de la categoría de FPMF, nuevamente el impacto de la carretera fue sumamente mayor y atribuible en gran medida a las partículas de re-suspensión. El polvo generado por el tráfico vehicular en carreteras sin pavimentar es una significativa fuente de material particulado (Watson et al., 2000, Kavouras, 2016) y en consecuencia afecta la calidad del aire (Choobari et al., 2014). Para la disminución de dichas emisiones en este tipo de carreteras es recomendable el uso de agentes químicos aglutinantes (Jones et al., 2013). Asimismo, dado que las tasas de emisión de material particulado están entre otros factores, en función del contenido de humedad de la superficie de la carretera (Etyemezian et al., 2003), se sugiere la aspersion de agua durante temporadas secas (Watson et al., 2000). De acuerdo al modelo adoptado en el Capítulo 3 se infiere que a mayor contenido de humedad en la superficie, la emisión de partículas de re-suspensión es menor, por lo que se infiere que en época de lluvias dicho valor será mucho menor.

Por otro lado, en la categoría de OF, los impactos de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap fueron una vez más, superiores a los del Sistema de Telecabinas y se determinó que el impacto de la fase de construcción superó al de la fase de uso. El resultado es consecuencia del estándar de emisiones adoptado. Para la construcción, ejecutada en el año 1985, se tuvo que modelar las emisiones de maquinaria sin ninguna regulación es decir en un nivel PRE-EURO. En cambio, para el año en análisis de la fase de uso –2008–, se consideró el nivel EURO III. Este último ya cuenta con emisiones reguladas en términos de óxidos de nitrógeno (EPA, 2006), factor determinante en la categoría OF (ReCiPe, 2016).

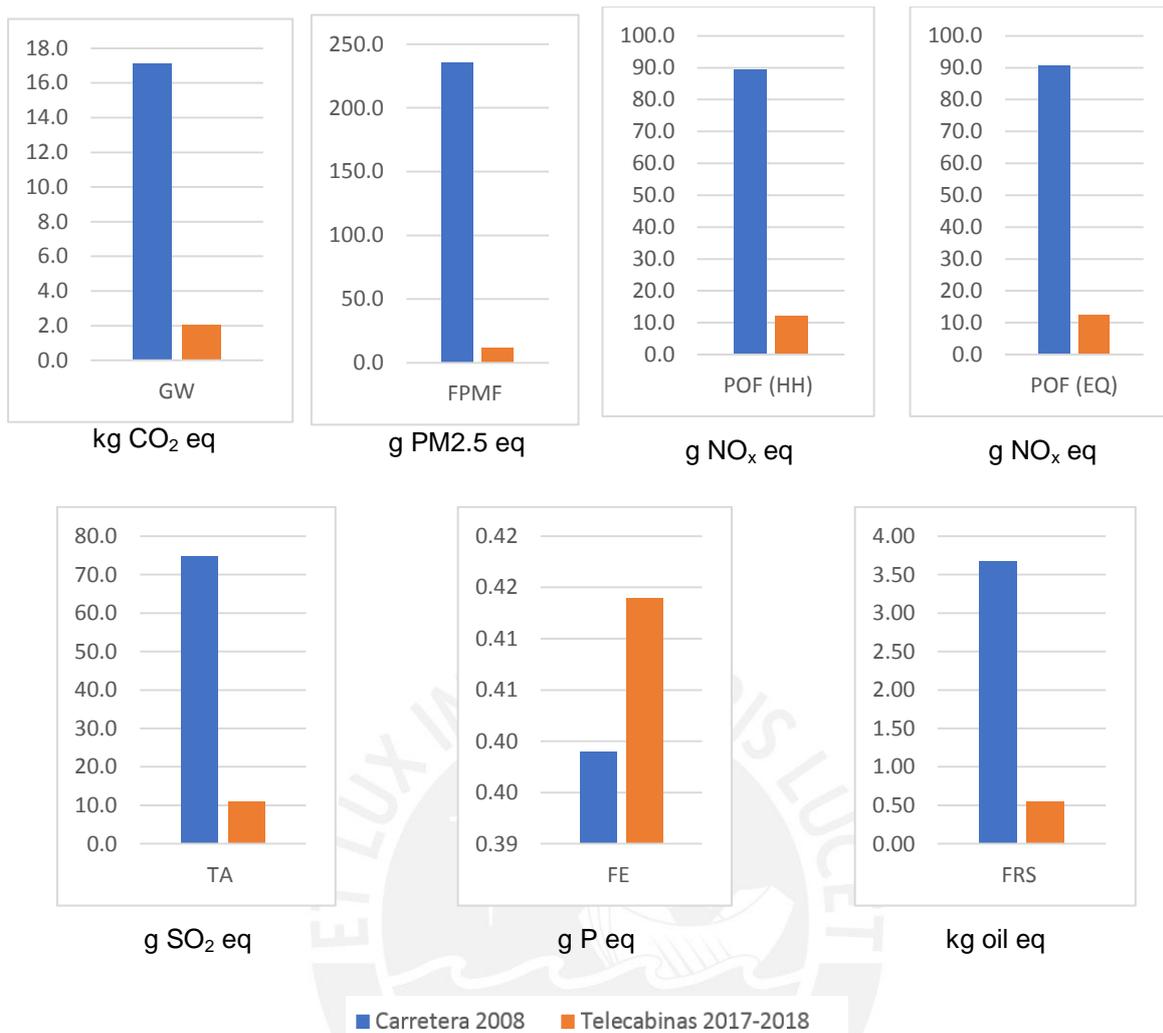
Por los resultados antes mencionados, es fundamental entender la relativa influencia de la fase de uso en comparación de los resultados obtenidos por las fases de construcción y mantenimiento con el fin de otorgarles el correspondiente peso en los procesos de toma de decisiones (Araújo, 2014). De esta manera, el ACV se ha señalado como una herramienta que podría complementar evaluaciones ambientales tales como Estudio de Impacto Ambiental (EIA) (Finnveden y Moberg, 2005).

En cuanto a la categoría de FE, ambos sistemas poseen impactos muy bajos. Sin embargo y al mismo tiempo, es la única categoría en la que los impactos del Sistema de Telecabinas superan por una ligera diferencia de 3% a los de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap. Esto ocurre principalmente debido a la construcción de la Línea. La fabricación de las estaciones motriz y retorno, las 26 cabinas, pilonas de acero y zapatas y pedestales tuvieron influencia directa en los resultados obtenidos. En todos los componentes mencionados, esta diferencia fue atribuible a la producción de cobre, cemento y acero por el contenido de fósforo en los relaves generados.

Posteriormente, al analizar únicamente el Sistema de Telecabinas, cabe señalar que las fases de construcción y mantenimiento del tramo de 3.13 km de carretera representaron porcentajes mínimos en todas las categorías. El impacto de ambas fases en total estuvo por debajo del 7% para el Sistema de Telecabinas. Pese a considerar maquinaria sin regulación de emisiones para la construcción, la reducida longitud del tramo trajo como consecuencia tales resultados. El perfil ambiental de este tramo es idéntico al de la carretera Nuevo Tingo – Kuélap dado que forma parte de ésta.

