

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

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

**“Evaluación técnica y ambiental de la sustitución de lubricantes minerales por  
biolubricantes en las plantas hidroeléctricas Reventazón, Angostura y Río Macho,  
ICE”**

Jacqueline Vivianna Sánchez Avendaño

CARTAGO, julio, 2019

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica  
Ingeniería Ambiental

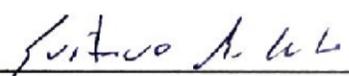


**“Evaluación técnica y ambiental de la sustitución de lubricantes minerales por biolubricantes en las plantas hidroeléctricas Reventazón, Angostura y Río Macho, ICE”**

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

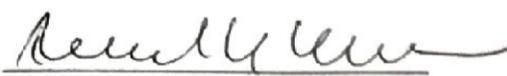
**Miembros del tribunal**

  
**Ing. Carlos Roldán Villalobos**  
Director

  
**Ing. Gustavo Calvo Domingo**  
Lector 1

  
**MSc. Luis Guillermo Valerio Pérez**  
Lector 2

  
**MSc. Diana Zambrano Piamba**  
Coordinadora COTRAFIG

  
**MGA. Ricardo Coy Herrera**  
Director Escuela de Química

  
**MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga**  
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

## **DEDICATORIA**

A mis padres y mi nano, quienes me han acompañado, alentado, ayudado, motivado durante todas mis etapas de vida y en mis estudios.

A Dios y la virgen de los Ángeles, por darme las fuerzas, el aliento y la pasión para salir adelante frente a cada adversidad que se presentó.

*"Comienza haciendo lo que es necesario, después lo que es posible y de repente estarás haciendo lo imposible"*

*San Francisco de Asís*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y la virgen de los Ángeles por permitirme cumplir esta meta.

A mis padres y mi nano, por todos los esfuerzos que han hecho por hacer posible esta meta.

A las chicas, que a pesar de que en ocasiones estemos lejos mientras cada una cumple sus metas y sueños, seguimos unidas apoyándonos unas a otras.

A mis compañeras y colegas, por convertirse en verdaderas amigas ¡Llegamos juntas a alcanzar nuestra meta!

A nene, gracias por ayudarme, apoyarme y acompañarme. Los ángeles existen.

A Vic y Brayan, hermanos que me dejó este paso por la universidad, gracias por cuidarme y chinearne tanto.

A Ritmotec, por hacer de la universidad una etapa extraordinaria. En especial, a mis bailarinas favoritas Kari y Sam.

A Doña Cecilia, gracias por confiar en mí y tocar las puertas que hicieron posible este proyecto.

A Don Gustavo, por abrirme las puertas y confiar en mi proyecto.

## Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
1.1.1	Objetivo general .....	3
1.1.2	Objetivos específicos .....	3
<b>2</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1	<i>LUBRICANTES</i> .....	5
2.1.1	Aceites hidráulicos minerales .....	6
2.1.2	Aceites vegetales .....	9
2.1.3	Biolubricantes .....	9
2.2	<i>INVESTIGACIONES SIMILARES</i> .....	13
2.3	<i>IMPACTO AMBIENTAL</i> .....	14
2.3.1	Análisis ciclo de vida y huella de carbono .....	15
2.3.2	Legislación .....	16
2.4	<i>PLANTAS HIDROELÉCTRICAS</i> .....	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>20</b>
3.1	<i>IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES</i> .....	21
3.1.1	Huella de carbono .....	22
3.2	<i>COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS</i> .....	31
3.2.1	Requerimientos específicos para lubricantes ISO VG 46 .....	31
3.3	<i>ANÁLISIS FINANCIERO</i> .....	32
3.3.1	Selección del biolubricante .....	32
3.3.2	Análisis beneficio/costo .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>34</b>
4.1	<i>IMPACTOS AMBIENTALES</i> .....	34
4.1.1	Huella de carbono .....	36
4.2	<i>COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS</i> .....	55
4.3	<i>IMPACTO FINANCIERO</i> .....	57
4.3.1	Biolubricante seleccionado .....	57
4.3.2	Análisis beneficio/costo .....	58

<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
5.1	<i>CONCLUSIONES.....</i>	61
5.2	<i>RECOMENDACIONES.....</i>	62
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>APÉNDICES .....</b>	<b>73</b>
	<i>APÉNDICE 7.1. CUESTIONARIO: INFORMACIÓN GENERAL .....</i>	<i>73</i>
	Apéndice 7.1.1. Cuestionario Planta Hidroeléctrica Angostura .....	73
	Apéndice 7.1.2. Cuestionario Planta Hidroeléctrica Río Macho. ....	74
	Apéndice 7.1.3 Cuestionario Planta Hidroeléctrica Reventazón.....	75
	<i>APÉNDICE 7.2. REQUIRIMIENTOS DE LUBRICANTE.....</i>	<i>77</i>
	<i>APÉNDICE 7.3. FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub>.....</i>	<i>79</i>
	<i>APÉNDICE 7.4. AHORRO EMISIONES.....</i>	<i>81</i>
	<i>APÉNDICE 7.5. ESCENARIOS: LUBRICANTE RELLENADO EN UN AÑO. ....</i>	<i>82</i>
	<i>APÉNDICE 7.6. CUESTIONARIO: VALORACIÓN CONTINGENTE. ....</i>	<i>83</i>
	<i>APÉNDICE 7.7. RESPUESTAS CUESTIONARIO VALORACIÓN CONTINGENTE. ....</i>	<i>85</i>
	<i>APÉNDICE 7.8. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO.....</i>	<i>85</i>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>
	<i>ANEXO 8.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS TÍPICAS DE LOS ACEITES.....</i>	<i>87</i>
	<i>ANEXO 8.2. CICLO DE VIDA: BIOLUBRICANTE Y LUBRICANTE MINERAL.....</i>	<i>89</i>
	<i>ANEXO 8.3. COTIZACIONES BIOLUBRICANTES .....</i>	<i>90</i>
	<i>ANEXO 8.4. INFORMACIÓN BIOLUBRICANTE LUBRIPLATE BIOBASED GREEN HYDRAULIC FLUIDS ISO 46.....</i>	<i>91</i>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1. Residuos generados en las plantas hidroeléctricas (G. Calvo Domingo, vía correo electrónico, 2019).</b> .....	7
<b>Figura 2.2. Residuos peligrosos vs aceites (G. Calvo Domingo, vía correo electrónico, 2019).</b> .....	8
<b>Figura 2.3. Plantas hidroeléctricas, Región Huetar, ICE. Fuente propia.</b> .....	18
<b>Figura 2.4. Partes de una planta hidroeléctrica. Tomado de (ENULA, 2018)</b> .....	19
<b>Figura 3.1. Atribución por sector de las emisiones provenientes de lubricantes. Tomado y adaptado del Volumen 3: procesos industriales y uso de productos, capítulo 5, del IPCC (Olivier et al., 2006)</b> .....	21
<b>Figura 4.1. Diagrama sobre la disposición de los lubricantes de origen mineral, ICE.</b> 40	
<b>Figura 4.2. Gráfico ahorro actual de emisiones de CO<sub>2</sub> eq en las plantas hidroeléctricas.</b> .....	53
<b>Figura 4.3. Gráfico ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> eq usando biolubricantes en las plantas hidroeléctricas.</b> .....	53
<b>Figura 4.4. Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, presentación 5 galones.</b> .....	57

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1. Empresas consultadas que ofrecen biolubricantes.</b> .....	12
<b>Cuadro 3.1. Requisitos para lubricantes ISO VG 46.</b> .....	31
<b>Cuadro 4.1. Categorías evaluadas en el ACV de lubricantes y biolubricantes.</b> .....	35
<b>Cuadro 4.2. Cantidad de lubricante requerido para el funcionamiento de las partes en estudio y desglose según la naturaleza del lubricante.</b> .....	36
<b>Cuadro 4.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la producción de lubricantes de origen mineral.</b> .....	37
<b>Cuadro 4.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de lubricante de origen mineral necesario para que los equipos operen, por medio del método 1 y 2.</b> .....	38
<b>Cuadro 4.5. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cogeneración de lubricantes contaminados.</b> .....	41
<b>Cuadro 4.6. Cantidad de lubricante mineral que rellenan en cada planta por año, según los escenarios contemplados.</b> .....	42
<b>Cuadro 4.7. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de lubricante necesario para que los equipos operen durante un año, según el escenario A y B.</b> .....	42
<b>Cuadro 4.8. Factores energéticos, requerimientos e insumos para el cultivo de 7 ha de colza, clima caliente.</b> .....	44
<b>Cuadro 4.9. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del proceso de cultivo de colza.</b> .....	45
<b>Cuadro 4.10. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del cultivo de 7 ha de colza.</b> .....	47
<b>Cuadro 4.11. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la producción del biolubricante, por 1 kg de aceite.</b> .....	47
<b>Cuadro 4.12. Emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del cultivo y producción de biolubricante, por kg de aceite.</b> .....	48
<b>Cuadro 4.13. Emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del cultivo y producción de biolubricante, por 47 767 kg de aceite requerido.</b> .....	48
<b>Cuadro 4.14. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de biolubricante necesario para que los equipos operen.</b> .....	49
<b>Cuadro 4.15. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de biolubricante necesario para que los equipos operen durante un año, según el escenario A y B.</b> .....	51

<b>Cuadro 4.16. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de 1 l de lubricante de origen mineral.....</b>	<b>51</b>
<b>Cuadro 4.17. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de 52 294 l de lubricante de origen mineral. .....</b>	<b>52</b>
<b>Cuadro 4.18. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes si solo se usaran biolubricantes en las plantas.....</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro 4.19. Comparación de las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes de origen mineral y biolubricantes. ....</b>	<b>56</b>
<b>Cuadro 4.20. Indicadores económicos, escenario A. ....</b>	<b>59</b>
<b>Cuadro 4.21. Indicadores económicos, escenario B.....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
A.C	Antes de Cristo
AP	Potencial de acidificación
B/C	Relación Beneficio/Costo
BIOVESIN	Biolubricantes basados en aceites vegetales y sus derivados sintéticos
BIO	Biolubricante
CC <small>Lubricante</small>	Contenido de carbono de los lubricantes
cSt	Centistokes
°C	Grado Celsius
C	Carbono
CE	Cantidad de energía consumida
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de carbono equivalente
DAP	Máxima disposición a pagar
DGCACC	Dirección General de Calidad Ambiental y Cambio Climático
ED	Emisiones directas
EP	Potencial de eutrofización
FONAFIFO	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
GIRS	Ley para la Gestión Integral de Residuos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg	Gigagramo
g	Gramo
ha	Hectárea
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
ISO	International Organization for Standardization
km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado
kg	Kilogramo
kcal	Kilocaloría
l	Litro

LC	Consumo total de lubricantes
LM	Lubricante de origen mineral
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MADISA	Manejo de Desechos Industriales S.A.
Min	Mínuto
MJ	Megajulio
ml	Mililitro
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
ODU	Oxidación durante el uso
PAOs	Polialfaolefinas
PCG	Potencial de agotamiento del ozono
POCP	Potencial de creación de fotooxidantes
ppm	Partes por millón
PWG	Potencial de calentamiento global
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
TJ	Terajulio
t	Tonelada métrica
VAN	Valor Actual Neto
VG	Grado de viscosidad

## RESUMEN

En la generación de energía hidroeléctrica se utilizan lubricantes para la operación de las unidades generadoras y de los equipos hidráulicos de la presa. Los lubricantes son de origen mineral (derivados del petróleo) y liberan importantes emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al aumento de los gases de efecto invernadero, entre otros problemas ambientales. Es por esta razón que hay interés en sustituir este tipo de lubricantes por biolubricantes, que se obtienen a partir de semillas oleaginosas de plantas, como la colza. Para determinar el impacto económico y ambiental de realizar la sustitución propuesta, se analizaron los impactos ambientales de los lubricantes y biolubricantes por separado realizando un análisis de ciclo de vida de ambos productos para evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> eq que se derivan de la producción, uso y disposición. Se revisó el mercado actual de los biolubricantes para analizar las opciones disponibles y después de estudiar las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes y los biolubricantes disponibles se determinó que son estructuralmente afines, por lo que los biolubricantes ofrecidos por el mercado están en capacidad de cumplir bien la tarea de lubricación, por lo que es posible utilizarlos en la operación de los equipos existentes en las plantas hidroeléctricas. Tomando en consideración el ciclo de vida de ambos productos, se determinó que mientras los lubricantes emiten 3,93 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, los biolubricantes producen 1,06 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, es decir, al usar biolubricantes se logran reducir 2,87 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, por lo que se concluyó que los biolubricantes son más amigables con el ambiente. La evaluación financiera permitió determinar que la utilización de biolubricantes representa un costo mayor a la hora de comprar el producto, pero los beneficios ambientales superan los costos, por lo que el proyecto es recomendable desde la perspectiva técnica, ambiental y financiera.

**Palabras clave:** Energía hidroeléctrica, Evaluación ambiental y financiera, Análisis ciclo de vida, Lubricantes de origen mineral, Biolubricantes

## **ABSTRACT**

In production of hydroelectric energy is used lubricants for the operation of the generating units and the hydraulic equipment of the dam. These lubricants are petroleum derived (mineral origin), therefore they release important CO<sub>2</sub> emissions, contributing with the increase of greenhouse gases, among other environmental problems. For this reason, there is interest in the substitution of this type of lubricants for biolubricants obtained from oleaginous seeds of plants, such as rapeseed. To determine the environmental impact of the proposed substitution, the lubricants and biolubricants were evaluated separately through a life cycle analysis that allowed the identification of the emissions derived from the production, use and disposal. The current biolubricant market was reviewed to analyze the available options. After the study of the physicochemical properties of the available lubricants and biolubricants, structural affinity was determined and thus, the biolubricants offered in the market are able to comply with the lubrication task. Thereby, the biolubricants could be used in the operation of the existing equipment in hydroelectric plants. Taking into consideration the life cycle of both products, it was determined that the lubricants emit 3,93 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricant, while the biolubricants produce 1,06 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricant, so the use of biolubricants implies a reduction of 2,87 kg CO<sub>2</sub> eq/l lubricant. Hence, it was concluded that the biolubricants are more environmentally friendly. Through the financial evaluation it was elucidated that the usage of biolubricants represents a major cost when buying the product, nevertheless, the environmental benefits exceed the costs. Then, it is concluded that the project is recommended from a technical, environmental and financial perspective.

**Key words:** Hydroelectric power, Environmental and economic evaluation, Life cycle analysis, Lubricants of mineral origin, Biolubricants

# 1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático se define como un cambio en los patrones del clima, con un aumento en la temperatura de la atmósfera y representa una amenaza ambiental, social y económica para el planeta. Es provocado por razones naturales o antropogénicas. Se considera que la principal causa del cambio climático es el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), que son emitidos a la atmósfera resultantes de actividades humanas, entre éstas, la refinación de petróleo (Espíndola & Valderrama, 2018). El aumento de los GEI se volvió una situación alarmante debido a sus repercusiones en la Tierra, por lo que en el 2015 se aprobó el Acuerdo de París, que tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2 °C respecto a los niveles preindustriales y tiene como meta, su aplicabilidad para el año 2020 (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f). Costa Rica firmó dicho acuerdo, por lo que debe trabajar en establecer medidas para mitigar los GEI.

La refinación de petróleo es una de las actividades que más emite GEI, por cada millón de toneladas de crudo procesadas en una refinería, se emiten de 20 000 a 82 000 t CO<sub>2</sub> y otros GEI, además, provoca impactos negativos a nivel de agua y tierra (Nieto, 2011). De esta actividad se obtienen diferentes productos, entre estos, lubricantes. Los lubricantes están compuestos mayoritariamente por hidrocarburos y se utilizan en maquinarias, con el propósito de reducir el desgaste de las piezas que se rozan entre sí, transferir energía potencial o cinética, eliminar calor y proteger al sistema de la corrosión (Danfoss, 2016). Debido a que son derivados del petróleo, son considerados productos peligrosos, dado que su producción, uso y disposición repercuten negativamente al ambiente y su impacto se ve reflejado tanto en las emisiones de CO<sub>2</sub> eq como en la contaminación a fuentes de agua o tierra, si llega a tener contacto con estas matrices.

Al ser un producto esencial pero riesgoso para el ambiente, se han realizado investigaciones para cambiarlos por lubricantes de base biológica, llamados biolubricantes, los cuales están elaborados a base de aceites vegetales obtenidos de semillas oleaginosas, como la colza y presentan la característica de que son biodegradables y no tóxicos para el medio ambiente (Ramírez, 2014), por lo anterior, el origen de este proyecto surge del interés del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> eq que se liberan

durante todo el ciclo de vida de los lubricantes utilizados, como la posibilidad de contaminación si los lubricantes entran en contacto con el agua de los ríos y el embalse; esto por la gran cantidad de lubricantes que se utilizan en las plantas hidroeléctricas para poner en funcionamiento las unidades generadoras (casa máquinas) y los componentes de los vertedores en las presas, por lo que se ha propuesto estudiar la factibilidad técnica, ambiental y económica de sustituir los lubricantes de origen mineral que se utilizan, por biolubricantes.

Para presentar la propuesta y dar evidencia de que el producto funciona para las necesidades requeridas, se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV) de ambos productos, para comparar si efectivamente se disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> eq, se compararon las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes minerales con las de los biolubricantes existentes en el mercado y se evaluó el impacto financiero que provocaría la sustitución, en las finanzas de la empresa.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Realizar una evaluación técnica y ambiental de la sustitución de lubricantes minerales por biolubricantes.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Identificar los impactos ambientales de la producción, uso y disposición de lubricantes minerales y biolubricantes en el ambiente utilizando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
2. Comparar las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes minerales con las de los biolubricantes existentes en el mercado.
3. Determinar los impactos financieros de la sustitución.



## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este trabajo aporta información para definir acciones para lograr reducir la huella de carbono por el uso de lubricantes derivados del petróleo. Para lo cual es importante abordar el tema de los lubricantes, biolubricantes, experiencias previas de proyectos similares, el impacto ambiental que tienen ambos productos en el ambiente, así como la legislación que rige a Costa Rica en torno al tema e información sobre plantas hidroeléctricas.