En cuanto a las edificaciones necesarias para el funcionamiento del Sistema de Telecabinas, si bien las tres presentan características arquitectónicas similares, el AS generó el mayor impacto en todas las categorías evaluadas respecto a las otras dos. Esta edificación cuenta con un área extensa de garaje para las 26 cabinas con la respectiva cimentación para la plataforma por lo que en su construcción fue más intensivo el uso de concreto y acero. Dichas condiciones le llevan a alcanzar un 55% en la categoría de GW frente a las otras dos edificaciones. Sin embargo, al comparar con el sistema global de telecabinas, para GW el impacto todavía es muy bajo con una contribución de cerca del 4% del total.

Finalmente, se presenta el comparativo de ambos sistemas de manera global en la Figura 5.1.



GW: Calentamiento global, FPMF: Formación de material particulado, OF (HH): Formación de ozono troposférico (relativo a la salud humana), OF (Eco): Formación de ozono troposférico (relativo a la calidad del ecosistema), TA: Acidificación terrestre, FE: Eutrofización de aguas dulces, FRS: Agotamiento de recursos fósiles.

Figura 5.1 Comparación de Impactos ambientales de la Carretera Tingo – Kuélap y el Sistema de Telecabinas.

Análisis de escenarios

Se realizó el análisis de escenarios a ambos sistemas, cuyos resultados se observan en la Tabla 5.1. El escenario A1 representa el escenario base para la carretera Nuevo Tingo – Kuélap, el cual considera el año 2008 para la etapa de uso y por ende asigna los impactos de acuerdo al número de visitantes en dicho año. Adicionalmente, se creó el escenario A2, que asigna los impactos de acuerdo al número de visitantes en el 2016 (ver Figura 5.2). La diferencia en los resultados de ambos escenarios radica en que para el año 2016 la afluencia turística fue casi cinco veces mayor que en el 2008. En consecuencia, al analizar, los impactos por pasajero, se obtienen valores menores.

Tabla 5.1 Análisis de escenarios.

Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación del sistema.

| | GW | FPMF | OF (HH) | OF (EQ) | TA | FE | FRS |
|----|-----------------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|-----------|
| | kg CO ₂ eq | g PM2.5 eq | g NO _x eq | g NO _x eq | g SO ₂ eq | g P eq | kg oil eq |
| A1 | 17.10 | 236 | 89.4 | 90.7 | 74.9 | 0.399 | 3.67 |
| A2 | 12.30 | 209 | 41.7 | 42.3 | 40.3 | 0.193 | 2.17 |
| B1 | 2.05 | 11.4 | 12.1 | 12.3 | 10.9 | 0.414 | 0.55 |
| B2 | 2.66 | 12.1 | 12.6 | 12.8 | 12.5 | 0.43 | 0.78 |
| B3 | 2.24 | 11.8 | 12.7 | 12.9 | 11.6 | 0.483 | 0.59 |
| B4 | 1.91 | 11.2 | 11.6 | 11.8 | 10.3 | 0.363 | 0.52 |
| B5 | 1.80 | 11 | 11.3 | 11.5 | 9.91 | 0.323 | 0.49 |
| B6 | 2.05 | 11.3 | 8.8 | 8.96 | 9.71 | 0.414 | 0.55 |
| B7 | 2.06 | 11.3 | 4.87 | 5.05 | 8.29 | 0.414 | 0.55 |
| B8 | 1.12 | 10.1 | 3.62 | 3.74 | 4.32 | 0.397 | 0.26 |

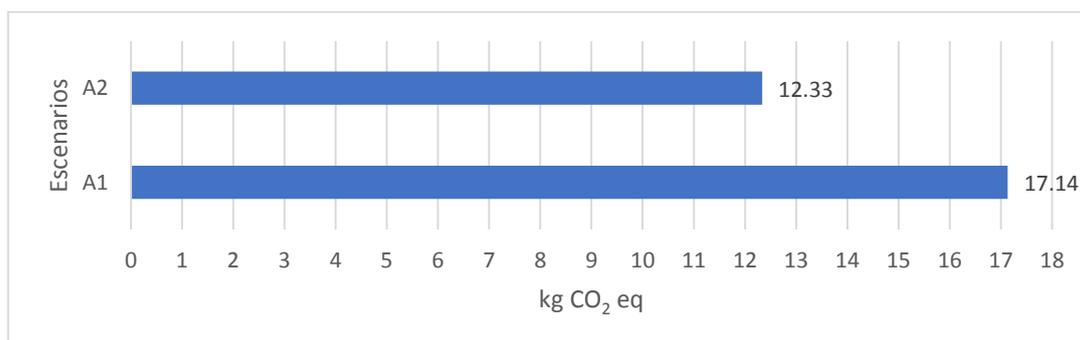


Figura 5.2 Impacto ambiental de la categoría de GW para los escenarios A1 y A2. Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación de la carretera.

De otro lado, B1 representa el escenario base del Sistema de Telecabinas, al cual se realizó algunas modificaciones para generar siete escenarios distintos. B2 representó el Sistema de Telecabinas usando la matriz eléctrica nacional. En los escenarios B3- B5 se alteró el número de pasajeros transportados por el Sistema de Telecabinas. Por otro lado, en B6 y B7 se alteró el estándar de emisiones de los buses de la concesión en el tramo Estación de Embarque –Andén de Salida. Finalmente, en el escenario B8 se optó por considerar el uso de buses eléctricos.

Dentro de los escenarios de Sistema de Telecabinas, los resultados determinaron que para la categoría de GW, el responsable del mayor impacto ambiental fue el escenario B2 (ver Figura 5.3), el sistema de telecabinas utilizando la matriz eléctrica nacional. La variación respecto al escenario base en esta categoría fue del 30%. Sin embargo, el impacto sigue siendo bajo respecto al de la carretera Tingo - Kuélap. La matriz eléctrica peruana está compuesta principalmente por gas natural y energía hidráulica (OSINERGMIN, 2014) y en consecuencia posee un bajo impacto ambiental: en 2013, las emisiones de GEI por kWh fueron de 331 g CO₂ eq. (Vázquez-Rowe et al, 2015). Del otro lado, la matriz eléctrica de Amazonas se compone fundamentalmente de energía hidráulica por lo que los impactos ambientales en la categoría de GW son aún menores.