### 2.1 LUBRICANTES

El aceite hidráulico debería llamarse lubricante, sin embargo, comúnmente es llamado simplemente aceite (Ramírez, 2014). Los lubricantes se emplean en diversa maquinaria y tienen el propósito de reducir el desgaste de las piezas que se rozan entre sí, transferir energía potencial o cinética, eliminar calor y proteger al sistema de la corrosión (Danfoss, 2016).

El libro *Hydraulic Fluids and Lubricants Oils, Lubricants, Grease, Jelly* de Danfoss (2016), señala que los aceites hidráulicos son fluidos que consisten en la mezcla de un fluido base (75-85%) y un paquete de aditivos (15-25%) los cuales se utilizan para mejorar la lubricación modificando las propiedades del fluido base. El fluido base puede ser diferente según el método de refinación, la cantidad de hidrocarburos saturados, la viscosidad y el porcentaje de azufre.

Según García Colomer, en su tesis sobre “Diseño, selección y producción de nuevos biolubricantes” (2011), las características más importantes que debe tener un fluido para su uso como lubricante son: viscosidad, buenas propiedades en frío y la estabilidad oxidativa y térmica, y Solorzano (2017) indica que también es importante, el punto de fluidez y la estabilidad de corte, esto se refiere a la resistencia que tiene el aceite ante altos esfuerzos mecánicos.

Las propiedades fisicoquímicas más importantes de los lubricantes son (Salazar et al., 2015):

- **Densidad:** relación entre la masa de un volumen dado de aceite y un volumen igual de agua, para los lubricantes normalmente se indica a 15 °C.
- **Viscosidad:** es la resistencia de un líquido a fluir. El índice de viscosidad, es el valor que indica la variación de viscosidad del aceite con la temperatura. Cuando se calienta un aceite, éste se vuelve más fluido y su viscosidad disminuye, lo contrario a baja temperatura.
- **Untuosidad:** es la adherencia de los aceites a las superficies metálicas a lubricar y se manifiesta cuando el espesor de la película de aceite se reduce al mínimo, sin llegar a la lubricación límite.
- **Punto de inflamación:** está determinado por la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos se inflaman en presencia de una llama. Un punto de inflamación alto es signo de calidad en el aceite.
- **Punto de congelación:** temperatura a partir de la cual el aceite pierde sus características de fluido y empieza a comportarse como una sustancia sólida.
- **Oxidación:** consiste en la reacción con oxígeno de las moléculas presentes en el lubricante, haciendo que estas pierdan su estructura original y con ello las propiedades originales. La oxidación es la principal causa de degradación del aceite.

Según el fluido base, los aceites pueden ser de origen animal, vegetal, mineral o sintético (Salazar et al., 2015), en los siguientes apartados se definen los de interés para este proyecto.

### 2.1.1 Aceites hidráulicos minerales

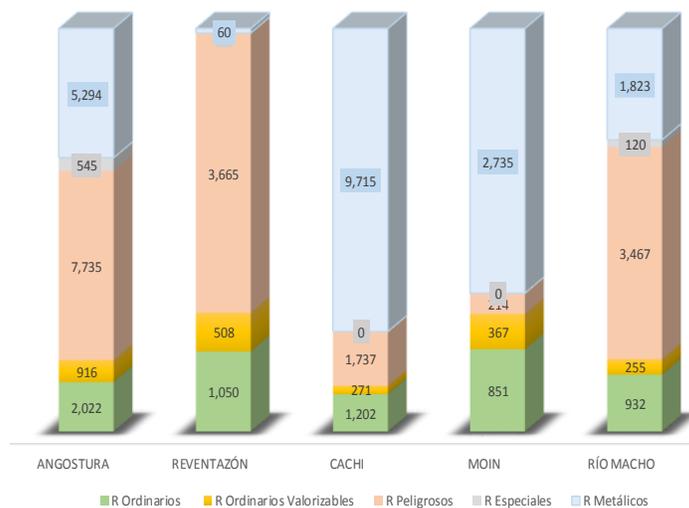
En este proyecto para hacer referencia a los aceites hidráulicos minerales, se utilizó el término lubricante. Los lubricantes de origen mineral, son productos obtenidos de la destilación y refinación del petróleo y están compuestos mayoritariamente por hidrocarburos (Ministerio de Sanidad y Servicios Sociales e Igualdad & AECOSAN, 2017).

Sus propiedades fisicoquímicas son: buena densidad, alta viscosidad, buena estabilidad térmica y oxidativa, buenas propiedades en frío, mala biodegradabilidad y tóxicos (Salazar et al., 2015). Estos productos al ser derivados del petróleo, son considerados productos

peligrosos para el ambiente, Figueroa (2008) define producto peligroso como “aquel que puede representar un riesgo para la seguridad y salud de las personas o causar daños al medio ambiente, debido a sus propiedades fisicoquímicas, químicas o toxicológicas y a la forma en que se utiliza o se halla presente”.

Dado a las propiedades fisicoquímicas que se expusieron, se asegura que los lubricantes de origen mineral son productos peligrosos, ya que pueden causar alteraciones en tierra, aire y agua. En el suelo pueden ocasionar infertilidad debido a los hidrocarburos presentes en el aceite, en el aire pueden causar problemas de emisión de gases tóxicos si el aceite usado es quemado y si el aceite llega a ser vertido en el agua de forma directa o por medio de alcantarillado, puede causar la muerte de fauna y flora acuática (Barrera & Velecela, 2015).

En las plantas hidroeléctricas en cuestión, el Ing. Calvo Domingo, coordinador del Área Socioambiental de la Región Huatar, ICE, realizó un análisis en el que concluyó que en las plantas hidroeléctricas se producen varios tipos de residuos, entre estos, residuos peligrosos de los cuales el 68% corresponden a lubricantes, tal como se observa en las figuras 2.1 y 2.2 respectivamente (G. Calvo Domingo, conversación personal, 2019).



**Figura 2.1. Residuos generados en las plantas hidroeléctricas (G. Calvo Domingo, vía correo electrónico, 2019).**

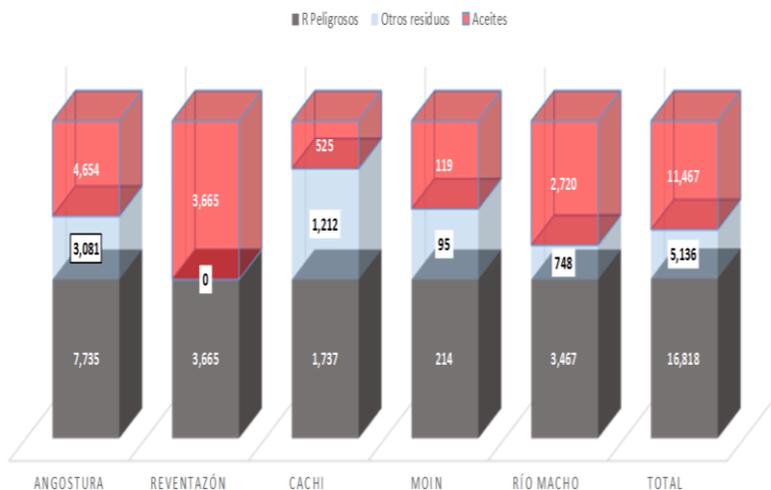


Figura 2.2. Residuos peligrosos vs aceites (G. Calvo Domingo, vía correo electrónico, 2019).

### 2.1.1.1 Mantenimiento

Los lubricantes de origen mineral se utilizan en las plantas para el mantenimiento y funcionamiento de los equipos. El mantenimiento se refiere a la reparación y cuidado de los diferentes equipos y máquinas (InnMain, 2015).

Los mantenimientos incluyen dos actividades: inspecciones visuales y lubricación (García, 2003). Para realizar la lubricación de los equipos de las plantas hidroeléctricas del ICE se utilizan los siguientes lubricantes hidráulicos minerales: Shell ISO VG 46 turbo t, Equivis ISO VG 46, Shell tellus S2 MX 46 y Mobil DTE Medium ISO 46; tal como se observa los aceites mencionados tienen en común la característica ISO VG 46 o el número 46, esto se refiere al grado de viscosidad del aceite. Según la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés), la clasificación de viscosidad ISO está basada en la viscosidad cinemática en centistokes (cSt) a 40 °C (Swissoil, 2012). La viscosidad se define como “una propiedad característica fundamental de todos los líquidos. Cuando fluye un líquido tiene una resistencia interna al flujo y la viscosidad es una medida de esta resistencia” (Viswanath, Ghosh, Prasad, Dutt & Rani, 2007). En el Anexo 1 se encuentran las características físicas de cada uno de los aceites lubricantes nombrados.

Tal como se señaló, los lubricantes de origen mineral son un producto fundamental para el buen rendimiento de los equipos, sin embargo, son catalogados como productos peligrosos y pueden tener impactos negativos en el medio ambiente; por esta razón, existe interés en

utilizar lubricantes de origen vegetal para sustituir su uso y disminuir los impactos negativos que pueden provocar al ambiente.

### **2.1.2 Aceites vegetales**

Los aceites vegetales fueron utilizados como lubricantes desde 1 650 A.C., hasta la revolución industrial de fines del siglo XVIII y su expansión al siglo XIX. En ese momento se estimuló la necesidad de lubricantes de bajo costo, con mayor estabilidad térmica y oxidativa, por lo que fueron sustituidos por aceites derivados del petróleo (Gawrilow, 2005).

Sin embargo, actualmente se está tratando de reincorporar los aceites de origen vegetal al mercado, debido a que la humanidad ha empezado a tomar conciencia sobre los actos realizados contra la naturaleza. Mobarak et al. (2014) mencionan que otras razones por las que se ha despertado nuevamente el interés por desarrollar y utilizar aceites de origen vegetal como lubricantes son: el aumento de los precios, el agotamiento del petróleo crudo y la preocupación mundial por proteger el medio ambiente de la contaminación.

La conciencia ambiental hoy en día es el principal motor para el desarrollo tecnológico, por lo tanto, los productos biodegradables están siendo ampliamente explorados. Los aceites vegetales son un ejemplo, ya que muestran un gran potencial y son candidatos muy atractivos para reemplazar los aceites minerales convencionales, debido a que estructuralmente son similares, pero con las características de ser renovables, no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente, además su eliminación es una preocupación menor debido a su naturaleza (Heikal, Elmelawy, Khalil et al., 2017).

### **2.1.3 Biolubricantes**

Son lubricantes elaborados a base de aceites vegetales, obtenidos de los ésteres de ácidos grasos de semillas (Ramírez, 2014). Este término según Salimon, Salih y Yousif (2010) aplica a todos los lubricantes que son rápidamente biodegradables y no tóxicos para los seres humanos y otros organismos vivos, por lo que el término también aplica para lubricantes sintéticos y semisintéticos, que cumplen dichas características. Los lubricantes sintéticos pueden ser de dos tipos: los que son creados de subproductos petrolíferos combinados en procesos de laboratorio (Salazar et al., 2015) y los que utilizan como base moléculas

obtenidas por síntesis en laboratorio, del tipo polialfaolefinas (PAOs) el cual es un hidrocarburo, a estos se les conoce como lubricantes 100% sintéticos (García, 2011) mientras que los semisintéticos, se obtienen de mezclar bases minerales con un 30% de base sintética (Salazar et al., 2015).

En cuanto a la biodegradabilidad, los aceites minerales lo son un 20-40%, mientras que los aceites vegetales se biodegradan en un 90-100%, además, son capaces de degradarse aproximadamente un 80% en un plazo de 21 días, según la prueba de biodegradabilidad CEC L-33-T-82 (Ramírez, 2014), mientras que la biodegradabilidad de los sintéticos varía de un 50-100% (Figueredo, 2011).

Para esta investigación interesan los aceites producidos con base de aceite vegetal, los cultivos más comunes para la producción de estos biolubricantes son, soja y colza (Bart et al., 2013). Para que los aceites vegetales puedan ser usados como lubricantes deben sufrir una serie de modificaciones en laboratorio mediante síntesis químicas, para así obtener como producto final un biolubricante que cumpla con todas las características necesarias de un lubricante, las cuales se mencionaron en el punto 2.1.1.

Hay varias ventajas que motivan esta sustitución, a continuación, se mencionan algunas:

- Son una materia prima biodegradable, renovable y puede ser de producción local (Garcés, Martínez-Force & Salas, 2011).
- Los lubricantes de base biológica exhiben propiedades fisicoquímicas y lubricantes superiores a los lubricantes minerales convencionales (Syahir et al., 2017), tales como biodegradabilidad, baja toxicidad, excelente lubricación, alto índice de viscosidad, buena adhesión a las superficies metálicas, punto de inflamación elevado y mínimo impacto en la salud y el medio ambiente (McNutt & He, 2016).
- El aceite vegetal puede extraerse de semillas oleaginosas, ejemplo: girasol, algodón, palma, oliva; este grupo de semillas representa el segundo más grande de los productos agrícolas que se comercializan a nivel internacional, por lo que son bastante abundantes (Naciones Unidas, 2004).

Pero a pesar de los beneficios que presentan los biolubricantes, también hay que enfrentar una serie de desventajas en cuanto a las características fisicoquímicas, que se convierten en desafíos para esta sustitución, ya que los aceites vegetales tienen menor estabilidad térmica y de oxidación. La estabilidad térmica se refiere a la capacidad del aceite para resistir la degradación bajo condiciones de altas temperaturas con un mínimo de oxígeno presente y la estabilidad oxidativa es la capacidad del aceite para resistir la degradación, principalmente por presencia de oxígeno (Salazar et al., 2015). Sin embargo, presentan mayores puntos de fluidez, que se define como, la temperatura más baja a la cual un lubricante fluirá (Garcés, Martínez & Salas, 2011).

Además, a la hora de hacer el cambio, hay que considerar que se puede dar una contaminación entre el lubricante de origen mineral y el nuevo biolubricante. Este cruce puede provocar excesiva producción de espuma, deficiente liberación de aire u obstrucción de filtros, lo que se ve reflejado en un mal funcionamiento o daños pequeños en la maquinaria, por esta razón se recomienda que a la hora de hacer el cambio se drenen las máquinas varias veces al día hasta que no quede nada del antiguo aceite para evitar que ambos fluidos se mezclen (Noria, 2013).

#### ***2.1.3.1 Mercado de biolubricantes***

Según Bart, Gucciardi, Cavallaro en su artículo denominado “Epilogue: the outlook for biolubricant science and technology” (2013), el cambio progresivo de la industria química a materias primas renovables y sostenibles es una necesidad inevitable y será nombrada como economía de base biológica.

Sin embargo, los autores descritos anteriormente en otro artículo titulado “Markets for biolubricants” (2013) aseveran que la perspectiva del mercado para los biolubricantes está influenciada por factores políticos, económicos, demográficos, ambientales y regulatorios, además de eso, hay limitaciones que restringen la inducción de los biolubricantes al mercado, como el costo y la falta general de conocimiento del potencial técnico de estos. Pero a pesar de lo mencionado, en diversos países ya se están comercializando y utilizando los biolubricantes, por ejemplo, en España, Alemania y México. En el cuadro 2.1, se mencionan algunas empresas consultadas que ofrecen estos productos.

**Cuadro 2.1. Empresas consultadas que ofrecen biolubricantes.**

<b>Empresa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Países</b>	<b>Producto</b>
Total S.A.	Grupo empresarial del sector petroquímico y energético (Total, s.f).	Distribuidores internacionales	-Biolubricantes: agua, obras públicas, montaña, forestal, agricultura. -Denominados BIOHYDRAN TMP 32, 46,68.
LTS/ Hi-Tec-Lub	Aceites hidráulicos biodegradables equivalentes a ISO 32, 46, 48, 68, 150 y 220. Con aditivos anti desgaste y anti oxidación, libre de hidrocarburos. Son aceites vegetales oleaginosos refinados y esterificados mediante síntesis química (R. Arizpe, correo electrónico, 16 noviembre, 2018).	México	Para todo tipo de maquinaria industrial: -Grasas grado alimenticio. -Lubricantes para maquinaria. -Desmoldantes. -Aceites para estampado y corte. -Aceites hidráulicos.
Mobil	Elaboran lubricantes industriales con un gran legado de innovación y desempeño (Exxon Mobil, s.f).	Sedes en África, Asia, América Central y el Caribe, Europa, Norteamérica y Sudamérica.	Aceites hidráulicos Mobil EAL 224H.
Lubriplate Lubricants	Elaboran lubricantes para todo tipo de industria, bajo la certificación ISO-9001, se especializan en lubricantes para maquinaria de alimentos, por lo que son ambientalmente responsables (Lubriplate Lubricants Company, 2016).	Distribuidores internacionales	Aceites hidráulicos Bio-Based, ISO 32, 46, 68.
Fuchs lubricantes, S.A.U.	Grupo global de origen alemán que, dedicada al desarrollo, producción y venta de lubricantes (FUCHS, 2019).	Distribuidores internacionales	Lubricantes Biodegradable Planto.

Se ha encontrado que hay proyectos alrededor del mundo donde se han concientizado y han utilizado este producto como lubricante, a pesar de las limitaciones que restringen su participación en el mercado. En el siguiente apartado se mencionan algunas experiencias previas encontradas en literatura.

## 2.2 INVESTIGACIONES SIMILARES

Según un estudio realizado por Gawrilow (2005), los aceites vegetales se utilizaban como lubricantes antes de la revolución industrial. Ahora, hay varios mercados potenciales en los que se puede volver a retomar el uso de estos, especialmente en aplicaciones donde los equipos puedan tener fugas o pérdidas del lubricante. Algunos mercados potenciales que sugiere el autor son: metalurgia, lubricantes textiles, aceite lubricante para engranajes, aceites para maquinado de metales, lubricantes para sierras de cadena y lubricantes usados en maquinaria para la elaboración de alimentos.

En países como España, se han desarrollado proyectos en los que han sustituido los lubricantes de origen mineral por biolubricantes. A continuación, se detallan algunos ejemplos.

- **Proyecto BIOVESIN (Biolubricantes basados en aceites vegetales y sus derivados sintéticos)**

Proyecto desarrollado por el centro tecnológico Tekniker-IK4 y financiado por el gobierno español. El objetivo de este proyecto fue desarrollar lubricantes a base de aceites vegetales y aditivos biodegradables para aerogeneradores, maquinaria agrícola y motores de dos tiempos, además crearon lubricantes para la industria alimentaria con el fin de que si los aceites de los equipos entran en contacto con los alimentos no haya peligro para la salud (Instituto de la Grasa, s.f). En el proyecto contemplaron la utilización de aceites vegetales de girasol y ricino (Fedit, 2009).

- **Parque eólico experimental Sotavento**

Ubicado al suroeste de Europa, en Galicia, España. Desarrollaron un proyecto que pretendía lubricar todos los elementos de un aerogenerador con lubricantes de origen renovable, atóxico y biodegradable, con el fin de llevar el concepto de energías limpias desde la generación de la energía eólica, hasta el mantenimiento del equipo con biolubricantes (Sotavento Galicia, s.f). Trabajaron de la mano con el proyecto BIOVESIN.

- **Desarrollo de lubricantes ecológicos / biodegradables: una visión general**

Artículo desarrollado por Nagendramma y Kaul (2012), donde se menciona que los ésteres a base de aceites sintéticos y vegetales ofrecen una buena opción para formular lubricantes amigables con el medio ambiente, sin embargo hacen mención que para poder impulsar el uso de lubricantes biodegradables se debe iniciar por establecer incentivos gubernamentales y regulaciones obligatorias en los países, para presionar a las industrias al cambio, ya que los lubricantes a base de aceite mineral son baratos y abundantes, por lo que es un reto convencer a las industrias de las ventajas de la sustitución. Ambos autores señalan algunas ventajas de utilizar aceites vegetales como lubricantes: dependencia de fuentes extranjeras de petróleo importado, cumplimiento con estrictas regulaciones ambientales del futuro y que tienen menos toxicidad potencial y se degradan fácilmente en el medio ambiente.

### 2.3 IMPACTO AMBIENTAL

La conciencia ambiental al ser el principal motor para el desarrollo tecnológico, le da un valor agregado a las empresas que lo toman en cuenta y empresas como el ICE buscan la mejora continua y ser responsables ambientalmente, por lo que están dispuestos a apostar por nuevos productos amigables con el medio ambiente y disminuir su huella de carbono, motivo por el cual cuentan con certificaciones ISO, que son estándares internacionales para que las actividades empresariales se realicen de manera correcta, proporcionando especificaciones de clase mundial para productos, servicios y sistemas que garanticen la calidad, seguridad y eficiencia (ISO, s.f). Entre las certificaciones ISO, se encuentra la norma ISO 14001:2015, la cual es de mayor relevancia en este proyecto, ya que en su apartado 6.1.2 “Aspectos ambientales” indica que, la organización debe determinar los aspectos ambientales de sus

actividades, productos y servicios que puede controlar y de aquellos en los que puede influir, desde una perspectiva de ciclo de vida.

Los lubricantes derivados del petróleo tienen un impacto en el medio ambiente en las etapas de producción, uso y disposición (Bart et al., 2013) y en cuanto a los biolubricantes, hay varios aspectos que deben tomarse en cuenta para estimar de un mejor modo los beneficios e impactos sociales, ambientales y tecnológicos de su uso, por lo que en este trabajo se abarcó el análisis de la huella de carbono de ambos productos.

### **2.3.1 Análisis ciclo de vida y huella de carbono**

El análisis de ciclo de vida (ACV) es definido por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC por sus siglas en inglés), como un proceso que tiene por objetivo evaluar las cargas ambientales que están asociadas con procesos, productos o servicios, mediante la identificación y cuantificación de la energía, materiales consumidos y de los residuos generados al ambiente, tiene la finalidad de evaluar e implementar mejoras ambientales en las diferentes etapas del producto (SETAC, 2012). Según la ISO 14044:2006, realizar un ACV ayuda a la empresa a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental, a realizar planificaciones estratégicas, establecer prioridades y buscar productos amigables con el ambiente, lo que refleja una mejor imagen ambiental ya que Costa Rica contará con un Programa Nacional de Etiquetado Ambiental y Energético, por lo que al utilizar un producto que sea menos contaminante, podrá optar por una etiqueta tipo III o declaración ambiental o energética, que incorpora los valores para huellas ambientales y energéticas, respaldado en la Norma Internacional ISO 14025 e ISO 14044 (El País, 2019).

Las etapas del ciclo de producción de los lubricantes de base mineral son: extracción del petróleo crudo, refinación, producción del lubricante, uso y disposición final, mientras que las de los biolubricantes son: cosecha de los granos, extracción del aceite, producción del lubricante, uso y disposición final (Cuevas, 2010), en el Anexo 8.2 se encuentran esquemas detallados sobre todas las etapas del ciclo de vida de los biolubricantes y lubricantes minerales.

Hay estudios de ACV que han comparado los lubricantes a base de aceite mineral y los de base biológica, como el de Ekman y Börjesson (2011), en el cual exponen un análisis desde la producción hasta la disposición final y otros análisis como el de Cuevas (2010), donde se expone el ACV de ambos productos de toda la producción. En tales estudios, concluyeron que los fluidos hidráulicos basados en aceite vegetal de colza, tienen un impacto ambiental menor en el potencial de calentamiento global y en el potencial de creación de fotooxidación, pero contribuyen más en el potencial de acidificación debido a las emisiones asociadas al cultivo del producto y de eutrofización por la lixiviación de nutrientes en el cultivo, pero indiscutiblemente el fluido a base de aceite vegetal, fue más biodegradable. Todo producto o proceso va a tener impactos al ambiente, en este caso se deja en evidencia que los impactos negativos de los biolubricantes, se derivan principalmente de su producción y rendimiento agrícola (Bart et al., 2013).

Tal como se mencionó, una de las categorías de impacto del ACV son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que favorecen el calentamiento global, el cual se manifiesta por el aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre, su principal causa es el aumento de GEI emitidos a la atmósfera producto de las actividades humanas, las emisiones de GEI se pueden cuantificar mediante el indicador huella de carbono, expresada en CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq) (Espíndola & Valderrama, 2018).

Reducir la huella de carbono depende en gran parte de la manera en que se haga la disposición final de un producto, motivo por el cual existen varias leyes que velan por la adecuada gestión integral de los residuos.

### **2.3.2 Legislación**

La gestión integral de residuos, según la Ley para la Gestión Integral de Residuos (GIRS), se define como, “el conjunto articulado e interrelacionado de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta la disposición final”. Las regulaciones mencionadas a continuación tienen artículos ligados al tema en estudio:

- **Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales, N° 2700-MINAE (1998):**

En este reglamento se establecen las características de los residuos peligrosos para poder identificar y declarar si un residuo es peligroso o no y presenta un listado resumen de estas sustancias.

- **Ley para la Gestión Integral de Residuos, N° 8839 (2010):**

Artículo 4: en este artículo se establece el orden jerárquico que debe de seguirse para realizar una buena gestión integral de residuos: reducir, reutilizar, valorizar, tratar y disposición final.

Artículo 5: se mencionan los principios generales que fundamentan la adecuada gestión de residuos, tales como: la responsabilidad compartida entre el productor del producto, el importador, los distribuidores, los consumidores y los gestores de residuos y la responsabilidad extendida del productor durante todo el ciclo de vida del producto.

Capítulo IV Residuos Peligrosos: se mencionan las responsabilidades y obligaciones que tienen los generadores de residuos peligrosos.

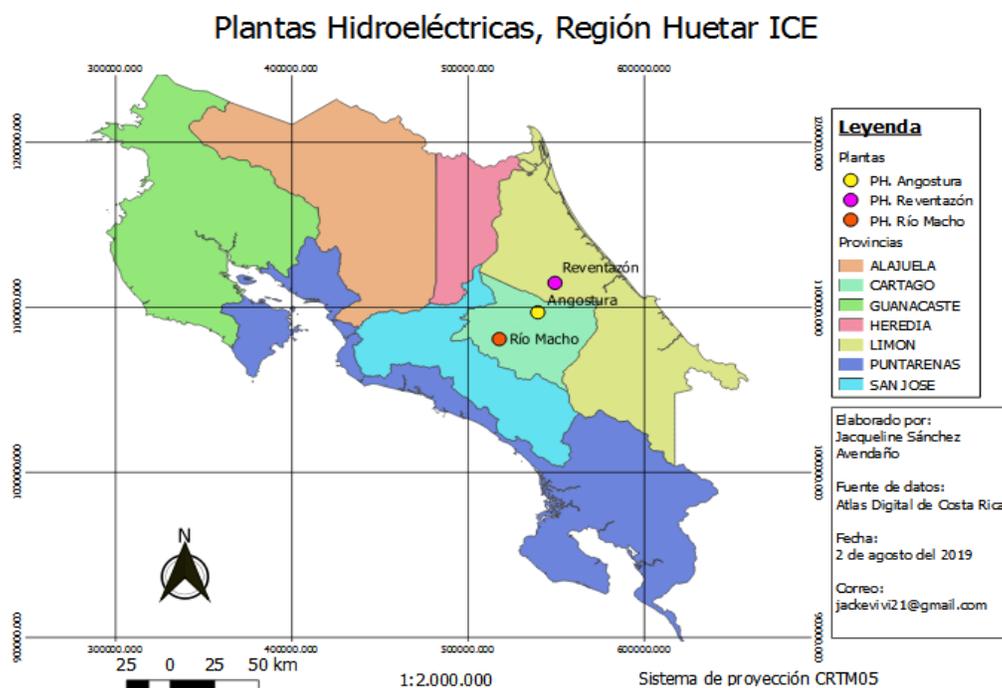
- **Manejo de desechos peligrosos industriales, Decreto Ejecutivo 27001-MINAE (1998):**

En este decreto se mencionan las etapas que se deben seguir para realizar un buen manejo de desechos peligrosos: generación, acumulación y almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final. También, una guía de cómo se deben de acumular y almacenar este tipo de residuos, cómo saber si dos o más desechos peligrosos son incompatibles entre ellos a la hora de almacenarlos o disponerlos y su clasificación según su estado físico y químico, además tiene un apartado denominado descontaminación, donde se indica lo que procede si se da un derrame de alguna sustancia tóxica. También se encuentra una lista de métodos de tratamientos permitidos para desechos peligrosos, importante a la hora de considerar qué hacer con los desechos producidos.

## 2.4 PLANTAS HIDROELÉCTRICAS

Este proyecto tiene como alcance las plantas hidroeléctricas Reventazón, Angostura y Río Macho de la región Huatar, según la división del Negocio de Generación del ICE (G. Calvo Domingo, comunicación personal, 2019). La planta Reventazón se encuentra ubicada en la

provincia de Limón y Angostura y Río Macho en la provincia de Cartago, Costa Rica. En la figura 2.3 se muestra la localización de las plantas hidroeléctricas abarcadas en este estudio.



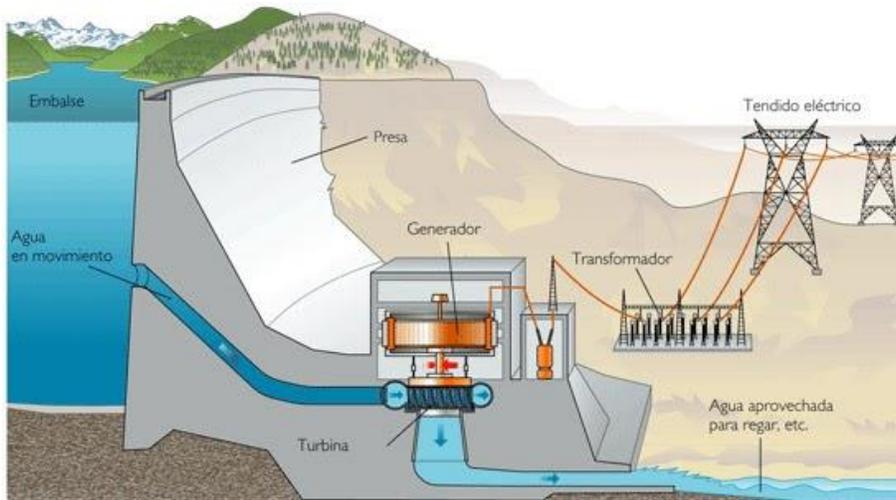
**Figura 2.3. Plantas hidroeléctricas, Región Huetar, ICE. Fuente propia.**

Las plantas hidroeléctricas producen energía ecológicamente segura y corresponden al esfuerzo moderno por la sostenibilidad porque operan con fuentes de energía renovables (Balzannikov & Vyshkin, 2011). Según Bagher, Vahid, Mohsen y Parvin (2015) la hidroelectricidad es la producción de energía eléctrica mediante el uso de la fuerza gravitacional del agua que cae o fluye y es la forma de energía renovable más utilizada. Según los autores, representa el 16% de la generación eléctrica mundial.

Hay diferentes tipos de plantas hidroeléctricas: plantas de almacenamiento, plantas de energía proveniente del río y plantas de energía proveniente del océano (Wagner & Mathur, 2011). Las plantas hidroeléctricas abarcadas obtienen la energía de ríos y según los autores precedentemente mencionados, se conocen como plantas de corriente continua y son alimentadas por un embalse (Instituto Costarricense de Electricidad, 2018).

Según Wagner et al. (2011) y Da Costa e Silva y Goncalves (2006), las partes de una planta hidroeléctrica son: el depósito superior para almacenar el agua, la presa, la central (circuito hidráulico y unidades generadoras) y la subestación (transformadores de potencia, equipos

eléctricos de alta tensión, etc.). En la figura 2.4 se detalla un diagrama con las partes de una planta hidroeléctrica.



**Figura 2.4. Partes de una planta hidroeléctrica. Tomado de (ENULA, 2018)**

Este proyecto se centró en la central, conocida como casa máquinas y en la presa (vertedor y tomas de agua) y de ahora en adelante para hacer referencia a la central, se usa el término casa máquinas. Este enfoque se debe al interés de la empresa, según lo conversado con el Ing. Gustavo Calvo Domingo.

### 3 METODOLOGÍA

El fin de este proyecto es evaluar la sustitución del uso de lubricantes de origen mineral por biolubricantes en el funcionamiento de la central y la presa (maquinaria de casa máquinas, vertedor y tomas de agua) de las plantas Angostura, Río Macho y Reventazón. Es importante mencionar que tal tarea se seccionó por plantas, ya que cada una utiliza lubricantes diferentes y el objeto es estandarizar el mismo en las tres plantas. Seguidamente, se especifican las secciones abarcadas para cada planta:

- **Angostura:** casa máquinas y presa.
- **Río Macho:** casa máquinas, en la presa implementaron biolubricantes.
- **Reventazón:** casa máquinas y presa de la Central de Compensación Ecológica (CCE), en la presa principal utilizan biolubricantes.

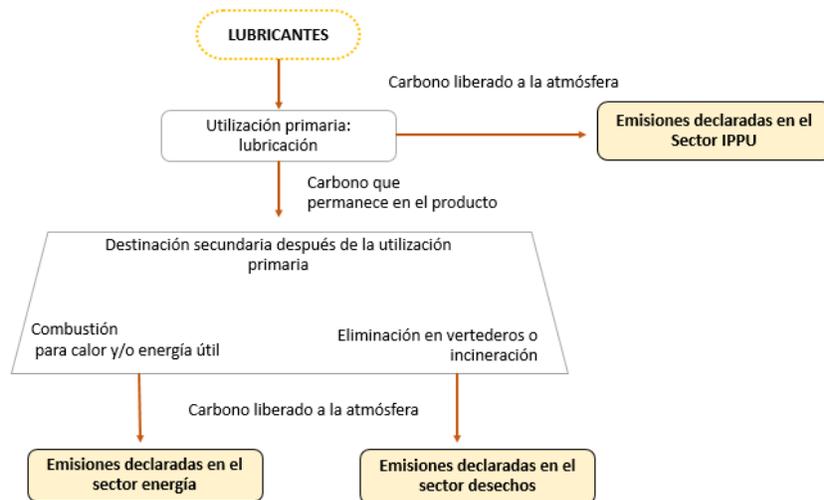
En Río Macho y Reventazón el uso de biolubricantes fue una decisión local, sin análisis previos. Con este proyecto se pretende reflejar los beneficios de esta decisión y estandarizar el producto a las demás plantas, ya que algunos de los biolubricantes son sintéticos y la idea es usar biolubricantes de base vegetal y también cambiar el lubricante de origen mineral que usan en casa máquinas de las plantas por biolubricantes, tomando en consideración aspectos ambientales y económicos que pueden favorecer o afectar este cambio.

Para el desarrollo del proyecto fue fundamental en primera instancia, conocer el tipo de aceite lubricante que utilizan en las plantas en cuestión, la cantidad que utiliza la maquinaria para funcionar, el precio y el periodo de compra de los aceites e información sobre cómo se realiza la disposición final de los aceites. Esta información se obtuvo mediante un cuestionario semiestructurado, el cual según Borda (2013) consiste en una serie de preguntas abiertas y fue enviado vía correo electrónico al Área Socioambiental de la región Huetar, ICE, el cual reenvió el documento a las plantas hidroeléctricas en estudio, el cuestionario se puede consultar en el Apéndice 7.1.

### 3.1 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Como el ACV incluye una evaluación a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, es decir, “desde la cuna hasta la tumba” (ISO 14040:2006, 2006), fue importante evaluar cuál de los dos productos, lubricante de origen mineral o biolubricante, tiene mayor impacto ambiental en cada etapa: producción, uso y disposición.

Para identificar si la producción, uso y disposición de los lubricantes de origen mineral tienen un efecto negativo en el ambiente, se revisó literatura en torno al tema para valorar la etapa de producción y se realizó un análisis de huella de carbono para la etapa de uso y disposición, ya que durante la lubricación se libera un porcentaje de carbono a la atmósfera y otro porcentaje permanece en el producto y se libera a la atmósfera en su disposición final (Olivier et al., 2006), tal como se detalla en la figura 3.1. Para el biolubricante, se realizó un análisis de huella de carbono de la etapa de producción, uso y disposición de acuerdo con la información recolectada en el proceso de revisión de literatura.