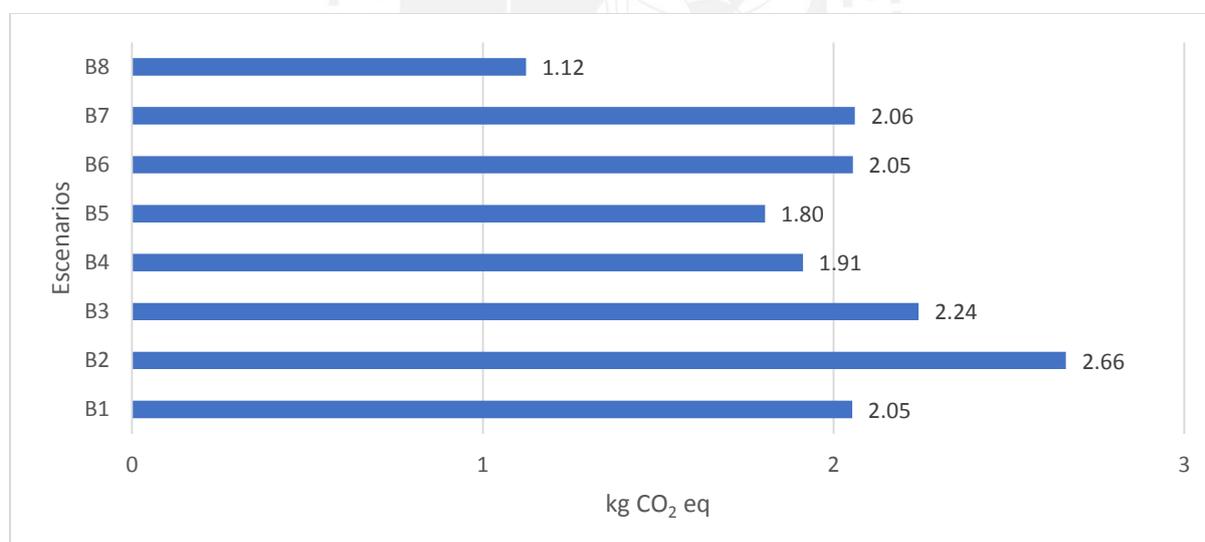


Figura 5.3 Impacto ambiental de la categoría de GW para los escenarios B1-B8. Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

Los escenarios B3, B4 y B5 muestran que a medida que aumenta el número de pasajeros transportados por las telecabinas, el impacto ambiental por persona disminuye. Se ha considerado el mayor número de viajes de los buses en el tramo Estación de Embarque – Andén de Salida generado por el incremento del número de usuarios. Sin embargo, el

impacto por persona sigue siendo menor. De lo expuesto se infiere que no es conveniente una disminución del número de pasajeros. Por lo tanto, será importante desarrollar estrategias de promoción del turismo en la zona de manera que la afluencia turística sea sostenible en el tiempo. Sin embargo, es preciso también tener en cuenta la conservación del recurso turístico dada su antigüedad. Para ello, será necesario adoptar medidas que regulen el flujo de visitas al monumento tomando como precedente los reglamentos de uso sostenible de monumentos arqueológicos, como en el caso de Machu Picchu (Ministerio de Cultura, 2017).

Cerca de la mitad del impacto ambiental para el escenario base de Sistema de Telecabinas es atribuible al tráfico vehicular del tramo Estación de Embarque – Andén de Salida en todas las categorías, a excepción de FE. Por ello, se propusieron los escenarios B6 y B7, ambos con los más recientes estándares de emisiones. Para la categoría de GW, los resultados demostraron que el cambio del estándar de emisión EURO III por EURO IV y EURO VI no representó diferencias significativas respecto al escenario base. Esto es consecuencia de que las normativas EURO están orientadas a la mejora de la calidad del aire, mas no necesariamente a la reducción de GEI. A medida que las normativas EURO avanzan, la concentración de los contaminantes criterio de calidad de aire en las emisiones de escape vehicular es menor (UITP, 2009). Entre estos se encuentran el dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM), y monóxido de carbono (CO) (DIGESA, 2005).

Debido a lo descrito anteriormente, la diferencia con los escenarios B6 y B7 es notoria principalmente para la categoría de OF. Esta depende principalmente de las emisiones de los óxidos de nitrógeno. En dicha categoría, frente al escenario base, B6 generó impactos 28% menores, mientras que con B7, la diferencia fue del 60%. Para la categoría de PM, la diferencia no es significativa pues el impacto proveniente de las partículas de re-suspensión, es mucho mayor que el de las emisiones de escape vehicular, por lo que la concentración de óxidos de nitrógeno en estas últimas pierden relevancia para el indicador.

Finalmente, con el objetivo de aprovechar la baja carga ambiental de la matriz eléctrica de Amazonas, en el escenario B8 se propuso evaluar el uso de buses eléctricos en el tramo EE-AS. Como consecuencia, se logró reducir considerablemente el impacto en todas las categorías. En GW, el impacto disminuyó de 2.05 kg CO₂ eq del escenario base a 1.12 kg CO₂ eq. Además en la categoría de FRS, la diferencia fue de cerca del 54% (ver Figura 5.3). En la categoría de OF, se logró una disminución de 71% (ver Figuras 5.4 y 5.5).

A la fecha, en el Perú, ya se encuentra en funcionamiento el primer bus eléctrico del país destinado al transporte distrital (MSI, 2018). Asimismo se tiene proyectado promover el ingreso de buses y autos eléctricos en el territorio nacional mediante un proyecto de ley

(MEM, 2018). En ese sentido, se considera que esta sería la alternativa más adecuada y viable en el mediano plazo. No obstante, a pesar de las ventajas mencionadas, es importante considerar que los vehículos eléctricos generan mayor impacto en su etapa de fabricación principalmente en la producción de la batería, lo cual incrementa el impacto en las categorías de toxicidades, eutrofización de aguas dulces y agotamiento de metales. (Hawkins, 2013). Este aspecto no fue considerado en el análisis por lo que constituye una limitación en el estudio.

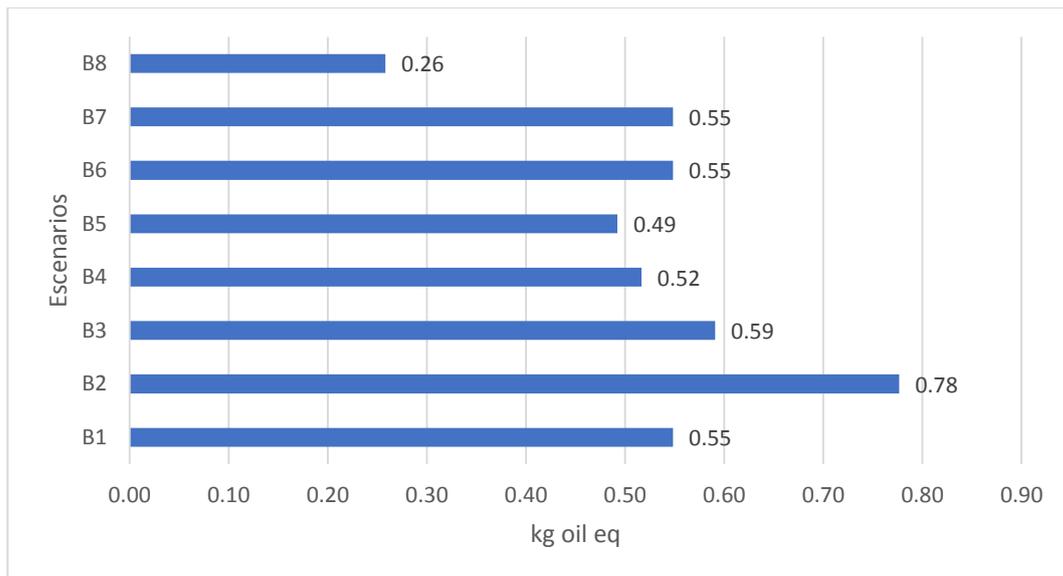


Figura 5.4 Impacto ambiental de la categoría de FRS para los escenarios B1-B8. Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