**Figura 3.1. Atribución por sector de las emisiones provenientes de lubricantes. Tomado y adaptado del Volumen 3: procesos industriales y uso de productos, capítulo 5, del IPCC (Olivier et al., 2006)**

Hay estudios que comparan el impacto en el ambiente de los productos cuestionados en todas sus etapas mediante indicadores de impacto ambiental, por lo que se procedió a analizarlos y a realizar un cuadro comparativo síntesis de la literatura consultada en la sección 4.1, con el fin de señalar y complementar la información sobre cuál de los dos productos tiene mayor impacto ambiental en general.

### **3.1.1 Huella de carbono**

Es importante que la empresa conozca cómo está su huella de carbono, con el fin de que implementen una estrategia de reducción y/o compensación de emisiones, por lo cual en este trabajo se contempló la cantidad de CO<sub>2</sub> eq que emiten los lubricantes de origen mineral y cuántas emitirían los biolubricantes, con el fin de comparar ambos resultados y conocer si al cambiar los lubricantes por biolubricantes se dará una reducción o no de emisiones. Para esto se necesitó conocer la cantidad de lubricante que usan en cada planta para que los equipos operen y se supuso que se necesitaría la misma cantidad de biolubricantes para sustituirlos. La cantidad necesaria de lubricantes tomó en cuenta lo necesario para poner a funcionar la maquinaria de casa máquinas de las tres plantas, la presa de Angostura y de la CCE de Reventazón. A continuación, se describen detalladamente los procedimientos e información utilizada, para el cálculo de la huella de carbono de ambos productos.

#### ***3.1.1.1 Lubricantes de origen mineral***

##### **Producción:**

A pesar de que no se realizó un análisis exhaustivo de la etapa de producción de los lubricantes, hay diversos estudios donde lo han evaluado y se tomaron de referencia para saber la cantidad de emisiones emitidas en la producción de los lubricantes de origen mineral, la cual contempla las etapas de: extracción del crudo, transporte a la planta refinadora y la refinación (Raimondi, Girotti, Blengini & Fino, 2012). Además, para saber la cantidad de emisiones que se emiten por la cantidad de lubricante necesitado para poner en funcionamiento las partes de interés, se realizó la conversión de unidades de volumen (l) a masa (kg), tomando en consideración una densidad de 0,87 kg/l para el lubricante.

##### **Uso:**

La cantidad de lubricante de origen mineral utilizado en cada planta para su funcionamiento, se encuentra descrita en el Apéndice 7.1. Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> eq por el uso del lubricante de origen mineral, se utilizaron dos métodos con el fin de verificar los datos obtenidos.

a) Método emisiones directas (ED)

Mediante la ecuación 1 se obtuvieron las emisiones directas de CO<sub>2</sub> eq (Chavarría et al., 2016). Para el cálculo se necesitó el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por el uso de lubricantes, que según el documento de Factores de emisión de gases de efecto invernadero, octava edición (2018) del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) es 0,5101 kg CO<sub>2</sub> /l lubricante, el cual considera el lubricante que se le introduce a la máquina, no el que se quema y el potencial del calentamiento global del CO<sub>2</sub>, el cual es 1.

$$\text{CO}_2 \text{ eq (t)} = (\text{Lubricante (l)} \times 0,5101 \text{ kg CO}_2 / \text{l lubricante} \times 1) / 1000 \text{kg / t} \quad (1)$$

b) Método del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)

Se consultó el volumen 3: procesos industriales y uso de productos, capítulo 5, del IPCC, el cual se centra en productos no energéticos de combustibles y solventes. Existen dos niveles metodológicos para determinar las emisiones generadas por el uso de lubricantes, nivel 1 y nivel 2. Se eligió el nivel 1 porque usa valores por defecto, dado a que el país no cuenta con factores de emisión propios para los aceites lubricantes, la ecuación 2 se utilizó para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> eq generadas por los lubricantes (Olivier et al., 2006).

$$\text{CO}_2 \text{ emisiones} = \text{LC} \times \text{CC}_{\text{lubricante}} \times \text{ODU}_{\text{lubricante}} \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

Donde:

CO<sub>2</sub> emisiones = emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los lubricantes (t)

LC = consumo total de lubricantes (TJ)

CC<sub>Lubricante</sub> = contenido de carbono de los lubricantes, por defecto (tonelada de C/TJ)

ODU<sub>Lubricante</sub> = factor (basado en la composición por defecto de aceites y grasas), fracción

44/12 = cociente de masa del CO<sub>2</sub>/C

En cuanto a los factores de emisión para la ecuación anterior correspondiente a los lubricantes, el factor de contenido de carbono (CC<sub>Lubricante</sub>) por defecto es 20 toneladas de C/TJ y la fracción de carbono del combustible fósil que se oxida durante su uso (ODU, por sus siglas en inglés) para los lubricantes es 20% (Olivier et al., 2006) y para obtener el

consumo de lubricantes (LC) en unidades de energía (TJ), se realizó una conversión de unidades, la cual se expresa en la ecuación 3, para resolver esta ecuación se necesitó conocer la densidad de cada lubricante en estudio y el valor calórico de los lubricantes, el cual es 40,2 TJ/Gg, obtenido del volumen 2 de energía, capítulo 1, del IPCC (Garg, Kazunari & Pulles, 2006).

$$LC (TJ) = Cantidad (l) \times Densidad \left( \frac{g}{ml} \right) \times 1e - 09 \frac{Gg}{1g} \times Valor\ calórico \left( \frac{TJ}{Gg} \right) \quad (3)$$

**Disposición:**

Es importante valorar la manera en que se disponen los lubricantes, porque según la manera en que se dispongan, varía la cantidad de emisiones emitidas y pueden provocar impactos al ambiente si se hace una mala disposición (Noria, 2016), por esta razón se contactó a Marian Rojas Acosta funcionaria de la Dirección General del Negocio Generación, para conocer el tratamiento que les dan una vez culminada su vida útil.

El lubricante que se elimina lo han extraído de las máquinas ya sea porque deben cambiarlo o porque cierta parte se ha contaminado y deben extraerlo. Cuando el lubricante está contaminado se utiliza en cogeneración, proceso en el cual los residuos se usan como combustible en procesos industriales (Angüis, 2018). En este proceso se da la combustión del material usado como combustible y se generan emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales se pueden estimar según lo descrito en el volumen 2: energía, capítulo 2 del IPCC, ya que abarca las emisiones de los combustibles quemados en industrias para la generación de electricidad y calor para el uso propio (Gómez et al., 2006). Se realizó la estimación de emisiones mediante el nivel 1, ya que trabaja con factores de emisión por defecto, en la ecuación 4 se presenta la fórmula desarrollada.

$$CO_2\text{ emisiones} = Consumo\ combustible (TJ) \times Factor\ de\ emisión \left( \frac{kg\ CO_2}{TJ} \right) \quad (4)$$

Donde:

CO<sub>2</sub> emisiones = emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los lubricantes (kg).

Consumo combustible = cantidad de combustible quemado (TJ), para obtener el consumo de combustible en unidades de energía (TJ), se ejecutó la ecuación 3.

Factor de emisión = para el caso del CO<sub>2</sub>, incluye el factor de oxidación del carbono, que se supone es 1 y el factor de emisión es 73 300 kg CO<sub>2</sub>/TJ.

### **Proyecciones:**

Para tener conciencia sobre las emisiones derivadas en un año de operación, se estimaron las emisiones emitidas que conlleva el consumo de lubricantes en un año de funcionamiento, ya que con el uso se va perdiendo lubricante. Se analizaron las etapas de producción, uso y disposición.

La cantidad de lubricante que rellenan cada año para completar la cantidad total que se necesita, es muy variable, por lo que se evaluaron proyecciones para dos escenarios:

- A. Condiciones normales de operación, se rellena una cantidad fija de lubricante.
- B. Fallo en alguno de los equipos.

#### **3.1.1.2 Biolubricantes**

En este análisis se contempló la producción: cultivo de la materia prima y producción del biolubricante, uso y disposición. Se concibió un análisis exhaustivo de la etapa de producción agrícola de la planta de la cual se extrae el aceite, porque tal como se mencionó en el apartado 2.3.1, hay estudios que aseveran que el impacto más grande de este producto se da en esta etapa. Para calcular la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten en las etapas descritas, fue fundamental conocer la base vegetal del biolubricante a utilizar en la sustitución, en este caso aceite obtenido de la semilla de Brassica napus, planta oleaginosa conocida como canola o colza, que en este proyecto se nombró como, colza. Para calcular la cantidad de biolubricante necesario se consideró que se necesitaría el mismo volumen que se utiliza de lubricante de origen mineral, ya que es la cantidad meta a sustituir por biolubricantes.

### **Producción:**

- a) Cultivo de la materia prima

Se procedió a investigar sobre las características del cultivo de colza, sus particularidades y requerimientos. Hay dos variedades de colza: invierno y verano (García & García, 2016), por lo que fue importante conocer la variedad del cultivo de colza del que está hecho el

biolubricante, para investigar las exigencias específicas de la especie. Se trabajó con colza de clima caliente, esta información se dedujo por el país de origen del cual viene el producto. También se utilizó la información disponible en la hoja de seguridad del biolubricante, Anexo 8.4.

Para obtener la cantidad de emisiones que se emiten de la etapa de cultivo de la planta de colza, se necesitó conocer:

- Cantidad de aceite (l) que utiliza cada planta en estudio, para su funcionamiento.
- Clima bajo el cual se cultiva la colza.
- Cantidad de aceite de colza (l) que se obtiene de una hectárea (ha) de producto.
- Cantidad de plantas y semillas (kg) de colza que se pueden sembrar en 1 ha.
- Kilogramos de granos de colza obtenidos en 1 ha.
- Hectáreas de plantación requeridas para obtener el punto a, para conocer la cantidad de semillas y plantas que se pueden sembrar y la cantidad de granos que se obtendrían en las ha requeridas.
- Operaciones manuales, mecánicas e insumos requeridos en el cultivo de colza.

Una vez recopilada esta información, se multiplicó todos los requerimientos e insumos por la cantidad de ha requeridas para obtener la cantidad de aceite (l) necesario para operar las máquinas de interés.

Antes de estimar la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, fue fundamental conocer el factor energético o cantidad de energía (MJ) que consume cada requerimiento del cultivo, esto porque, en el caso de las operaciones manuales realizadas en el campo, se necesita trasladar a los trabajadores hasta el sitio de cultivo y esto implica un consumo energético de combustible. Para las operaciones mecánicas, las cuales son acciones que requieren combustible y el consumo de insumos necesarios para preparar el suelo y mantener los cultivos, se consideraron factores energéticos que toman en cuenta todas las gestiones que implica su fabricación.

- Factores energéticos

Para sacar el factor energético de las operaciones manuales, se consideró que para trasladarse a la zona de cultivo se recorrían 40 km por día, con un consumo energético de un bus de 21,4 MJ/100 km por pasajero y se calculó resolviendo la ecuación 5 (Roldán, 2010).

$$\text{Factor energético (MJ)} = \text{Distancia (km)} \times \text{Consumo energético bus} \left( \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}} \right) \quad (5)$$

Para sacar el factor energético de las operaciones mecánicas realizadas en campo tanto para preparar como para cuidar el cultivo, se consideró un factor energético de 880,67 MJ/unidad, estimado por Roldán (2010), en una consultoría sobre la “Eficiencia Energética en la Producción de Biocombustibles” y se consultó la tesis “Producción de biodiésel de palma aceitera y jatropha en la Amazonia del Perú y el impacto para la sostenibilidad: Un Análisis Sostenible del Ciclo de Vida” (Bruinsma, 2009), para el factor energético del transporte interno de fertilizantes y semillas cultivadas, se consideró 2,80 MJ/unidad y el correspondiente a los insumos, se pueden consultar en el Apéndice 7.3. Con base en los factores energéticos se obtuvo el consumo total de energía (MJ), el cual se calculó multiplicando la cantidad de requerimientos e insumos necesitados para la cantidad de hectáreas requeridas por los factores energéticos.

- Emisiones de CO<sub>2</sub>

Una vez obtenidos los factores energéticos, se procedió a calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por el cultivo de colza. Para las operaciones manuales y mecánicas, el cálculo se basó en lo descrito en el volumen 2: energía, capítulo 3: combustión móvil, del IPCC (2006), el cual toma en consideración la cantidad y el tipo de combustible quemado en la actividad y su contenido de carbono, se escogió el nivel 1 para el cálculo (ecuación 6), porque según lo descrito en dicho documento, es el adecuado para estimar emisiones de CO<sub>2</sub> eq. La cantidad de combustible en unidad de energía, se obtuvo al multiplicar los requerimientos e insumos de la cantidad de hectáreas requeridas por el factor energético.

$$\text{Emisión CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Combustible a (TJ)} \times \text{EF a} \left( \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}} \right) \quad (6)$$

Donde:

Emisión = emisiones de CO<sub>2</sub> (kg)

Combustible<sub>a</sub> = combustible quemado, equivalente al vendido (TJ)

EF<sub>a</sub> = factor de emisión (kg CO<sub>2</sub>/TJ). En este caso, 74 100 kg CO<sub>2</sub>/TJ

a = tipo de combustible. En este caso, diésel

Los factores de emisión de CO<sub>2</sub> de los insumos por unidad (kg/MJ), se basaron en el documento del cual se tomaron los factores energéticos de estos mismos productos y la emisión de CO<sub>2</sub> total (kg) se calculó mediante el mismo procedimiento de las operaciones mecánicas y manuales descrito en el volumen 2: energía, capítulo 3: combustión móvil, del IPCC (2006), con la modificación de los factores de emisión (EF) tal como se refleja en la ecuación 7. La cantidad de combustible en unidad de energía, se obtuvo de la misma manera realizada en las operaciones manuales y mecánicas. En el cuadro 4.8 se pueden consultar los factores de emisión requeridos en este proyecto.

$$\text{Emisión CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Combustible (MJ)} \times \text{EF}_a \left( \frac{\text{kg CO}_2}{\text{MJ}} \right) \quad (7)$$

Donde:

Emisión = emisiones de CO<sub>2</sub> (kg)

Combustible = combustible quemado, equivalente al vendido (MJ)

EF<sub>a</sub> = factor de emisión de cada insumo (kg CO<sub>2</sub>/MJ)

#### b) Producción del biolubricante

La producción del biolubricante, consta de tres etapas: extracción del aceite, transporte del aceite crudo a la planta de biodiésel y producción del biolubricante, en cada una de las etapas se liberan emisiones de CO<sub>2</sub>. Para estimar la cantidad de emisiones de cada etapa se tomó de referencia el estudio, Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte (Lechón et al., 2006), este estudio indica la cantidad de energía consumida (CE) en cada etapa (MJ/kg aceite), por lo que para obtener la cantidad de CO<sub>2</sub> eq, se desarrolló la ecuación 8, la cual considera que por cada MJ de energía se emiten 0,385 kg de CO<sub>2</sub> eq (DGCACC, 2010).

$$\text{Emisión CO}_2 \text{ (kg)} = \text{CE} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg aceite}} \right) \times \left( \frac{0,278 \text{ KWh}}{1 \text{ MJ}} \right) \times 0,385 \left( \frac{\text{kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{KWh}} \right) \quad (8)$$

Para finalizar la etapa de producción, se estimaron las emisiones totales del proceso, sumando las emisiones del cultivo, extracción del aceite, transporte del aceite crudo a la planta de biodiésel y la producción del biolubricante. La cantidad de emisiones que se emitirían por la cantidad de lubricante necesitado para poner en funcionamiento las partes de interés del proyecto, se calculó utilizando una densidad de 0,91 kg/l para el biolubricante de colza.

#### **Uso:**

Para estimar las emisiones por el uso de biolubricantes, se supuso que la cantidad de biolubricante, sería el mismo volumen que utilizan de lubricante de origen mineral. Se consultó el IPCC y se concluyó que se puede estimar mediante el nivel 1, del volumen 3: procesos industriales y uso de productos, capítulo 5, ya que considera cualquier tipo de lubricante sin considerar su naturaleza, por lo que emplea valores por defecto.

Con el fin de hacer una diferenciación entre tipos de lubricantes fue necesario buscar factores para biocombustibles, los valores necesarios para desarrollar la fórmula del nivel 1, la cual se presenta en la ecuación 9, se tomaron del volumen 2: energía, capítulo 1, donde se presentan factores de emisión para biocombustibles, entre estos el biodiésel, el cual se utilizó como referencia porque no hay factores específicos para biolubricantes y estos dos productos son similares porque están conformados por ésteres de aceite vegetal y además, la categoría biodiésel puntualiza que incluye el bioaceite extraído de semillas oleaginosas (Garg, Kazunari & Pulles, 2006). No se recomienda sacarlo con el factor de emisión de los lubricantes convencionales porque al ser de base biológica su composición no es la misma. Es conveniente aclarar que este cálculo fue una estimación, porque no hay estudios que den certeza que durante el uso de biolubricantes se liberen emisiones de CO<sub>2</sub>.

$$\text{CO}_2 \text{ emisiones} = \text{LC} \times \text{CC lubricante} \times \text{ODU lubricante} \times 44/12 \quad (9)$$

Donde:

CO<sub>2</sub> emisiones = emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los lubricantes (t)

LC = consumo total de lubricantes (TJ)

CC Lubricante = contenido de carbono de los lubricantes, por defecto (tonelada de C/TJ)

ODU Lubricante = factor (basado en la composición por defecto de aceites y grasas), fracción

44/12 = cociente de masa del CO<sub>2</sub>/C

Los factores de emisión para la ecuación anterior para biocombustibles son: CC Lubricante por defecto es 19,3 toneladas de C/TJ para biodiésel, la fracción ODU para los aceites es 20% (Olivier et al., 2006). Para obtener el consumo de lubricantes (LC) en unidades de energía (TJ), se realizó una conversión la cual se expresa en la ecuación 10, en donde se considera una densidad de 0,91344 kg/l correspondiente al aceite de colza y un valor calórico, entre 7 984-8 009 kcal/kg (Rousset et al., 2008), sacando un promedio y convirtiéndolo en las unidades requeridas, se tiene que el valor calórico es 33,42 TJ/Gg.

$$LC (TJ) = Cantidad (l) \times Densidad \left( \frac{g}{ml} \right) \times 1e - 09 \frac{Gg}{1g} \times Valor\ calórico \left( \frac{TJ}{Gg} \right) \quad (10)$$

### **Disposición:**

Para valorar si la disposición de los biolubricantes tiene un impacto en el ambiente, se revisó literatura en torno al tema, ya que no deberían categorizarse de la misma manera que los lubricantes minerales (Noria, 2016), por lo que se buscó bibliografía para indagar cómo disponer este producto una vez culminada su vida útil y se investigó, si en Costa Rica hay un ente encargado para tratar este producto o si se gestionan igual que los lubricantes convencionales, determinándose que la disposición se realiza de la misma forma que en el caso de los lubricantes convencionales.

### **Proyecciones:**

Al igual que para los lubricantes, las emisiones derivadas de un año de operación con biolubricantes, se estimaron tomando en cuenta las etapas de producción, uso y disposición, considerando dos escenarios:

- A. Condiciones normales de operación, se rellena una cantidad fija de lubricante.
- B. Fallo en alguno de los equipos.

#### **3.1.1.3 *Lubricantes vs biolubricantes***

En este apartado se compararon ambos productos, con el fin de determinar cuál tiene más impacto a lo largo de su ciclo de vida. También, se valoró cuántas emisiones se está ahorrando Río Macho y Reventazón al usar biolubricantes en ciertas partes de las plantas y se supusieron

escenarios para valorar cuántas emisiones se emitirían si solo usaran lubricantes convencionales o biolubricantes.

### 3.2 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica para conocer las características típicas que deben cumplir los lubricantes y se compararon estas propiedades fisicoquímicas con las de los biolubricantes existentes en el mercado. En el apartado 4.2 se realizó un cuadro comparativo de las propiedades generales de un buen lubricante y los valores correspondientes para los biolubricantes.

Se solicitó a los técnicos de las plantas, el nombre de los aceites que utilizan en las plantas hidroeléctricas en estudio, una vez facilitada esta información se procedió a buscar la ficha técnica de cada producto para contar con las características fisicoquímicas específicas de cada uno, esta información se encuentra en el Anexo 8.1 con el fin de determinar si los biolubricantes seleccionados presentan características afines.

#### 3.2.1 Requerimientos específicos para lubricantes ISO VG 46

Los lubricantes que se utilizan en las plantas, tienen la característica ISO VG 46, tal como se expuso en el apartado 2.1.1, por lo que se exploraron los requerimientos que deben de tener estos aceites lubricantes, ya que es importante para determinar si los biolubricantes presentan características similares. En el cuadro 3.1 se observan las características correspondientes a lubricantes ISO VG 46.

**Cuadro 3.1. Requisitos para lubricantes ISO VG 46.**

Requisito del lubricante	Viscosidad a 40 °C (cst)	Viscosidad a 100 °C (cst)	Índice Viscosidad	Punto Fluidez	Punto Inflamación	Estabilidad Oxidativa (min)
ISO VG 46	>41,4	>4,1	>90	-6	220	-

Traducido y adaptado de (McNutt & He, 2016)

### 3.3 ANÁLISIS FINANCIERO

Para determinar si la sustitución de lubricantes minerales por biolubricantes tiene un impacto financiero en la empresa, se realizó la selección y cotización del biolubricante a utilizar y posterior, se realizó el análisis financiero.

#### 3.3.1 Selección del biolubricante

Se realizó una búsqueda digital sobre biolubricantes de venta en el mercado, tomando en cuenta los requisitos mencionados en el cuadro 3.1, presentado anteriormente, y las fichas técnicas de los lubricantes que utilizan actualmente. En la sección 2.1.3 se encuentra un cuadro resumen de las empresas consultadas que venden biolubricantes y que dieron respuesta a la información solicitada.

Para este análisis fue fundamental conocer las condiciones de operación de las partes de interés, porque en la práctica el lubricante ideal para una determinada aplicación, se elige por las condiciones de operación requeridas y el objetivo que tiene a cumplir (Salazar et al., 2014). Adicionalmente, se programaron visitas de campo a las plantas en estudio, para conocer las condiciones y se consultó a los técnicos encargados del mantenimiento los requisitos que con base en su experiencia consideran que no pueden faltar en un lubricante. Además, se coordinó una reunión con Roberto Garro Retana, asesor en lubricación industrial de la empresa Lithio Lubs Costa Rica, quien tiene experiencia en el ámbito de los biolubricantes, para conocer más sobre los productos.

Cabe resaltar que el ICE no tiene ninguna restricción o condición específica en cuanto a la escogencia de productos a utilizar. En el caso de los lubricantes, los técnicos de mantenimiento son los que deciden cuáles incorporar a las operaciones (P. Gómez Arango, conversación personal, 2019), por lo que se mantuvo conversación constante con los técnicos: Pablo Gómez Arango: Angostura, Danilo Solano Castillo: Río Macho y Jeffrey Chaves Coto: Reventazón.

Concluidas las tareas anteriores, se pidieron las cotizaciones y una vez obtenida respuesta, se les informó a los técnicos los productos con cotización, para confirmar que podrían funcionar idóneamente en las plantas hidroeléctricas.

### **3.3.2 Análisis beneficio/costo**

Una vez seleccionado el biolubricante, se procedió a realizar un análisis financiero beneficio/costo por planta, para determinar el impacto económico resultante de una posible sustitución de los lubricantes. Se valoró la situación actual (sin proyecto), al seguir utilizando lubricantes minerales y la situación que se esperaría tener al implementar el uso de biolubricantes (con proyecto).

El proyecto propuesto tiene la peculiaridad de que no necesariamente va a reflejar un ahorro en los costos de la empresa, ya que el biolubricante tiene un precio más elevado en comparación a los lubricantes convencionales, pero sí incrementa los beneficios ambientales. Tales beneficios son importantes porque la protección del ambiente es la base del desarrollo social y económico de un país, ya que brinda un enorme flujo de bienes y servicios que dependen del estado de los recursos naturales y del medio ambiente (Osorio & Correa, 2004) y si no se cuidan adecuadamente, el bienestar de la sociedad disminuye.

Los servicios ambientales carecen de un mercado por lo que se desconoce su precio. Por lo tanto, es necesario usar un método de valoración económica para asignarles un precio de mercado. En este proyecto se usó el método de valoración contingente, que busca determinar el valor económico que las personas otorgan a los cambios en el bienestar derivados de una modificación en la oferta de un bien ambiental, mediante una encuesta (Linares & Romero, s.f). Para esto se formuló un cuestionario en el que se le preguntó a los ingenieros mecánicos y directores de cada planta, al ingeniero de Planificación Operación y Mantenimiento y al director de la región Huetar, la máxima disposición a pagar (DAP) por un lubricante biodegradable y qué tan importante consideran ellos, que es para el ICE reflejar una imagen ambientalmente sostenible, en el Apéndice 7.6 se puede consultar el cuestionario.

Otro de los beneficios esperados es la reducción de la huella de carbono, por lo que para valorar en términos monetarios el ahorro por las toneladas de CO<sub>2</sub> mitigadas se consultó el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), el cual establece que el costo de compensar una tonelada de CO<sub>2</sub> eq es de \$7,5/t CO<sub>2</sub> eq (FONAFIFO, 2018).

También se consideraron los beneficios asociados a la publicidad que podría obtener el ICE al implementar un proyecto de esta naturaleza, que sería sinónimo de una imagen verde y sostenible al producir energía limpia con productos limpios. Para lo cual se estimó el tiempo que dedicarán los medios de comunicación a publicar la noticia de que el ICE está produciendo energía hidroeléctrica a partir de productos amigables con el ambiente, se consideró que el anuncio será transmitido por canal 7 durante 30 segundos, antes y durante las noticias de las 7:00 p.m., según la encargada de comunicación del Negocio de Generación, Silvia Barrantes Paniagua, esto tiene un valor de  $\phi$ 1 200 000 (Teletica, 2018). El costo del anuncio se consideró equivalente al beneficio que tendrá la empresa.

Se realizó el análisis para dos escenarios, el primero es un escenario ideal en el que se rellena una cantidad pequeña de lubricante por año en condiciones de operación normal y el segundo escenario es en caso de que falle un equipo, tal como se encuentra descrito en la sección “Proyección” del apartado 3.1.1 y se estimó que cada 5 años se debe hacer un cambio total de lubricante en toda la planta.

Se sacaron los indicadores económicos Valor Actual Neto (VAN) y la relación Beneficio/Costo (B/C) y se compararon para la situación con y sin proyecto, para concluir si se recomienda hacer el cambio desde la perspectiva financiera. Se proyectó el proyecto a 5 años y se trabajó con una inflación del 3% (BCCR, 2018) y una tasa de descuento del 5%.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 IMPACTOS AMBIENTALES**

El cuadro 4.1 expone varias categorías de evaluación de impacto ambiental, síntesis de literatura consultada y el impacto que tiene el aceite de origen mineral y los biolubricantes frente a cada categoría. Con el fin de comparar cuál de los dos productos tiene más repercusiones en el ambiente a lo largo de su ciclo de vida, se ha realizado la comparación utilizando la palabra “menor o mayor” referenciando al nivel de impacto, en el ambiente. Esta información ayuda a tener una idea general y complementar el análisis posterior de huella de carbono realizado en este apartado. La unidad funcional analizada es 1 kg de lubricante.

**Cuadro 4.1. Categorías evaluadas en el ACV de lubricantes y biolubricantes.**

<b>Categoría de impacto ambiental</b>	<b>Aceite vegetal (colza)</b>	<b>Aceite mineral</b>
Potencial calentamiento global	Menor	Mayor
Potencial acidificación	Mayor	Menor
Potencial eutrofización	Mayor	Menor
Potencial de creación de fotooxidantes	Menor	Mayor
Potencial de agotamiento del ozono	Menor	Mayor
Impacto en el uso de la tierra	Mayor	Menor
Consumo de energía primaria	Menor	Mayor

Adaptado de varios estudios (Bart et al., 2013; Cuevas, 2010; Ekman & Börjesson, 2011)

Tal como se observa en el cuadro, los aceites vegetales tienen un impacto mayor en el potencial de acidificación (AP) y en el potencial de eutrofización (EP). El AP se deriva de las emisiones a nivel de campo por el cultivo de la planta de la cual se extrae el aceite vegetal y el EP es producto de la lixiviación de nutrientes derivados de la fase agrícola (Bart et al., 2013). Mientras, el AP es resultante de la interacción entre el óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) con otros elementos presentes en la atmósfera, como el radical hidroxilo (INCYT, 2017); la eutrofización, se refiere más bien al deterioro de los ecosistemas acuáticos provocado por un enriquecimiento excesivo de nutrientes (Reyes, 2015), lo que conlleva a un mayor impacto en el uso de la tierra.

La producción de aceites de origen mineral tiene un mayor impacto en general al comparar ambos productos porque según los estudios revisados, el potencial de calentamiento global (PWG), el potencial de creación de fotooxidantes (POCP), el potencial de agotamiento del ozono (PCG) y el consumo de energía primaria son mayores para este producto, debido al consumo de energía asociado a los procesos de extracción del petróleo y producción del lubricante.

Es importante evaluar y comparar ambos productos, pues muchas veces se asume que los aceites vegetales son menos impactantes por su naturaleza biológica, sin embargo, con base en lo descrito anteriormente se refleja que, aunque sean biológicos también tienen un impacto en el ambiente, aunque sea menor. Dicho lo anterior, es importante evaluar detalladamente

cada etapa del ciclo de vida de ambos productos, por lo que se realizó un análisis de huella de carbono en el siguiente apartado.

#### 4.1.1 Huella de carbono

Antes de proceder a calcular la huella de carbono, es importante conocer el volumen de lubricante que utilizan en cada planta para poner en funcionamiento los equipos. Es conveniente aclarar, además, que por motivo de que en Río Macho y Reventazón utilizan biolubricantes en algunas de las partes de la planta (información especificada en la metodología del trabajo), se calculó el ACV conforme a la cantidad de lubricante de origen mineral que usan actualmente y que corresponde a la cantidad meta a sustituir, en el cuadro 4.2, se expresa la cantidad total de lubricante que requiere cada planta y la cantidad que corresponde a lubricante mineral y biolubricante.

**Cuadro 4.2. Cantidad de lubricante requerido para el funcionamiento de las partes en estudio y desglose según la naturaleza del lubricante.**

<b>Planta hidroeléctrica</b>	<b>Lubricante requerido (±1) l</b>	<b>Lubricante mineral (±1) l</b>	<b>Biolubricante (±1) l</b>
Angostura	19 400	19 400	-
Río Macho	23 224	17 888	5 336
Reventazón	36 638	15 006	21 632
<b>Total</b>	<b>79 262</b>	<b>52 294</b>	<b>26 968</b>

En este apartado se reporta la cantidad de emisiones emitidas en cada etapa de la producción, uso y disposición de los lubricantes y biolubricantes. Además, se calcularon las emisiones para 1 litro de lubricante, información base para futuros estudios.

##### 4.1.1.1 *Lubricante de origen mineral*

###### **Producción:**

Según la literatura consulta por cada kg de lubricante de origen mineral, se liberan 0,985 kg CO<sub>2</sub> eq a la atmósfera, contemplando las etapas de: extracción del crudo, transporte de la materia prima a la refinería y refinación, el estudio contemplado toma la información de la base de datos Ecoinvent, en donde se recopila información sobre inventarios de análisis de ciclo de vida a nivel mundial (Raimondi, Girotti, Blengini & Fino, 2012). Al multiplicar esa

cantidad por los kg de lubricante de origen mineral necesitados para poner a funcionar la maquinaria en cuestión, se obtuvo la cantidad de emisiones asociadas a cada planta, tal como se presenta en el cuadro 4.3.

**Cuadro 4.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la producción de lubricantes de origen mineral.**

<b>Planta</b>	<b>Lubricante mineral (±1) l</b>	<b>Lubricante mineral (kg)</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Base	1	0,87	0,00086
Angostura	19 400	16 878	16,62
Río Macho	17 888	15 562	15,33
Reventazón	15 006	13 055	12,86
<b>Total plantas</b>	<b>52 294</b>	<b>45 496</b>	<b>44,81</b>

Tal y como se observa en este cuadro, la planta que más emisiones tiene asociadas en esta etapa es Angostura, seguido de Río Macho y, por último, Reventazón, debido a la cantidad de lubricante de origen mineral que utilizan. En total, las tres plantas usan actualmente 45 496 kg de lubricante de origen mineral para operar y para poder obtener esa cantidad de lubricante, de la producción se liberan 44,81 t CO<sub>2</sub> eq.

Aparte de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por kg de lubricante, las etapas involucradas en el proceso de producción promueven otros impactos ambientales, la extracción del crudo además de las emisiones de CO<sub>2</sub>, libera metano, óxidos de nitrógeno, partículas, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, los cuales contribuyen al calentamiento global y son denominadas “emisiones fugitivas” (Nieto Gallego, 2011), asimismo, cuando se extrae petróleo, el agua atrapada dentro de las formaciones geológicas brota a la superficie y puede llevar consigo sólidos disueltos, metales pesados, hidrocarburos o materiales radioactivos que la convierten en agua no apta para el consumo humano y difícil de desechar de manera segura. Posterior al proceso de extracción, el petróleo crudo es transportado a la planta refinadora y dependiendo de dónde esté ubicada la planta, puede viajar largas distancias, por lo que el transporte de combustible va a generar su propia contaminación y a aumentar el riesgo de que se presenten derrames de petróleo en océanos o carreteras, siendo una amenaza para el medio ambiente (Union of Concerned Scientists, s.f). Adicionalmente, cuando el petróleo llega a la planta refinadora, los procesos de destilación

y refinación utilizados para obtener el aceite mineral base del lubricante, también utilizan energía y procesos de combustión, en donde se desprenden gran cantidad de emisiones.

Además del aceite base, los lubricantes contienen aditivos que ayudan a mejorar su eficiencia y que son los responsables del 35% de las emisiones de efecto invernadero emitidas por los lubricantes (Raimondi, Girotti, Blengini & Fino, 2012). Por esta razón, el estudio contemplado en este análisis toma en consideración en el ACV los siguientes aditivos: detergentes, dispersantes, modificadores de viscosidad, antioxidantes y antidesgaste. Es conveniente indicar que, los autores mencionados exponen que entre más sofisticado el lubricante, mayor impacto ambiental va a provocar debido a que su producción es más compleja, lo que conlleva a un mayor consumo de energía y mayor requerimiento de aditivos.

Como se informó en un principio, el uso de los lubricantes también tiene repercusiones en el ambiente, debido a las emisiones que se producen durante su uso, por lo que se realizó un análisis sobre esta etapa.

#### Uso:

Tal como se mencionó en el apartado 3.1.1, el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq por el uso de lubricantes de origen mineral, se llevó a cabo por medio de dos métodos diferentes, en el cuadro 4.4 se muestran los resultados de las emisiones resultantes debido a la cantidad necesaria de lubricante de origen mineral utilizado para poner en funcionamiento las partes de las plantas hidroeléctricas en estudio.

**Cuadro 4.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de lubricante de origen mineral necesario para que los equipos operen, por medio del método 1 y 2.**

Planta Hidroeléctrica	Lubricante (±1) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)	
		Método 1 ED	Método 2 IPCC
Base	1	0,001	0,001
Angostura	19 400	9,90	9,93
Río Macho	17 888	9,12	9,12
Reventazón	15 006	7,65	7,68
<b>Total plantas</b>	<b>52 294</b>	<b>26,68</b>	<b>26,74</b>

Existe una variación en el procedimiento de los métodos, lo que culminó en que los resultados no fueran totalmente idénticos, como se observa en el cuadro 4.4. A pesar de que no hay diferencia mayor entre los resultados obtenidos y cualquiera de los dos es aprobado, se discutió con base en los resultados del método ED, por ser el método que utiliza el ICE para sacar las emisiones de GEI (M. Zamora Salazar, conversación personal, 2019).