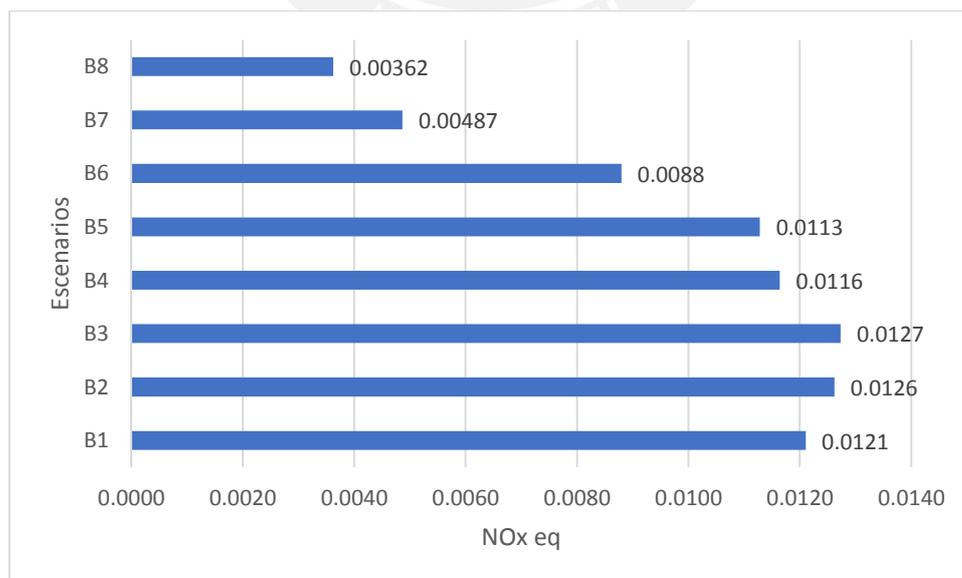


Figura 5.5 Impacto ambiental de la categoría de OF (SH) para los escenarios B1-B8. Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.

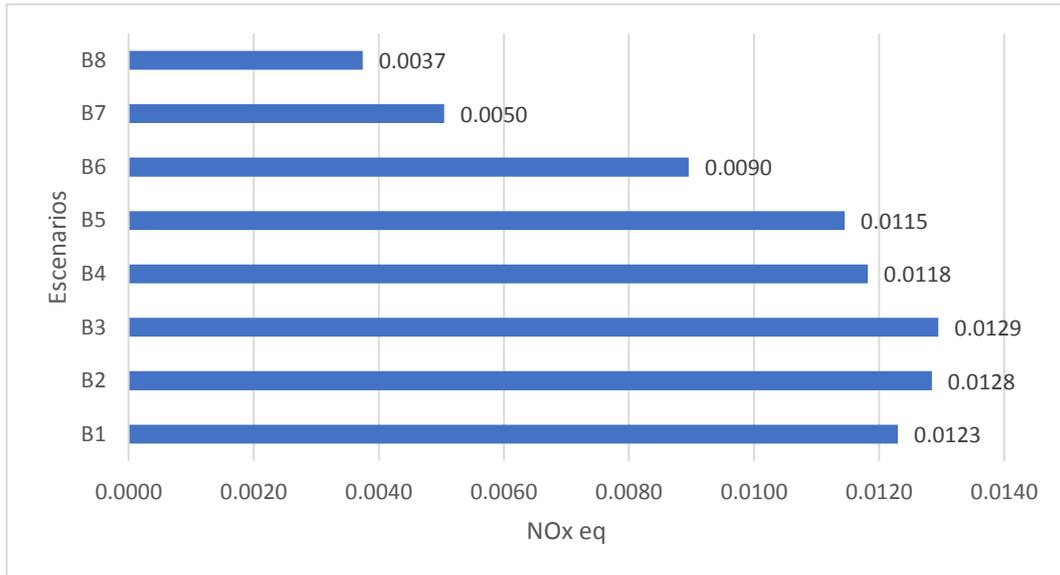
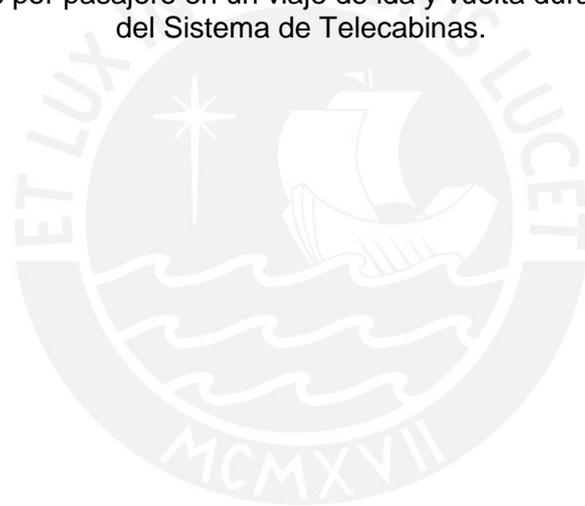


Figura 5.6 Impacto ambiental de la categoría de OF (Eco) para los escenarios B1-B8. Resultados reportados por pasajero en un viaje de ida y vuelta durante 1 año de operación del Sistema de Telecabinas.



Comparación con otros estudios

En el caso de sistemas de transporte por cable, es escasa la publicación científica relativa a la aplicación del ACV. Esta es reciente y aún de acceso restringido (Dou et al., 2012, Erharter et al., 2017). En otros casos la información disponible no es suficiente para realizar una comparación fiable (Messmer et al, 2016). Por tal motivo, sólo fue posible comparar los resultados obtenidos para la carretera Nuevo Tingo – Kuélap.

A diferencia de la carretera en estudio, los ACV desarrollados hasta el momento en la literatura analizan carreteras pavimentadas. Se revisaron cuatro estudios diferentes y representativos. El primero es un estudio aplicado en Finlandia en una carretera de superficie de material granular (Mroueh et al., 2001), el segundo analiza la construcción de una carretera de pavimento de asfalto reciclado en Portugal (Araújo et al., 2014), el tercero, una carretera pavimentada en zona árida al sur de Lima (Verán, 2017) y el cuarto, una carretera sin pavimentar en una zona de bosque tropical en Perú (Larrea-Gallegos et al., 2017). Esta última vía fue de características similares a las de la carretera en estudio al ser la única sin pavimentar. Sin embargo, al tratarse de una zona de selva baja, los niveles de deforestación fueron elevados.

Una de las limitaciones para la comparación es que cada estudio poseía una unidad funcional diferente por lo que los resultados tuvieron que ser escalados para un análisis adecuado. Por otro lado, los enfoques abordados para cada uno y los límites del sistema fueron distintos de acuerdo al objetivo que se perseguía en cada estudio. Asimismo, las condiciones ambientales derivadas de la ubicación geográfica, la topografía de la zona y el tráfico vehicular fueron diferentes para cada infraestructura vial. De igual modo, la tecnología empleada fue distinta en todos los casos.