La planta que emite más emisiones es Angostura con 9,90 t de CO<sub>2</sub> eq, seguida de Río Macho con 9,12 t de CO<sub>2</sub> eq y, en tercer lugar, Reventazón con 7,65 t de CO<sub>2</sub> eq, la cantidad de emisiones está relacionada directamente con la cantidad de lubricante utilizado. De las tres plantas en estudio, Angostura es la única que no utiliza biolubricantes en las tomas de agua, razón por la que el consumo de lubricantes convencionales es mayor. Río Macho por su parte, utiliza biolubricantes en las tomas de agua y en el embalse, debido a que están dentro del Parque Nacional Tapantí, por lo que de 23 224 l que requiere para operar toda la planta 17 888 l corresponden a lubricantes convencionales y el resto son biolubricantes, sin embargo, como algunos son sintéticos, la idea es usar biolubricantes de base vegetal para dejar de utilizar lubricantes derivados del petróleo. En el caso de Reventazón, para operar toda la planta se requieren 36 638 l de lubricante, de los cuales 15 006 l corresponden a lubricantes convencionales, al ser la planta que usa menos cantidad de lubricantes convencionales, es la que menos emisiones de CO<sub>2</sub> emite, sin embargo, es importante resaltar que en ninguna de las partes de la CCE los utilizan y el agua que sale de esta mini central va directo al río Reventazón, por lo que es una de las partes que amerita urgente un cambio de lubricantes por biolubricantes.

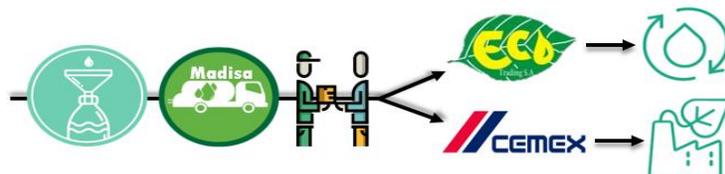
### **Disposición:**

Una vez culminado el periodo de vida del lubricante, el ICE lo gestiona a través de MADISA (Manejo de Desechos Industriales S.A.), empresa de reciclaje que ofrece un pre tratamiento a los residuos, con la que tienen un convenio institucional. Si el lubricante va contaminado con agua, el ICE debe pagar \$0,10/kg por el tratamiento que se le da y si no está contaminado, el ICE recibe una ganancia valorizada en \$0,04/kg (M. Rojas Acosta, correo electrónico, 2019).

MADISA recoge el lubricante usado y se encarga de remitir el que no está contaminado con agua a ECO TRADING para regeneración, que consiste en limpiar el aceite para producir

uno nuevo. En este tipo de procesos se dice que la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes del re refinado es nula, debido a la compensación de emisiones al no extraer nueva materia prima y se requiere menos consumo energético (CCOO, s.f) y el aceite que está contaminado, se envía a la empresa CEMEX, quienes lo utilizan para coprocesamiento (M. Rojas Acosta, correo electrónico, 2019), proceso que consiste en usar los residuos como combustible o materia prima alternativa para un proceso industrial específico, en muchos casos, fabricación de cemento, con lo que se logra disminuir el uso de combustibles derivados del petróleo, dándole una valorización al residuo y mitigando la huella de carbono de la industria cementera (Angüis, 2018). ECO TRADING, es una empresa recicladora especializada en la regeneración y re refinado de aceites de motor y aceites industriales (ECO TRADING, s.f), mientras que CEMEX es una compañía que produce materiales para la industria de la construcción (CEMEX, s.f).

En la figura 4.1 se observa un diagrama sobre el proceso de disposición de los aceites lubricantes, en primera instancia el lubricante a desechar es envasado por personal del ICE para que quede listo para entregárselo a MADISA (pre tratamiento), quienes lo transportan y lo entregan a ECO TRADING o CEMEX (tratamiento final), tal como se explicó anteriormente.



**Figura 4.1. Diagrama sobre la disposición de los lubricantes de origen mineral, ICE.**

En el cuadro 4.5 se encuentra una división por plantas sobre la cantidad aproximada de lubricante que se le entrega a MADISA por año, procedente de las unidades generadoras y la central eléctrica, así como su estado. Estas cantidades corresponden a los volúmenes que extraen de las maquinarias cuando les dan mantenimientos. Estos volúmenes pueden variar, ya que puede darse algún incidente en el que tengan que desechar mucha cantidad de lubricante, además según la información investigada, la cantidad que recoge MADISA corresponde a cantidad acumulada.

Mediante la ecuación 4, mostrada en el apartado 3.1.1.1, se estimaron las emisiones resultantes de la cogeneración, suponiendo que el lubricante desechado está contaminado y que corresponde a la cantidad de lubricante que tuvieron que rellenar.

**Cuadro 4.5. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cogeneración de lubricantes contaminados.**

<b>Planta Hidroeléctrica</b>	<b>Lubricante contaminado (±1) l</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Base	1	0,0026
Angostura	1 248	3,19
Río Macho	350	0,90
Reventazón	0	0
<b>Total plantas</b>	<b>1 598</b>	<b>4,09</b>

En condiciones normales de operación la planta que más desecha lubricante es Angostura, ya que es la que más lubricante rellena por año en condiciones normales de operación, seguido de Río Macho y después, Reventazón con emisiones nulas, debido a que en condiciones normales no realizan rellenos. Sin embargo, como la cantidad despachada es muy variable, se estimó la cantidad de emisiones derivadas de la cogeneración de 1 l de lubricante, valor base para estimar las emisiones correspondientes a la cantidad de litros dispuestos, según la ocasión.

Si el lubricante tiene en su contenido menos de un 15% de agua, se considera que no está contaminado y como se usa para regeneración no se le asocian emisiones, por lo que es importante para la empresa darles un buen mantenimiento a los lubricantes, con el fin de tratar que se contaminen lo menos posible y así reducir las emisiones a la hora de disponerlos.

#### **Proyecciones:**

Los lubricantes con el uso van perdiendo sus propiedades, motivo por el cual les realizan análisis fisicoquímicos cada cuatro meses y se cambian o rellenan según la condición que presenten para mejorar la calidad. Pueden sufrir pérdidas por evaporación, limpieza, filtraciones o por fallo de algún equipo (P. Gómez Arango, vía correo, 2019), lo cual se traduce en un mayor empleo de lubricante al año. Los escenarios para cada planta se presentan en el cuadro 4.6, el escenario A contempla el volumen de lubricante que se rellena en condiciones normales de operación, es decir, el funcionamiento de las máquinas es idóneo, en cambio en el escenario B, se asumió que puede fallar algún equipo, aumentando la

cantidad de lubricante que se debe rellenar, dichas cantidades se basaron en experiencias que han sucedido en años anteriores. Es importante recalcar que tales cantidades pueden variar.

**Cuadro 4.6. Cantidad de lubricante mineral que rellenan en cada planta por año, según los escenarios contemplados.**

Planta Hidroeléctrica	Escenarios	
	A) Condiciones normales de operación ( $\pm 1$ ) l	B) Falla en un equipo ( $\pm 1$ ) l
Angostura	1 248	Falla cojinete: 3 465
Río Macho	350	Falla gobernador: 2 441
Reventazón	0	Falla cojinete: 2 950

Una vez establecidos los escenarios, en el cuadro 4.7 se presentan las emisiones asociadas a cada uno de ellos y corresponden a la cantidad de lubricante de origen mineral que está en funcionamiento más el relleno, considerando las etapas de producción, uso y disposición. En el Apéndice 7.5 se encuentra un desglose más específico por cada planta.

**Cuadro 4.7. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de lubricante necesario para que los equipos operen durante un año, según el escenario A y B.**

Planta	Emisiones por escenario CO <sub>2</sub> eq (t)	
	A	B
Angostura	31,41	89,74
Río Macho	25,83	79,79
Reventazón	20,51	70,48

La cantidad de relleno es variable por año porque depende de la cantidad de lubricante que se haya consumido o contaminado, motivo por el cual se establecieron los escenarios. En ambos contextos, la planta que tiene más emisiones asociadas al ACV, es Angostura debido a la cantidad de relleno que emplean año tras año cuando las condiciones de operación son normales y en el caso del escenario B, se tomó en consideración una falla que les ocurrió en el 2018. En el caso de Río Macho, los rellenos del escenario A corresponden a casa máquinas, en las demás partes de esta planta los rellenos son cada 4 años, debido a que usan biolubricantes y no se contemplaron en el análisis; para el escenario B se consideró una falla

que les ocurrió en el 2018. En el caso de Reventazón, no han realizado rellenos en ninguna de las partes debido a que lleva tres años en funcionamiento, por lo que para el escenario B se supuso una falla que hasta la fecha no ha ocurrido. Entre más antigua sea la maquinaria, mayor cantidad de aceite de relleno necesitará, porque la eficiencia de las condiciones de operación de la máquina disminuye con el paso del tiempo y provoca que el lubricante pierda sus propiedades más rápido. Esto coincide con la cantidad de relleno que se maneja, porque Angostura es la que más relleno necesita en condiciones normales de operación y es la más antigua, caso contrario a Reventazón, que por ser tan nueva no ha requerido rellenos.

Es importante valorar la cantidad de lubricante que se consume en un año porque entre mayor sea la cantidad de relleno, mayor será la huella de carbono en la etapa de uso.

#### **4.1.1.2 Biolubricantes**

##### **Producción:**

Tal como se expuso en la sección 3.1.1.2, la producción de biolubricantes se compone de dos partes: cultivo de la materia prima y producción del aceite (biolubricante).

Para determinar las emisiones asociadas a la producción de la materia prima, se consideró, que las semillas de la cual se obtendría el aceite son de la planta de colza de clima caliente, según el país de origen del cual viene el producto seleccionado.

##### a) Cultivo de la materia prima

La cantidad total de lubricante de origen mineral que se necesita para operar las plantas en cuestión, son 52 294 litros, por lo que, considerando una producción de 7 000 litros por hectárea, se tiene que para poder obtener esa cantidad de aceite se necesitaría sembrar 7 hectáreas con 2 800 000 plantas de colza. En los cuadros A.7.2.1, A.7.2.2 y A.7.2.3 del Apéndice 7.2, se puntualiza dicha información.

Tal como se mencionó en el apartado 3.1.1.2, el cultivo de colza necesita una serie de requerimientos e insumos para cultivarlo y desarrollarlo. Por lo que, al multiplicar todos los requerimientos e insumos por las 7 ha, se obtuvo la cantidad total a demandar, en el cuadro 4.8 se muestran los resultados, la cantidad total para las 7 ha se encuentran detallada en la

columna denominada “Año”. Los requerimientos e insumos tienen un consumo energético (factor energético) por tanto, un consumo total de energía, en el cuadro anteriormente referido se encuentran dichos valores.

**Cuadro 4.8. Factores energéticos, requerimientos e insumos para el cultivo de 7 ha de colza, clima caliente.**

<b>Etapa</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Año</b>	<b>Factor energético (MJ/unidad)</b>	<b>Fuente</b>	<b>Consumo total energía (MJ)</b>
<b>Operaciones manuales:</b>						
	Chapeo/Raleo/Replanteo	días hombre	21	8,56	(Roldán, 2010)	179,76
	Fertilización	días hombre	15,4	8,56	(Roldán, 2010)	131,82
	Siembra	días hombre	21	8,56	(Roldán, 2010)	179,76
	Personal p/cosecha	días hombre	7	8,56	(Roldán, 2010)	59,92
<b>Operaciones mecánicas:</b>						
	Allanar la tierra	horas máquina	4	880,67	(Roldán, 2010)	3 522,68
	Arado	horas máquina	28	880,67	(Roldán, 2010)	24 658,77
	Gradeo	horas máquina	7	880,67	(Roldán, 2010)	6 164,69
	Pulverizadora	horas máquina	7	880,67	(Roldán, 2010)	6 164,69
	Cosechadora	horas máquina	7	880,67	(Roldán, 2010)	6 164,69
	Transporte interno	miles km-t	0,07	2,80	(Bruinsma, 2009)	0,19
	Transporte semillas cultivada	miles km-t	0,25	2,80	(Bruinsma, 2009)	0,71

Continuación del Cuadro 4.8.

<b>Etapa</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Año</b>	<b>Factor energético (MJ/unidad)</b>	<b>Fuente</b>	<b>Consumo total energía (MJ)</b>
	<b>Insumos:</b>					
<b>Fertilizantes</b>	Fósforo	t	0,49	26 400	(Bruinsma, 2009)	12 936
	Potasio	t	0,45	10 500	(Bruinsma, 2009)	4 777,50
	Sulfato	t	0,49	6 700	(Bruinsma, 2009)	3 283
	Nitrosulfato amónico	t	1,93	87 900	(Bruinsma, 2009)	169 207,50
<b>Preparación suelo</b>	Herbicida Glifosato	l	14	452,50	(Bruinsma, 2009)	6 335
	Herbicida DMA 6 (2,4D)	l	5,6	452,50	(Bruinsma, 2009)	2 534
	Herbicida Agroquat	l	17,5	452,50	(Bruinsma, 2009)	7 918,75
<b>Siembra</b>	Insecticida	l	0,044	245,57	(Bruinsma, 2009)	10,74
	Semilla	kg	21	13	(Bruinsma, 2009)	273
<b>Cuidados del cultivo</b>	Insecticida	kg	0,42	245,57	(Bruinsma, 2009)	103,14
	Fungicida	kg	7	245,57	(Bruinsma, 2009)	1 718,99
	Herbicida	l	4,9	452,50	(Bruinsma, 2009)	2 217,25
<b>Total</b>				<b>138 502,90</b>		<b>258 542,56</b>

El consumo total de energía se traduce en emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de los requerimientos, tal como se muestran en el cuadro 4.9.

**Cuadro 4.9. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del proceso de cultivo de colza.**

<b>Etapa</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Combustible (MJ)</b>	<b>Factor de emisión (kg CO<sub>2</sub>/MJ)</b>	<b>Emisión total de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Operaciones manuales:</b>					
	Chapeo/Raleo/Replanteo	días hombre	179,76	0,074	13,32
	Fertilización	días hombre	131,82	0,074	9,77
	Siembra	días hombre	179,76	0,074	13,32
	Personal p/cosecha	días hombre	59,92	0,074	4,44

Continuación del Cuadro 4.9.

<b>Etapa</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Combustible (MJ)</b>	<b>Factor de emisión (kg CO<sub>2</sub>/MJ)</b>	<b>Emisión total de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Operaciones mecánicas:</b>					
	Allanar la tierra	horas máquina	3 522,68	0,074	261,03
	Arado	horas máquina	24 658,77	0,074	1 827,22
	Gradeo	horas máquina	6 164,69	0,074	456,80
	Pulverizadora	horas máquina	6 164,69	0,074	456,80
	Cosechadora	hora máquina	6 164,69	0,074	456,80
	Transporte interno	miles km-t	0,19	0,074	0,014
	Transporte semillas cultivada	miles km-t	0,71	0,074	0,05
<b>Insumos:</b>					
<b>Fertilizantes</b>	Fósforo	t	12 936	0,060	776
	Potasio	t	4 777,50	0,060	287
	Sulfato	t	3 283	0,056	183,85
	Nitrosulfato amónico	t	169 207,50	0,060	10 152
<b>Preparación suelo</b>	Herbicida Glifosato	l	6 335	0,056	354,76
	Herbicida DMA 6 (2,4D)	l	2 534	0,056	141,90
	Herbicida Agroquat	l	7 918,75	0,056	443,45
<b>Siembra</b>	Insecticida	l	10,74	0,056	0,60
	Semilla	kg	273	0,004	1,08
<b>Cuidados del cultivo</b>	Insecticida	kg	103,14	0,056	5,78
	Fungicida	kg	1 718,99	0,056	96,26
	Herbicida	l	2 217,25	0,056	124,17
<b>TOTAL</b>			<b>258 542,56</b>		<b>16 066,68</b>

A continuación, en el cuadro 4.10 se resumen las emisiones derivadas de cada operación o requerimiento llevado a cabo en el proceso de cultivo y cosecha de la materia prima.

**Cuadro 4.10. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del cultivo de 7 ha de colza.**

<b>Descripción</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (kg)</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Operaciones Manuales	40,85	0,04
Operaciones Mecánicas	3 458	3,46
Insumos	12 567	13
<b>Total</b>	<b>16 066</b>	<b>16,07</b>

Del cuadro 4.10 se concluye que la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> eq proviene de los insumos, seguido de las operaciones mecánicas y, por último, las operaciones manuales, los insumos agrícolas son los que contribuyen más a las emisiones de GEI, en este caso CO<sub>2</sub>, debido a la alta tasa de aplicación de fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas en el cultivo de colza, además, el proceso de fabricación de estos productos aporta emisiones, lo que se ve reflejado en un impacto ambiental dominante, por lo que es importante valorar la importancia de hacer un uso racional o disminuir los fertilizantes y demás productos, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de campo.

b) Producción del biolubricante

Una vez cultivada y cosechada la materia prima, se procede a la producción del biolubricante. Tal como se ha mencionado esta etapa está compuesta por la extracción del aceite, el transporte del aceite crudo a la planta de biodiésel y la producción del aceite (Herrera et al., 2016), cada etapa es una fuente de emisiones de CO<sub>2</sub>. En el cuadro 4.11 se especifica la cantidad de emisiones desprendidas de cada etapa, tomando en consideración 1 kg de aceite.

**Cuadro 4.11. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la producción del biolubricante, por 1 kg de aceite.**

<b>Etapas</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (kg)</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Extracción	0,28	0,00028
Transporte	0,0020	0,000002
Producción	0,016	0,000016
<b>Total</b>	<b>0,298</b>	<b>0,0003</b>

Tomado de Lechón, Y., Cabal, H., Rúa C., Lago C., Izquierdo L., Sáenz R., & San Miguel, M. (2006). Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Madrid: Fareso S.A.

La extracción del aceite de la semilla de colza, es la etapa que emite más emisiones de CO<sub>2</sub>, tal como se refleja en el cuadro 4.11, debido a que el proceso involucra el transporte de las semillas del lugar de cultivo, hasta el lugar en donde se da la extracción, la cual requiere energía eléctrica, vapor o leña e insumos como hexano y agua para realizar el proceso, del cual se derivan ciertos efluentes que también conllevan un tratamiento que provoca emisiones (Herrera et al., 2016). La segunda etapa que emite más CO<sub>2</sub> es la producción del biolubricante y, por último, el transporte del aceite crudo a la planta de producción, la cual varía según la distancia a la que esté ubicada la planta del lugar en donde se da la extracción del aceite.

Al sumar las etapas de cultivo de materia prima y producción del biolubricante, se tiene que se emiten en total 0,0006 t CO<sub>2</sub> eq por kg de biolubricante producido y al evaluar la cantidad total de lubricante que se requiere para poner en funcionamiento las partes en cuestión, la cual equivale a 47 767 kg de biolubricante de colza, se tiene que en total se emitirían 30,31 t de CO<sub>2</sub> eq, tal como se observa en el cuadro 4.12 y 4.13, respectivamente.

**Cuadro 4.12. Emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del cultivo y producción de biolubricante, por kg de aceite.**

<b>Etapa</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (kg)</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Cultivo	0,336	0,00034
Producción biolubricante	0,298	0,0003
<b>Total</b>	<b>0,63</b>	<b>0,0006</b>

**Cuadro 4.13. Emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del cultivo y producción de biolubricante, por 47 767 kg de aceite requerido.**

<b>Etapa</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (kg)</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Cultivo	16 066	16,07
Producción biolubricante	14 239	14,24
<b>Total</b>	<b>30 306</b>	<b>30,31</b>

Analizando ambos cuadros, es evidente que la etapa de cultivo, es la que tiene más impacto sobre el ambiente. Esto reafirma los estudios que se hallaron en torno al tema, ya que la mayoría concluye que la fase de cultivo es la que tiene mayor impacto ambiental. En lo que respecta a la producción de biolubricantes (Bart et al., 2013), es importante tener en consideración lo mencionado en la sección 4.1 sobre los impactos que puede tener el cultivo en el ambiente debido al AP y EP.

**Uso:**

Tal como se mencionó en el apartado 3.1.1.2, el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq por el uso de biolubricantes de aceite de colza se llevó a cabo por medio del método para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de lubricantes del IPCC. En el cuadro 4.14 se muestran los resultados de las emisiones resultantes debido a la cantidad de biolubricante necesario para sustituir el volumen de lubricante de origen mineral en uso y las emisiones derivadas de 1 litro de biolubricante, para que en futuros estudios pueda ser usado como base.

**Cuadro 4.14. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de biolubricante necesario para que los equipos operen.**

<b>Planta Hidroeléctrica</b>	<b>Biolubricante (±1) l</b>	<b>Emisiones CO<sub>2</sub> eq (t)</b>
Base	1	0,00043
Angostura	19 400	8,38
Río Macho	17 888	7,73
Reventazón	15 006	6,48
<b>Total plantas</b>	<b>52 294</b>	<b>22,59</b>

Es importante recalcar que los resultados presentados en el cuadro 4.14 corresponden a la cantidad de lubricante de origen mineral que usan, por ende, que debe sustituirse. Al igual que los resultados discutidos en la sección 4.1.1.1, por el uso de lubricantes de origen mineral, se evidencia que la cantidad de emisiones, independientemente del tipo de lubricante, está ligada al volumen de lubricante que se emplee, Angostura es la que más generaría emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que hay que sustituir mayor cantidad de lubricante mineral, seguido de Río Macho y por último Reventazón, que es la planta que utiliza menos lubricante de origen mineral.

**Disposición:**

Una vez concluida la vida útil del biolubricante es momento de descartarlo, como son de base biológica y biodegradable, tiene una vida media o periodo de desintegración de 20 a 30 días (Murilo et al., 2015). Sin embargo, esto no quiere decir, que se puedan verter en cualquier desagüe. Hasta el momento hay escasa bibliografía entorno a cómo disponer los biolubricantes, pero a pesar de esto se recopilaron algunas ideas sobre qué hacer con este producto una vez culminada su vida útil:

- **Regeneración:** consiste en producir un aceite base por medio de un nuevo refinado de los aceites usados, reduciendo la dependencia de materias primas y ahorra energía en la producción del aceite (CCOO, s.f).
- **Reciclar:** hay compañías que compran aceites vegetales usados y los reciclan para obtener biodiésel u otro tipo de fluido (Noria, 2016).
- **Gestor de residuos autorizado:** según la ley para la Gestión Integral de Residuos, los productores o importadores tienen la responsabilidad del producto durante todo el ciclo de vida de este (Ley N° 8839, 2010).
- **Aprovechamiento energético:** consiste en la valorización del aceite usado en la industria de producción de cemento (Lechón et al., 2006).

Actualmente en Costa Rica no hay un tratamiento específico para finalizar el ciclo de vida de los biolubricantes, según lo conversado vía telefónica con encargados de MADISA, ECO TRADING, CEMEX y METALUB, por lo que se están gestionando igual a los lubricantes de origen mineral, mediante cogeneración en cementeras. Al estar conformados por una base biológica, los biolubricantes se consideran residuos neutros en carbono, es decir, no generan emisiones de CO<sub>2</sub> durante la cogeneración (CEMEX, 2017).

Lo ideal sería que conforme vaya cambiando la mentalidad y se empiecen a utilizar más productos biodegradables, como los biolubricantes, se oriente un mayor énfasis en la disposición de estos productos.

### **Proyecciones:**

Se asumió que se rellena el mismo volumen de lubricante de origen mineral, descrita en el apartado 4.1.1.1, en la sección “proyección”, por lo que se manejaron los mismos escenarios presentados en el cuadro 4.5.

No obstante, según información bibliográfica, si se usaran biolubricantes se requeriría menos relleno, porque mantienen más la viscosidad y se dan menos pérdidas por evaporación (Total, 2012) y si se controla bien el porcentaje de agua en el biolubricante, dura bastante tiempo en función, ejemplo de esto es la planta de Río Macho donde los resultados de los análisis fisicoquímicos de los biolubricantes indican que la viscosidad se mantiene por más de 4 años si se les da el mantenimiento adecuado (D. Solano Castillo, conversación personal, 2019).

En el cuadro 4.15 se presentan las emisiones correspondientes a cada escenario por planta, tomando en consideración las etapas de producción, uso y disposición, asociadas a la cantidad de lubricante de origen mineral que está en funcionamiento más el relleno. En el Apéndice 7.5 se encuentra un desglose específico por cada planta.

**Cuadro 4.15. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la cantidad de biolubricante necesario para que los equipos operen durante un año, según el escenario A y B.**

Planta	Emisiones por escenario CO <sub>2</sub> eq (t)	
	A	B
Angostura	21,09	153,93
Río Macho	18,08	136,85
Reventazón	15,48	120,88

Según los planteado, en caso de que se usaran biolubricantes para sustituir la cantidad que consumen actualmente de lubricante mineral al año, Angostura sería la planta con más emisiones asociadas en ambos escenarios, seguido de Río Macho y por último Reventazón, de igual manera que lo discutido para los lubricantes convencionales, se debe a la cantidad de lubricante que requiere cada planta y el volumen de relleno realizado al año.

#### **4.1.1.3 Lubricantes vs biolubricantes**

En resumen, una vez analizado cada producto, se concluye que el lubricante que tiene más impacto en la etapa de producción, uso y disposición es el lubricante de origen mineral, tal como se presenta en el cuadro 4.16 para un litro de lubricante y en el cuadro 4.17 para la cantidad de lubricante que se necesita para poner a funcionar las partes en estudio de las tres plantas.

**Cuadro 4.16. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de 1 l de lubricante de origen mineral.**

Lubricante	Etapas del ciclo de vida			Total
	Producción	Uso	Disposición	
Lubricante mineral	0,00086 t CO <sub>2</sub>	0,0051 t CO <sub>2</sub>	0,00256 t CO <sub>2</sub>	0,00393 t CO <sub>2</sub>
Biolubricante	0,00063 t CO <sub>2</sub>	0,00043 t CO <sub>2</sub>	-	0,00106 t CO <sub>2</sub>

**Cuadro 4.17. Emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de 52 294 l de lubricante de origen mineral.**

Lubricante	Etapas del ciclo de vida			Total
	Producción	Uso	Disposición	
Lubricante mineral	44,81 t CO <sub>2</sub>	26,68 t CO <sub>2</sub>	133,77 t CO <sub>2</sub>	205,26 t CO <sub>2</sub>
Biolubricante	30,31 t CO <sub>2</sub>	22,59 t CO <sub>2</sub>	-	52,90 t CO <sub>2</sub>

Tal como se evidencia en los cuadros, hay una reducción de emisiones al comparar el lubricante convencional y el biolubricante, por lo que si se emplearan biolubricantes en las tareas estudiadas se disminuiría la huella de carbono que se le asocia a la empresa al usar lubricantes de origen mineral, tomando en consideración el ACV de ambos productos, los lubricantes emiten 3,93 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante y los biolubricantes 1,06 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, lo que representa una reducción de 2,87 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, es decir un 30% menos de emisiones por litro.

### **Escenarios**

Para los escenarios contemplados, se trabajó con la cantidad de lubricante que se necesita para operar la maquinaria de las plantas, porque es el valor constante que se va a manejar todos los años y se evaluaron las emisiones por cada etapa del ciclo de vida. A continuación, se presenta cada escenario:

- **Escenario 1:** Ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> actual.

Como en las plantas hidroeléctricas Río Macho y Reventazón usan biolubricantes en algunas de las maquinarias, presentan una reducción de emisiones al emplear menos consumo de lubricantes convencionales, por lo que se calculó las emisiones que evitan emitir actualmente debido a este pequeño cambio. Para realizar el cálculo se estimó cuántas emisiones emitirían si solo usaran lubricantes convencionales en todo y cuántas con la que cantidad actual y se asumió que la cantidad de emisiones por disposición no varía.

Si solo usaran lubricante convencional en Reventazón usarían 36 638 l y actualmente usan 15 006 l, los 21 632 l sobrantes son biolubricante, evitando emitir 29,62 t CO<sub>2</sub> eq a la atmósfera. En el caso de Río Macho, de los 23 224 l, 17 888 l corresponden a lubricantes

convencionales y 5 336 l son biolubricantes, reflejando un ahorro de 7,30 t CO<sub>2</sub> eq y en el caso de Angostura, no exteriorizan ningún ahorro porque solo usan lubricantes de origen mineral, tal como se observa en la figura 4.2. En el Apéndice 7.4, cuadro A.7.4.1 se desglosa la cantidad de emisiones por etapa en caso de que solo utilizaran lubricante de origen mineral (LM) y el caso actual de las plantas Río Macho y Reventazón, en las cuales usan lubricantes de origen mineral y biolubricantes (LM y BIO).

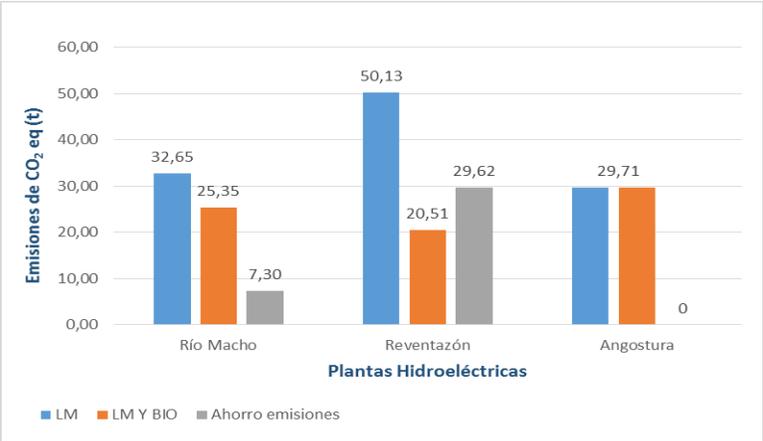


Figura 4.2. Gráfico ahorro actual de emisiones de CO<sub>2</sub> eq en las plantas hidroeléctricas.

- **Escenario 2:** Ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> si solo usaran biolubricantes.

Tal como se refleja en la figura 4.3, al sustituir la cantidad de lubricante de origen mineral que usan actualmente por biolubricantes, la planta Angostura reduciría 10,03 t CO<sub>2</sub> eq de sus emisiones, Río Macho 7,61 t CO<sub>2</sub> eq y Reventazón 5,03 t CO<sub>2</sub> eq. En el Apéndice 7.4, cuadro A.7.4.2, se muestra detalladamente la cantidad que se reducirían en cada etapa por planta.

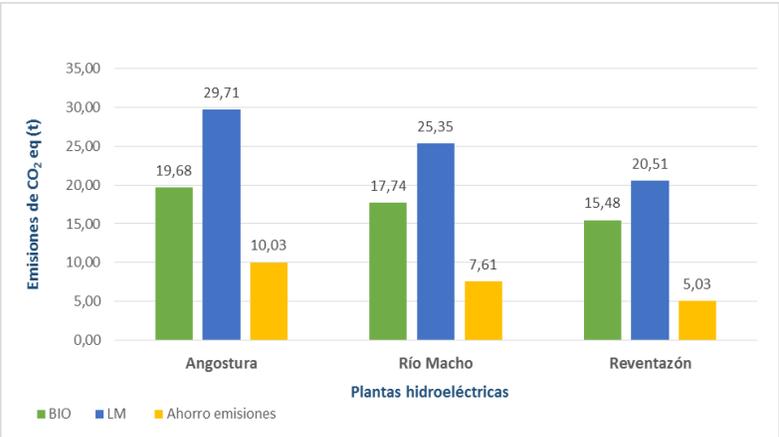


Figura 4.3. Gráfico ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> eq usando biolubricantes en las plantas hidroeléctricas.

En el caso de las plantas Río Macho y Reventazón, en total se ahorrarían 14,91 t CO<sub>2</sub> eq y 34,65 t CO<sub>2</sub> eq, respectivamente, valorando las emisiones que se están ahorrando actualmente (escenario 1) y las estimadas en este escenario.

El lubricante que emite mayor cantidad de emisiones es el lubricante de origen mineral, por lo que al sustituirlo por biolubricante sí se da una reducción de emisiones. A pesar de que el proceso de producción de los biolubricantes es la etapa que tiene más emisiones asociadas para este producto, continúan siendo más altas las emisiones por la producción de lubricantes de origen mineral, y para las etapas de uso y disposición, también son superiores las emisiones que se segregan de dicho producto, lo que reafirma lo antedicho en los cuadros 4.16 y 4.17.

En términos de porcentaje al realizar el cambio de lubricante, las emisiones de Angostura disminuirían un 33,76%, las de Río Macho un 30,02% y Reventazón un 24,52%, con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> que emiten actualmente, información importante a valorar ya que efectivamente se estaría disminuyendo la huella de carbono, no solo por el uso del producto sino también en todas las etapas del ciclo de vida, las cuales son importantes de valorar porque conciben impactos ambientales y emisiones de GEI a la atmósfera.

- **Escenario 3:** Uso de biolubricantes en todas las plantas.

Tal como se ha desarrollado a lo largo del documento, la idea es sustituir los lubricantes convencionales por biolubricantes, razón por la cual se predijeron las emisiones de CO<sub>2</sub> eq que emitirían si se diera el cambio en todas las partes de las plantas en estudio.

En el cuadro 4.18 se exponen las emisiones futuras derivadas de la cantidad de lubricante que ocupan las máquinas para funcionar, una vez realizado el cambio. Es conveniente aclarar que no se tomaron en cuenta las emisiones por disposición, porque se considera que la cogeneración o la regeneración del producto es neutro en emisiones (CEMEX, 2017).

**Cuadro 4.18. Emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes si solo se usaran biolubricantes en las plantas.**

Planta Hidroeléctrica	Lubricante requerido ( $\pm 1$ ) l	Emisiones de CO <sub>2</sub> eq (t) ACV		
		Producción	Uso	Total
Angostura	19 400	11,30	8,38	19,68
Río Macho	23 224	14,00	10,03	24,03
Reventazón	36 638	22,06	15,83	37,89
<b>Total</b>	<b>79 262</b>	<b>47,36</b>	<b>34,24</b>	<b>81,60</b>

Si se realizara el cambio, el impacto más grande de emisiones de CO<sub>2</sub> se derivaría de la producción y se evitarían totalmente las emisiones por disposición. Tal como se discutió en el apartado 4.1.1.2, la planta que más emisiones tendría asociadas debido al ciclo de vida del producto, sería Reventazón, por el requerimiento de consumo que tiene, seguido de Río Macho y, por último, Angostura. Es importante recordar, que actualmente Angostura es la que más emisiones emite por usar solo lubricantes convencionales y con el cambio sería la planta que menos emitiría, lo cual sería una gran evolución ambiental.

#### 4.2 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes hacen la diferencia en el desempeño de las máquinas (Salazar et al., 2015), es decir, si el aceite lubricante tiene buenas propiedades el desempeño es mejor, por lo cual es muy importante que las propiedades de los biolubricantes sean similares a las propiedades de los lubricantes de origen mineral.

Por lo anterior, para confirmar que la sustitución es técnicamente viable, a continuación, se presenta el cuadro comparativo 4.19, síntesis de las propiedades fisicoquímicas básicas que deben de tener los lubricantes.

**Cuadro 4.19. Comparación de las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes de origen mineral y biolubricantes.**

<b>Propiedades Fisicoquímicas</b>	<b>Lubricante de origen mineral</b>	<b>Biolubricantes</b>
Biodegradabilidad	Mala	Buena
Toxicidad	Alta	Baja
Lubricación	Buena	Buena
Viscosidad	Buena	Buena
Índice de viscosidad	100	100-200
Punto inflamación	Bajo	Alto
Punto Fluidez	Similar	Similar
Estabilidad térmica	Alta	Baja
Estabilidad oxidativa	Buena	Moderada
Estabilidad de corte	Buena	Buena
Solubilidad en agua	No soluble	No soluble

Adaptado de varios estudios (Gawrilow, 2005; Ramírez, 2014; Salazar et al., 2015)

Al analizar la información del cuadro 4.19, se concluyó que ambos productos son similares y que los biolubricantes efectivamente están en capacidad de ser utilizados en las instalaciones del ICE.

Las propiedades con las que se debe tener cuidado son la estabilidad térmica y oxidativa de los biolubricantes, sin embargo, estas propiedades han ido mejorando mediante la adición de aditivos, por lo cual no es un defecto que cause preocupación mayor.