Los resultados mostrados en la Tabla 5.2 reflejan que, para la carretera Nuevo Tingo – Kuélap, la mayor parte del impacto – cerca del 80% – deriva de la fase de uso. La tendencia es similar para los estudios citados de carreteras en Portugal y Finlandia donde las emisiones de construcción y mantenimiento fueron mínimas en comparación con el tráfico y este último reportó impactos cercanos al 98% del total. De igual manera, los resultados siguieron también la tendencia reportada por la carretera PS4, en la cual el mayor impacto ambiental es atribuible a la fase de uso.

Tabla 5.2 Comparación de las emisiones de CO₂eq (t) generadas en el ACV de la Carretera Nuevo Tingo – Kuélap con las reportadas en otros estudios de ACV.

| Emisiones de CO ₂ eq (t) por año de operación para 1 kilómetro | | | |
|---|------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Autor | Fase | Emisiones de CO ₂ eq | Porcentaje del total |
| Carretera Nuevo Tingo – Kuélap ¹ | Construcción y mantenimiento | 6.86E+00 | 20.59% |
| | Tráfico | 2.65E+01 | 79.41% |
| Mroueh ² | Construcción y mantenimiento | 7.60E+00 | 1.19% |
| | Tráfico | 6.30E+02 | 98.81% |
| Araújo ³ | Construcción y mantenimiento | 6.09E+00 | 0.10% |
| | Tráfico | 6.23E+03 | 99.90% |
| Boca Manu ⁴ | Construcción y mantenimiento | 3.06E+00 | 45.58% |
| | Tráfico | 3.65E+00 | 54.42% |
| PS4 ⁵ | Construcción y mantenimiento | 3.31E+01 | 0.40% |
| | Tráfico | 8.30E+03 | 99.60% |

¹ 6.6 m de ancho de vía, periodo de 20 años, 135 IMDA
² 17 m de ancho de vía, periodo de 50 años, 7 000 IMDA
³ 9 m de ancho de vía, periodo de 20 años, 22 000 IMDA
⁴ 5 m de ancho de vía, periodo de 15 años, 33 IMDA
⁵ 14m de ancho de vía, periodo de 50 años, 16 995 IMDA

En cuanto a las emisiones de CO₂ eq, las infraestructuras viales desarrolladas fuera del país presentaron altos valores en cuanto a construcción y mantenimiento, respecto de aquellos obtenidos por la carretera Nuevo Tingo – Kuélap. Esto se debe a que dichos estudios se desarrollan en zonas templadas, de alto tráfico vehicular y, por ende, cuentan con un diseño de pavimento acorde a dichas condiciones. En cambio, las características de la vía en estudio fueron significativamente distintas. Por un lado, el nivel tecnológico utilizado en la carretera Nuevo Tingo – Kuélap fue básico, la carretera no contó con pavimento, la maquinaria utilizada no estuvo regulada bajo ningún estándar de emisiones y, además, el tráfico vehicular fue bajo debido al reducido flujo turístico en Kuélap en el año en estudio. Este último fue influenciado principalmente por el deficiente estado de la carretera.

Para realizar el comparativo, en cuanto a la carretera Boca Manu, no se consideraron las emisiones de CO₂ eq relativas a la deforestación previa presentes en el estudio original. Esto con el fin de contrastar únicamente los impactos derivados de las partidas de construcción y mantenimiento de carreteras sin pavimentar. Al compararlas, se puede evidenciar que las emisiones de construcción y mantenimiento de la carretera Nuevo Tingo Kuélap fueron ligeramente mayores debido a la maquinaria empleada para el movimiento de tierras. Ello fue consecuencia directa de las características del emplazamiento de la misma, ya que al tratarse de una región de selva alta, presentaron altos volúmenes de corte y relleno de material.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En primer lugar, se ha podido comprobar que el cambio de la carretera Tingo – Kuélap por el Sistema de Telecabinas reduce considerablemente los impactos ambientales, principalmente los relacionados al cambio climático. Esto ocurrió por dos razones puntuales. Por un lado, el Sistema de Telecabinas destaca por la ausencia de emisiones derivadas de la quema de combustible que ocurre con el tráfico vehicular en los 33.13 km de carretera y, por otro lado, la ausencia de uso de maquinaria para los grandes volúmenes de corte y relleno de material, lo cual implica la producción y quema de combustible también. Cabe precisar que la antigüedad de la maquinaria también fue un factor clave en los resultados, en tanto en el año de construcción no se contaba con regulación de emisiones. Por tanto, de acuerdo a lo antes expuesto, se demuestra que es posible, mediante proyectos como el Sistema de Telecabinas Kuélap, contribuir con el logro de los compromisos ambientales del Perú asumidos en el Acuerdo de París.

Al analizar cada sistema por separado se observó que el factor responsable del mayor impacto para la carretera fue la fase de uso. Las emisiones de escape de los vehículos en circulación, el material de re-suspensión de la superficie y el uso de combustibles fósiles fueron determinantes en los resultados. Por otro lado, al analizar el sistema de telecabinas, nuevamente se observó que más de la mitad del impacto en todas las categorías estudiadas fue atribuible a la fase de uso del sistema. No obstante, el factor desencadenante de estos resultados no fue la operación eléctrica de las telecabinas. Por el contrario, el impacto fue derivado principalmente de la circulación de buses del concesionario en el tramo EE-AS. Asimismo, la construcción de las estaciones, la construcción y mantenimiento de la carretera de 3.13 km y la operación de las telecabinas tuvieron impactos mínimos en el sistema global. De no contar con este tramo de carretera, el mayor impacto ambiental de las telecabinas habría sido consecuencia de la fase de construcción. Específicamente de la construcción de la Línea, es decir, zapatas, pedestales y torres de línea.

Por otra parte, se concluye que el mix eléctrico del departamento de Amazonas basado principalmente en energía hidráulica, fuente renovable, presenta una baja carga ambiental. Este es uno de los factores determinantes que llevaron al sistema de telecabinas a generar sustancialmente menos impactos que los derivados de las considerables emisiones vehiculares de la carretera Nuevo Tingo - Kuélap. Además de acuerdo al análisis de escenarios realizado, al utilizar la matriz eléctrica nacional, los impactos ambientales siguen siendo mucho menores que los generados por la carretera. En ese sentido si se opta por replicar el sistema en otras regiones geográficas, el aumento o disminución del impacto

para la categoría de calentamiento global variará de acuerdo al tipo de fuente de energía eléctrica. Cabe precisar que el impacto ambiental producto de la generación de energía eléctrica dependerá también en gran medida del proceso y eficiencia en la generación de la misma. .

Pese a que el sistema de transporte por cable fue en todos los escenarios, aquel que produjo el menor impacto ambiental, los resultados indicaron que pueden proponerse medidas que reduzcan aún más el impacto. Al reemplazar los buses de la concesión utilizados en el tramo EE-AS por buses eléctricos es posible reducir en hasta un 50% el impacto en la categoría de cambio climático. Asimismo, se comprobó que el uso de vehículos eléctricos debe ir acompañado de una matriz eléctrica baja en carbono, por lo que ambos factores deberán ser evaluados para considerar el uso de los mismos.

Los resultados obtenidos podrán ser utilizados posteriormente para propiciar mejoras en la ejecución y operación de proyectos de transporte similares que puedan ser desarrollados a futuro. Para ello, se toma en cuenta que en el Perú se planea implementar un sistema de transporte de este tipo en una zona de similares características, el Teleférico de Choquequirao, el cual permitirá el acceso al Parque Arqueológico de Choquequirao. Asimismo, las recomendaciones pueden extenderse también a teleféricos urbanos. En Lima, la gestión edil entrante propone la instalación de teleféricos urbanos y ya existen al menos tres proyectos en la capital. En ese contexto, además de reducir los impactos ambientales, el sistema de transporte por cable se presenta como una alternativa de solución de transporte urbano a lugares de difícil acceso como ya ha ocurrido en otras ciudades latinoamericanas como Medellín o La Paz.

Por otra parte, las mejoras en accesibilidad a la Fortaleza derivadas del transporte por cable incrementan el número de turistas e incluso se tiene proyecciones de que sea el segundo destino turístico más visitado después de Machu Picchu. En ese sentido, es de suma importancia establecer un reglamento de visitas, como ya se tiene antecedente en otros atractivos turísticos (MC, 2017) de modo que no se degrade la Zona Arqueológica y el ecosistema adyacente.

Finalmente, queda pendiente para investigaciones futuras considerar dentro de los límites del sistema el incremento del flujo aéreo nacional e internacional generado por la habilitación de dos aeropuertos cercanos a la zona bajo estudio. Este tipo de transporte posee un impacto mucho mayor que el generado por el transporte turístico terrestre (Peeters et al. 2010).

REFERENCIAS

- Ahn, C., Martinez, J. C., Rekapalli, P. V., & Peña-Mora, F. A. (2009, December). Sustainability analysis of earthmoving operations. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter* (pp. 2605-2611). IEEE.
- Alshalalfah, B., Shalaby, A., Dale, S., & Othman, F. M. Y. (2012). Aerial ropeway transportation systems in the urban environment: State of the art. *Journal of transportation engineering*, 138(3), 253-262.
- Aranda, A & Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño Y Análisis de Ciclo de Vida* (Vol. 178). Universidad de Zaragoza.
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R., & Silva, H. M. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97-110.
- Arcay, A. O., Ordax, M. N., & Bugarín, M. R. (2003). *Transporte por cable*. Universidade da Coruña.
- Asociación para el Fomento de la Infraestructura Nacional (AFIN) (2017). Brecha en infraestructura: ¿Cómo iniciamos el año? Lima: El Comercio. Disponible en: <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/brecha-infraestructura-iniciamos-ano-noticia-485713> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Athena, 1999, Life Cycle Embodied energy and global warming emissions for concrete and asphalt roadways, Report from Athena Sustainable Materials Institute submitted to the Canadian Portland Cement Association in association with John Emery Geotechnical Engineering Limited, Venta Glaser & Associates, Jan Consultants, 102 p.
- Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application*. External organization.
- Berrittella, M., Bigano, A., Roson, R., & Tol, R. (2006). A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. *Tourism Management*, 27(5), 913–924.
- Birgisdottir, H., & Christensen, T. H. (2005). Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration.
- Bondinho (s.f.). Portal web del Teleférico del Pan de Azúcar. Disponible en: <http://www.bondinho.com.br/en/home/#home> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- Bosshart, D., Frick, K., (2006). *The future of leisure travel – trend study*. Gottlieb Duttweiler Institute, Zurich. ISBN 3-7184-7032-2
- Cámara Nacional de Turismo (CANATUR) (2016). Kuélap y Colca, circuitos turísticos que se van consolidando. Lima: El Comercio. Disponible en: <https://elcomercio.pe/economia/peru/kuelap-colca-circuitos-turisticos-consolidando-230063> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO) (2011). *El Equipo y sus Costos de Operación Lima, Perú*
- CAT (2009). *Manual de Rendimiento CATERPILLAR*. Illinois, EE.UU: Caterpillar Inc.
- CerroMonserate (s.f.). Portal web del Cerro de Monserate. Disponible en: <http://www.cerromonserrate.com/cerromonserrate.com/html/es/#> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- Choobari, O. A., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138, 152-165.
- CONSORCIO INGENIERIA IDOM – TP INVEST S.A.C. – TPC CONSULTING S.A. (2013). Estudio a nivel de perfil del proyecto “Mejoramiento de los servicios turísticos públicos Tingo Nuevo - Zona Arqueológica Monumental de Kuélap, distrito de Tingo, provincia de Luya, Amazonas”.
- Deng, F. (2010). *Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation: A Toolkit for Developing Countries*. World Bank Group.
- Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) (2005). *Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos*.

- Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones (DRTC) – Gobierno Regional de Amazonas (2018). Expediente técnico del Proyecto: “Mantenimiento periódico (mecanizado manual) ruta AM – 111, longitud 12 + 000 km Emp. PE – 08b – Tingo – Longuita - María Kuélap”.
- Doppelmayr – Garaventa (s.f.). Portal web de Doppelmayr – Garaventa. Cable Car of the Great Wall of China. Disponible en: <https://www.doppelmayr.com/es/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Dou, Y., Liu, Y., Li, B., & Liu, P. (2012). Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions: a case study in Hengshan. *Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica*, 32(17), 5532-5541.
- Du, G., & Karoumi, R. (2014). Life cycle assessment framework for railway bridges: literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(3), 277-294.
- Dubois, G., & Ceron, J. P. (2006). Tourism/leisure greenhouse gas emissions forecasts for 2050: Factors for change in France. *Journal of Sustainable Tourism*, 14(2), 172-191.
- Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburra Ltda. (ETMVA) (2012). Cable Cars Metro Medellin, Colombia. Monitoring report (F-CDM-MR) Version 02.0 CDM – Executive Board.
- Erharter K., Dörfler F. (2017). Ecological footprint of a ropeway installation in urban areas. Paper presented at the International Organization for Transportation by Rope (OITAF) Congress, Bolzano.
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Green, M., Pitchford, M., & Watson, J. (2003). Vehicle-based road dust emission measurement: I—methods and calibration. *Atmospheric Environment*, 37(32), 4559-4571.
- Eur-Lex (2016). Reglamento (UE) 2016/424 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2016, relativo a las instalaciones de transporte por cable y por el que se deroga la Directiva 2000/9/CE (Texto pertinente a efectos del EEE). Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/424/oj>
- European Environment Agency (2005) The European environment — State and outlook 2005. Copenhagen, Denmark
- Falkenmark, M. and Rockstrom, J. (2004). Balancing Water for Humans and Nature. The New Approach in Ecohydrology, Earthscan, London.
- Filimonau, V., Dickinson, J., & Robbins, D. (2014). The carbon impact of short-haul tourism: a case study of UK travel to Southern France using life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, 64, 628-638.
- Finnveden, G., & Moberg, Å. (2005). Environmental systems analysis tools—an overview. *Journal of Cleaner Production*, 13(12), 1165-1173.
- Gestión (2014). El teleférico de Kuélap abre nuevos horizontes para el turismo en el Perú. [online] Disponible en: <http://gestion.pe/economia/teleferico-kuelap-abre-nuevos-horizontes-turismo-peru-2098932> [Último acceso: 4 de mayo de 2017].
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53-64.
- Highways Agency (2003). Building better roads: Towards sustainable construction: The Highways Agency’s contribution to sustainable development through the construction and maintenance of the strategic road network in England.
- Hoang T. (2005) Tronçons autoroutiers: une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d’entretien. (Tesis post-doctoral). Ecole Centrale de Nantes, Nantes, Francia.
- Huang, Y., Bird, R., & Bell, M. (2009). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 197-204.
- Ihobe, S. A. (2009). Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el Impacto Ambiental de un producto. Sociedad Pública de Gestión Ambiental.

- INEI (2013). Mapa de Pobreza Provincial y Distrital 2013.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2018). Plano topográfico del cuadrante 13-H.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2014). *Electricidad y Agua. Compendio Estadístico Perú 2014*. Lima.
- International Association of Public Transport (UITP) (2009). European Union Environmental Legislation: Existing and Proposed Legislation and the Potential Impact on Public Transport.
- IPCC (2007). Fourth Assessment Report: Climate Change.
- ISO (2006) ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Standards Organization
- Jeswani, H. K., Azapagic, A., Schepelmann, P., & Ritthoff, M. (2010). Options for broadening and deepening the LCA approaches. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 120-127.
- Jones, D., Kociolek, A., Surdahl, R., Bolander, P., Drewes, B., Duran, M., ... & Nahra, M. (2013). Unpaved road dust management, a successful practitioner's handbook (No. FHWA-CFL/TD-13-001). Federal Highway Administration.
- Jullien, A., Proust, C., Martaud, T., Rayssac, E., & Ropert, C. (2012). Variability in the environmental impacts of aggregate production. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 1-13.
- Kavouras, I. G., DuBois, D. W., Nikolich, G., Avittia, A. C., & Etyemezian, V. (2016). Particulate dust emission factors from unpaved roads in the US–Mexico border semi-arid region. *Journal of Arid Environments*, 124, 189-192.
- KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Recuperado de: www.lc-inventories.ch.
- La República (2017). Cusco: Población de Calca espera que en julio inicie construcción de teleférico. [online] Disponible en: <https://larepublica.pe/sociedad/1221863-cusco-poblacion-de-calca-espera-que-en-julio-inicie-construccion-de-teleferico> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- La República (2018). Carreteras de la muerte en el sur del Perú. [online] Disponible en: <https://larepublica.pe/sociedad/1166648-carreteras-de-la-muerte>. [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., & Gallice, G. (2017). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(7), 1109-1124.
- Le Maitre, O., Süßner, M., & Zarak, C. (1998). Evaluation of tire wear performance (No. 980256). SAE Technical Paper.
- Leitner Ropeways (s.f.). Portal web de Leitner Ropeways. Telesquí. Disponible en: <https://www.leitner-ropeways.com/es/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Lenzen, M., Sun, Y. Y., Faturay, F., Ting, Y. P., Geschke, A., & Malik, A. (2018). The carbon footprint of global tourism. *Nature Climate Change*, 1.
- Liljenström, C. (2013). Life cycle assessment in early planning of road infrastructure: Application of the LICCER-model.
- Maritime Data Systems (2017). SeaRoutes. Distance calculator, weather routing and voyage planning. Disponible en: <https://bit.ly/2EhFp75> [Último acceso: 3 de diciembre de 2018].
- McBride, A. C., Dale, V. H., Baskaran, L. M., Downing, M. E., Eaton, L. M., Efrogmson, R. A. & Parish, E. S. (2011). Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. *Ecological Indicators*, 11(5), 1277-1289.
- Messmer, A., Frischknecht, F. (2016). Life Cycle Inventories of Air Transport Services. Treeze Ltd. Commissioned by SBB AG, BFE, BAFU, Swisscom AG, Öbu
- Meul, M., Van Middelaar, C. E., de Boer, I. J., Van Passel, S., Fremaut, D., & Haesaert, G.

- (2014). Potential of life cycle assessment to support environmental decision making at commercial dairy farms. *Agricultural Systems*, 131, 105-115.
- Mi Teleférico (s.f.). Portal web de Mi Teleférico. Disponible en: <http://www.miteleferico.bo> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Michailidou, A. V., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., & Maleka, D. (2016). Life Cycle Thinking used for assessing the environmental impacts of tourism activity for a Greek tourism destination. *Journal of Cleaner Production*, 111, 499-510.
- Milachowski, C., Stengel, T., & Gehlen, C. (2010). Life cycle assessment for road construction and use. In 11th International Symposium on Concrete Roads.
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR) (2016). Medición económica del turismo. Dirección General de Investigación y Estudios en Turismo y Artesanía – DGIETA. Lima, Perú. Disponible en: https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/turismo/publicaciones/MEDICION_ECONOMICA_TURISMO_ALTA.pdf [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR) (2017). Gobierno Peruano inauguró el Sistema de Telecabinas de Kuélap. Secretaría General. Oficina de Comunicaciones y Protocolo. Disponible en: <https://www.mincetur.gob.pe/gobierno-peruano-inauguro-el-sistema-de-telecabinas-de-kuelap-2/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR) (2018). Invertirán S/. 200 millones para reducir brecha de infraestructura turística [entrevista]. Lima: Andina Agencia Peruana de Noticias. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-invertiran-s-200-millones-para-reducir-brecha-infraestructura-turistica-entrevista-723494.aspx> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio de Cultura (2017). Resolución Ministerial N°70-2017-MC emitida el 21 de febrero de 2017.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM) (2018). Proyecto de ley multisectorial para el ingreso de autos eléctricos saldrá antes de fin de año. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/proyecto-ley-multisectorial-ingreso-autos-electricos-saldra-ano-244624> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2003). Reglamento Nacional de Vehículos. Decreto Supremo N° 058-2003-MTC. Disponible en: <https://www.mtc.gob.pe/transportes/terrestre/licencias/documentos/D.S.%20058-2003-MTC%20%20Reglamento%20Nacional%20de%20Veh%C3%ADculos.pdf> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2014). Manual de carreteras. Diseño Geométrico. Disponible en: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015) Secretaría Técnica de la Comisión Multisectorial de la iNDC – RS N° 129-2015-PCM
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015). Contribución prevista y determinada a nivel nacional (INDC) de la República del Perú. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/09/ESPA%C3%91OL.pdf>. [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Moretti, M., De Boni, A., Roma, R., Fracchiolla, M., & Van Passel, S. (2016). Integrated assessment of agro-ecological systems: The case study of the “Alta Murgia” National park in Italy. *Agricultural Systems*, 144, 144-155.
- Mroueh UM, 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.
- Mroueh, U. M., Eskola, P., & Laine-Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste management*, 21(3), 271-277.

- Muench S. (2010) Roadway Construction Sustainability Impacts Review of Life-Cycle Assessments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 36–45. Doi: 10.3141/2151-05
- Municipalidad de San Isidro (MSI). Resolución de Gerencia Municipal N° 205-2018-0200-GM MSI. Disponible en: <http://msi.gob.pe/portal/sostenibilidad/bus-electrico/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Nordin, S., (2005). Tourism of Tomorrow. Travel Trends and Forces of Change. ETOUR European Tourism Research Institute, Östersund. ISBN 91-974657-7-1
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2011). Climate change and tourism policy in OECD countries.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) (2014). *Reporte de Análisis Económico Sectorial. Electricidad*. Oficina de Estudios Económicos - OEE Año 3 N° 4 Noviembre 2014
- Peeters, P., & Dubois, G. (2010). Tourism travel under climate change mitigation constraints. *Journal of Transport Geography*, 18(3), 447-457.
- PerúCámaras (2017). El 89.9% de las carreteras no están pavimentadas a nivel departamental. Lima: Perú 21. Disponible en: <https://peru21.pe/economia/89-9-carreteras-pavimentadas-nivel-departamental-85563> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Pontarollo G., Smith T., (2001), A life-Cycle Analysis Of the Environmental Impacts of Asphalt and Concrete Road. Paris IRF World Road Congress.
- PRé Consultants (2018). Life Cycle Assessment Software (version 8.4) [Software]. - Holanda.
- PRé-Consultants, S. (2014). Life Cycle Assessment Software (version 8.0.5.) [Software]. The Netherlands.
- ProInversión - Agencia de Promoción de la Inversión Privada (2017). ProInversión: existe interés para invertir en más teleféricos en el país. Lima: Andina Agencia Peruana de Noticias. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-proinversion-existe-interes-para-invertir-mas-telefericos-el-pais-679548.aspx> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- ProInversión (2016). Proceso de promoción de la inversión privada. Sistema de Telecabinas de Kuélap. Disponible en: http://www.investinperu.pe/RepositorioAPS/1/2/JER/PC_TURISMO_KUELAP/TELECABINAS__KUELAP_NOV_2013_ESP_PPTX.pdf [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- PROMPERÚ (2018). Servicio iPerú - Información Turística de Perú y Asistencia al Turista. *Complejo Arqueológico de Choquequirao*. Obtenido de: https://www.ytuqueplanes.com/destinos/cusco/84_complejo-arqueologico-de-choquequirao [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- Quispe I, Vázquez-Rowe I, Kahhat R, Arena AP, Suppen N (2016). Life Cycle Assessment: a tool for innovation in Latin America. *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi:10.1007/s11367-0161178-6
- Rebitzer G., Ekvallb T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norrise G., Rydberg T, Schmidt W.-P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30, pp 701– 720.
- SAIC (2006). Life Cycle Assessment: Principles and practice. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S.
- Santero, N. (2010). Life cycle assessment of pavements: a critical review of existing literature and research.
- Schulze, C., Jödicke, A., Scheringer, M., Margni, M., Jolliet, O., Hungerbühler, K., & Matthies, M. (2001). Comparison of different life-cycle impact assessment methods for aquatic ecotoxicity. *Environmental toxicology and chemistry*, 20(9), 2122-2132.
- Scipioni, A., Mazzi, A., Niero, M., & Boatto, T. (2009). LCA to choose among alternative design solutions: the case study of a new Italian incineration line. *Waste*

management, 29(9), 2462-2474.

- Slagstad, H., & Brattebø, H. (2013). Use of LCA to evaluate solutions for water and waste infrastructure in the early planning phase of carbon-neutral urban settlements. *Smart and Sustainable Built Environment*, 2(1), 28-42.
- Stolz P., Messmer A., Frischknecht R. (2016) mobitool-Faktoren v2.0: Umweltdaten und Emissionsfaktoren von mobitool. treeze Ltd., Uster, CH.
- Stripple H. (2001), Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis. *Rapport IVL Swedish Environmental Research Institute*, 96p. and annex.
- Tang, C., Zhong, L., Fan, W., & Cheng, S. (2015, May). Energy consumption and carbon emission for tourism transport in World Heritage Sites: a case of the Wulingyuan area in China. In *Natural Resources Forum* (Vol. 39, No. 2, pp. 134-150).
- Thabrew, L., Wiek, A., & Ries, R. (2009). Environmental decision making in multi-stakeholder contexts: applicability of life cycle thinking in development planning and implementation. *Journal of Cleaner Production*, 17(1), 67-76.
- UNEP. (2008). Climate Change Adaptation and Mitigation in the Tourism Sector: Frameworks, Tools and Practices.
- UNEP. (2006). Resource efficiency and sustainable consumption and production: Tourism's three main impact areas.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) (2001a). Masada. World Heritage List. World Heritage Center. Disponible en: <https://whc.unesco.org/en/list/1040> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) (2001b). Hua Shan Scenic Area - TENTATIVE LIST 2001. World Heritage List. World Heritage Center. Disponible en: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/1626/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) (2011). Kuelap Archaeological Complex - TENTATIVE LIST 2001. World Heritage List. World Heritage Center. Disponible en: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/5650/> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- United Nations Environment (2018). Sustainable Tourism Value Chain Project: Transforming tourism value chains for sustainable development. Economy Division
- United Nations World Tourism Organization (2016). *Panorama OMT del turismo internacional 2016*. Programa de Estadísticas, Tendencias y Política de la OMT.
- UNWTO (2007). Tourism & Climate Change: Confronting the Common Challenges.
- UNWTO y UNEP (2008). Climate Change and Tourism: Responding to Global Challenges. World Tourism Organisation, Madrid.
- UNWTO-UNEP-WMO—United Nations World Tourism Organisation-United Nations Environment Programme-World Meteorological Organisation. (2008). Climate change and tourism: Responding to global challenges. Madrid: UNWTO
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler, K., Laso J., Quispe, I., Aldaco, R., Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*. Aceptado para publicación.
- Vázquez-Rowe, I., Reyna, J. L., García-Torres, S., & Kahhat, R. (2015). Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? *Applied Energy*, 159, 108-116.
- Ventura, A., & Jullien, A. (2009). Life Cycle Assessment applied to road pavements: an analysis of method and results relevancy.
- Verán-Leigh, D., Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American Highway in Peru using Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Aceptado para publicación.

- Watson J.G., C. J. (2000). Fugitive dust emissions. En W. T. Davis, *Air Pollution Engineering Manual* (págs. 117-135). New York: John Wiley & Sons, Inc
- World Economic Forum (WEF) (2017). The Travel & Tourism Competitiveness Report 2017 - Paving the way for a more sustainable and inclusive future. Disponible en: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2017_web_0401.pdf [Último acceso: 3 de setiembre de 2018]
- World Travel and Tourism Council (2017). Impacto del sector de viajes y turismo en las ciudades - América Latina. Sector de Viajes y Turismo. Disponible en: <https://bit.ly/2Nlkfzu> [Último acceso: 3 de setiembre de 2018].
- Zhao, Y., Wang, H. T., Lu, W. J., Damgaard, A., & Christensen, T. H. (2009). Life-cycle assessment of the municipal solid waste management system in Hangzhou, China (EASEWASTE). *Waste Management & Research*, 27(4), 399-406.