Los lubricantes de origen mineral tampoco alcanzan su máximo desempeño sin la ayuda de aditivos, además, los biolubricantes tienen ventaja competitiva sobre los lubricantes de origen mineral, al tener un excelente índice de viscosidad, son biodegradables, renovables y no tóxicos, los cuales son puntos a favor para su uso. Dicho lo anterior, se ratifica que los biolubricantes tienen las características necesarias para ser usados como lubricantes, por lo que se procedió en el siguiente apartado a seleccionar un biolubricante apto para la sustitución.

## 4.3 IMPACTO FINANCIERO

### 4.3.1 Biolubricante seleccionado

Después de culminar la búsqueda de biolubricantes de venta en el mercado que cuentan con las propiedades requeridas, se solicitó la cotización de los siguientes productos: Biohydran TMP 46, Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, Mobil EAL 224H ISO 46 y Plantohyd 40 N ISO 46, sin embargo, solo se obtuvo respuesta de la empresa Lithio Lubs, la cual distribuye en Costa Rica el biolubricante Lubriplate y Plantohyd, las cotizaciones están adjuntas en el Anexo 8.4.

En cuanto a las condiciones de operación de casa máquinas y la presa, lo más importante según la experiencia de los técnicos de las plantas, es que el biolubricante seleccionado cumpla los siguientes requisitos:

- Apto para la aplicación o función que se desea.
- Buena viscosidad, en este caso VG 46.
- Buenos aditivos: evitar la formación de espuma, que absorba poca agua.
- Resistente a cambios de temperatura.
- Resistente a altas presiones.

El biolubricante seleccionado fue el Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, porque fue del que se adquirió más información sobre la composición de producto, información importante para realizar el ACV.



**Figura 4.4. Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, presentación 5 galones.**

El Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, es un lubricante hidráulico, formulado con una base de aceite vegetal de Brassica napus (colza), diseñado para sistemas hidráulicos que requieren propiedades antidesgaste, antiherrumbre, antióxidación,

antiespuma y de potencia demulsificante, diseñado para su uso en paletas hidráulicas móviles y estacionarias, bombas de pistón, turbinas y engranajes. Es completamente biodegradable según la norma ASTM D-5864, método utilizado para probar la biodegradación de lubricantes y con la cual el biolubricante seleccionado es catalogado como PW1, esto significa que es totalmente biodegradable y en caso que de que entre en contacto con el agua o tierra, en 28 días o menos se degradaría el 60% o más de lo que haya caído al ambiente (Lubriplate, 2009). En el Anexo 8.4 se encuentra más información sobre el producto.

Una de las preocupaciones de usar biolubricantes es, qué pasa si el biolubricante entra en contacto con agua estando en funcionamiento, la respuesta a esto es que el biolubricante tiene la capacidad de soportar 1 000 partes por millón de agua (ppm) al igual que los lubricantes convencionales, por lo que el cuidado es el mismo. El Lubriplate BioBased Green, tiene la capacidad de separar el agua (demulsibilidad) en 45-60 minutos y una vez separada se puede extraer fácilmente (R. Garro Retana, conversación personal, 2019).

Seleccionado el producto y aceptada la elección por los técnicos de las plantas, es fundamental valorar la parte financiera, por lo que en el siguiente punto se evaluó el impacto económico que tendría la empresa al cambiar los lubricantes convencionales por el biolubricante Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46.

#### **4.3.2 Análisis beneficio/costo**

El Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46 tiene un valor de ₡1 406 002.50 por estañon de 55 galones (208 l), en el Anexo 8.3 se encuentra la cotización gestionada por la empresa Lithio Lubs de Costa Rica.

Es posible que no haya un ahorro en costos porque los productos que usan actualmente cuestan en promedio ₡3 476 por litro y el biolubricante seleccionado ₡6 760 por litro, es decir, ₡3 248 más por litro, por lo que es evidente que el producto de remplazo tiene un costo mayor, sin embargo, a la hora de realizar la valoración contingente de los beneficios, se le asignó un valor de ₡7 500 a la biodegradabilidad, según las respuestas obtenidas en el cuestionario aplicado, en el Apéndice 7.7 se encuentra un resumen de las respuestas y se consideró en términos monetarios la imagen que ganaría la empresa. En el Apéndice 7.8 se

exponen los costos y los beneficios de la situación sin y con proyecto para cada una de las plantas hidroeléctricas en estudio. A continuación, en el cuadro 4.20 y 4.21 se discuten los indicadores obtenidos:

- **Escenario A: condiciones normales de operación**

**Cuadro 4.20. Indicadores económicos, escenario A.**

<b>Situación:</b>	<b>Sin proyecto</b>		<b>Con proyecto</b>	
<b>Indicadores:</b>	<b>VAN (C)</b>	<b>B/C</b>	<b>VAN (C)</b>	<b>B/C</b>
Angostura	-115 603 973	0,00	559 601 633	2,49
Rio Macho	133 928 991	2,15	446 894 789	2,13
Reventazón	879 046 717	7,41	443 624 074	2,66

- **Escenario B: fallo de algún equipo**

**Cuadro 4.21. Indicadores económicos, escenario B.**

<b>Situación:</b>	<b>Sin proyecto</b>		<b>Con proyecto</b>	
<b>Indicadores:</b>	<b>VAN (C)</b>	<b>B/C</b>	<b>VAN (C)</b>	<b>B/C</b>
Angostura	-132 684 108	0,00	565 339 644	2,32
Rio Macho	110 463 473	1,79	519 802 666	2,38
Reventazón	816 836 249	5,10	439 372 264	2,30

Hay que tener presente que los beneficios ambientales valen mucho más que un número, si bien en este proyecto se les asignó una carga monetaria para verlo en términos económicos, este dinero no es una entrada física, pero refleja la ganancia económica que tendrá la empresa al cuidar el ambiente.

A pesar de que el valor del producto es mayor, al sustituir los lubricantes minerales por biolubricantes, la situación con proyecto es positiva en todas las plantas según lo reflejado por el VAN y la relación B/C, debido al valor monetario que se les asignó a los beneficios ambientales que tendría la empresa, tanto para el escenario A como para el escenario B, por lo que el proyecto se considera recomendable.

Un aspecto importante que se debe tener presente para investigaciones futuras es el costo que tiene darle un tratamiento adecuado a los biolubricantes y a los lubricantes minerales, para comparar si hay una reducción o no de costos al realizar la disposición, sin embargo, esto no

se contempló en el análisis financiero porque actualmente en el país no hay diferenciación entre ambos productos y se tratan igual que los lubricantes minerales, por cogeneración.

Es importante tener presente que al sustituir los lubricantes minerales por biolubricantes, en caso de que suceda un accidente de fuga en el embalse, no se tendría que recurrir en gastos extras para tratar el agua contaminada, pero por prevención se debe tener el equipo para tratar la emergencia, aunque sean biodegradables, no obstante, si se diera un derrame de biolubricantes no habría daño alguno, caso contrario si sucediera con lubricantes minerales, situación que traería muchos aspectos negativos.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Hay lubricantes biodegradables de base: vegetal, sintética y semisintética, este proyecto se centró en los de base vegetal, denominados biolubricantes.

Los aceites vegetales tienen un mayor impacto en el AP y en el EP y los aceites de origen mineral en el PWG, el POCP, el PCG y mayor consumo de energía primaria.

El lubricante de origen mineral tiene un mayor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, según los indicadores ambientales y las emisiones de CO<sub>2</sub> eq estimadas.

Tomando en consideración el ACV de ambos productos, los lubricantes emiten 3,93 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante y los biolubricantes 1,06 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante, por lo que se da una reducción de 2,87 kg de CO<sub>2</sub> eq/l lubricante.

Los lubricantes y los biolubricantes tienen propiedades fisicoquímicas similares, por lo que son aptos y recomendables para su funcionamiento como lubricantes.

El biolubricante seleccionado debe resistir altas presiones y cambios de temperatura, debe ser apto para funciones hidráulicas y para turbinas, tener viscosidad ISO VG 46 y buenos aditivos que no permitan que el lubricante absorba mucha agua.

Para la sustitución se valoraron los biolubricantes de base vegetal: Biohydran TMP 46, Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, Mobil EAL 224H ISO 46 y Plantohyd 40 N ISO 46.

El biolubricante seleccionado fue el Lubriplate BioBased Green Hydraulic Fluids ISO 46, cuyo aceite base proviene de la planta de colza y tiene un valor de C1 406 002.50, por estañon de 55 galones.

El cambio de lubricante representa un costo efectivo mayor para el ICE, sin embargo, el análisis financiero indica que es recomendable la ejecución del proyecto, debido al valor contingente que se les asignó a los beneficios ambientales.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda estandarizar en las tres plantas los lubricantes empleados en el funcionamiento de la maquinaria, preferiblemente que sean biolubricantes.

Investigar sobre lubricantes biodegradables sintéticos o semisintéticos y evaluar el impacto del ACV, considerando la huella de carbono, de tal manera que se puedan comparar los resultados con esta investigación, con el fin de valorar su uso.

Se recomienda realizar el cambio de lubricantes a biolubricantes, de manera progresiva. Empezando con los equipos hidráulicos.

Al no haber proyectos sobre uso de biolubricantes en unidades generadoras, se recomienda dar el primer paso y poner a prueba el biolubricante seleccionado en una unidad y monitorear su comportamiento, acompañado del asesoramiento de la empresa distribuidora del producto.

Para disminuir las emisiones asociadas a la producción del biolubricante, se invita trabajar de ser posible, con materia prima nacional. En el país se encuentra la empresa Agronegocios Costa Rica quienes están empezando a producir biolubricantes, por lo que en un futuro sería interesante establecer un convenio.

Es importante realizar investigaciones futuras para valorar con certeza si los biolubricantes desprenden emisiones de CO<sub>2</sub> durante su uso o qué tipo de gas es el que se segrega.

Valorar maneras innovadoras de disponer los biolubricantes, tomando en cuenta empresas que sean conscientes de que están manejando un producto de base biológica.

Se recomienda que a la hora de calcular la huella de carbono por el uso de biolubricantes, no se estime con el mismo factor de emisión de lubricantes de origen mineral, ya que la composición del producto no es la misma y se estaría asumiendo que tienen la misma cantidad de contenido de carbono y, por tanto, que emiten la misma cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> eq.

Se recomienda llevar un control detallado y a la mano en las plantas hidroeléctricas, sobre la cantidad de lubricante que se rellena cada año, para tener un conocimiento exacto sobre la cantidad que se utilizó de más.

Se recomienda investigar sobre las diversas aplicaciones de los biolubricantes existentes en el mercado, ya que en este proyecto se trabajó con hidráulicos, pero tienen más aplicaciones, por ejemplo, biolubricantes para realizar operaciones forestales o para la maquinaria empleada en el mantenimiento de zonas verdes, en las que puede haber riesgo de fugas e impacto a la tierra.

## 6 REFERENCIAS

- Angüis Terrazas V. (2018). *Certificación Profesional Seguridad Integral en Prevención de Riesgos*. México: Gandhi.
- Bagher, A. M., Vahid, M., Mohsen, M., & Parvin, D. (2015). Hydroelectric Energy Advantages and Disadvantages. *American Journal of Energy Science*.
- Balzannikov, M. I., & Vyshkin, E. G. (2011). *Hydroelectric Power Plants Reservoirs and Their Impact on the Environment*. Rēzeknes Augstskola.
- Banco Central de Costa Rica (BCCR). (2018). Banco Central mantiene meta de inflación en  $3\% \pm 1$  punto porcentual. Recuperado el 17 de Julio de 2019, de [https://www.bccr.fi.cr/seccion-noticias/Noticia/revision\\_pm\\_2018-2019.aspx](https://www.bccr.fi.cr/seccion-noticias/Noticia/revision_pm_2018-2019.aspx)
- Barrera Gallegos, L.A. & Velecela Romero F.A. (2015). *Diagnóstico de la contaminación ambiental causada por aceites usados provenientes del sector automotor y planteamiento de soluciones viables para el gobierno autónomo descentralizado del cantón Azogues*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Markets for biolubricants. In *Biolubricants* (pp. 712–754). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.712>
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Epilogue: the outlook for biolubricant science and technology. In *Biolubricants*. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.847>
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Environmental life-cycle assessment (LCA) of lubricants. *Biolubricants*, 527–564. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.527>
- Borda, M. (2013). *El Proceso de Investigación: visión general de su desarrollo*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.
- Bruinsma, B. (2009). *Producción de biodiésel de palma aceitera y jatropha en la Amazona del Perú y el impacto para la sostenibilidad: Un análisis sostenible del ciclo de vida*. (Tesis). Open Universiteit Nederland, Holanda.
- CEMEX. (s.f). Acerca de CEMEX. Recuperado el 10 de junio, de <https://www.cemexcostarica.com/acerca-de-cemex>
- CEMEX. (2017). De Residuos a Combustibles. Recuperado el 14 de junio de 2019, de <http://www2.cemex.com/es/DesarrolloSustentable/DeResiduosCombustible.aspx>
- Comisiones Obreras de Aragón (CCOO). (s.f). Avanzando en la producción limpia como reducir impactos ambientales y riesgos para la salud en el uso de aceites y grasas lubricantes. Recuperado el 11 de junio, de [http://www2.fsc.ccoo.es/comunes/recursos/3/doc148743\\_Reducir\\_riesgo\\_en\\_el\\_uso\\_de\\_aceites\\_y\\_grasas\\_lubricantes\\_.pdf](http://www2.fsc.ccoo.es/comunes/recursos/3/doc148743_Reducir_riesgo_en_el_uso_de_aceites_y_grasas_lubricantes_.pdf)

- Cuevas, P. (2010). *Comparative life cycle assessment of biolubricants and mineral based lubricants*. (Tesis de maestría, University of Pittsburgh). Recuperado el 21 de marzo de 2019, de <http://d-scholarship.pitt.edu/6829/1/Cuevas-4-7-2010.pdf>
- Chavarría, F., Molina, Ó., Gamboa R., & Rodríguez J. (2016). Medición de la huella de carbono de la Universidad Nacional de Costa Rica para el periodo 2012-2014. Rumbo a la carbono neutralidad. UNICIENCIA Vol. 30, No. 2, p. 47-62.
- Da Costa e Silva, P. & Goncalves, A. V. (2006). Industrial risk management on hydroelectric power plants. *Safety and Reliability for Managing Risk*, Vols 1-3.
- Danfoss. (2016). *Hydraulic Fluids and Lubricants Fluids, Lubricants, Grease, Jelly. Engineering Tomorrow*.
- Davies, C., Harnisch, J., Lucon, O., Mckibbon, R., Saile, S., Wagner, F., & Walsh, M. (2006). Volumen 2: Energía, Capítulo 3: Combustión Móvil. *IPCC*. Recuperado el 13 de mayo de 2019, de [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf)
- Delta. (s.f). Biolubricantes. Recuperado el 21 de enero de 2019, de <http://www.productosdelta.com/es/productos/biolubricantes>
- Dirección General de Calidad Ambiental y Cambio Climático (DGCACC). (2010). “*Guía para la elaboración de un plan de acción*”: *Sistema de adhesión a la EACCEL*. Recuperado el 10 de junio, de [https://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/MedioAmbiente/Areas/03\\_Cambio\\_climatico/04\\_Estrategia\\_Cambio\\_Climatico\\_Energias\\_Limpias/Guia\\_Plan\\_final.pdf](https://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/MedioAmbiente/Areas/03_Cambio_climatico/04_Estrategia_Cambio_Climatico_Energias_Limpias/Guia_Plan_final.pdf)
- Eco trading. (s.f). Política integrada de calidad, medio ambiente y prevención de riesgos laborales. Recuperado el 14 de febrero de 2019, de <http://ecotradingcr.com/images/Politica%20Integrada.pdf>
- Espíndola, C., & Valderrama, J.O. (2018). *Huella del Carbono: Cambio Climático, Gestión Sustentable y Eficiencia Energética*. (Primera edición). Chile: Universidad de La Serena.
- Ekman, A., & Börjesson, P. (2011). Life cycle assessment of mineral oil-based and vegetable oil-based hydraulic fluids including comparison of biocatalytic and conventional production methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0263-0>
- El País. (5 de Febrero de 2019). Costa Rica contará con Programa Nacional de Etiquetado Ambiental y Energético. El País. Recuperado el 22 de Agosto de <https://www.elpais.cr/2019/02/05/costa-rica-contara-con-programa-nacional-de-etiquetado-ambiental-y-energetico/>

- Energía Nuclear Latinoamericana (ENULA). (2018). Rosatom firma un contrato para la instalación de facilidades mini-hidroeléctricas en la República de Sudáfrica. [Figura]. Recuperado el 13 de junio de 2019, de <http://enula.org/2018/01/rosatom-firma-un-contrato-para-la-instalacion-de-facilidades-mini-hidroelectricas-en-la-republica-de-sudafrica/>
- Exxon Mobil. (s.f). Biodegradable. Recuperado el 24 de enero de 2019, de <https://www.exxonmobil.com/pds/PDS-Search?q=biodegradable&pageSize=10&pageNumber=1&selectedFacets=&lob=All&country=US>
- Fedit. Centros Tecnológicos de España. (2009). Tekniker-IK4 desarrolla nuevos biolubricantes para competir con los derivados del petróleo. Recuperado el 5 de enero del 2019, de <http://fedit.com/2009/11/tekniker-ik4-desarrolla-nuevos-biolubricantes-para-competir-con-los-derivados-del-petroleo/>
- Figuroa, M. H. (2008). Riesgo Químico y Residuos Químicos Peligrosos. Facultad De Medicina – UBA
- Figueredo, J. C. (2011). Biodegradabilidad de los lubricantes sintéticos. Clean Shester de Colombia Ltda, Bogotá, Colombia. Recuperado el 22 enero del 2019, de <https://es.scribd.com/document/63839156/Bio-Lubricantes-Sinteticos-Biodegradabilidad-de-lubricantes-aceites-y-grasas>
- FONAFIFO. (2018). Información general. Recuperado el 1 julio de 2019, de <https://www.fonafifo.go.cr/es/>
- FUCHS. (2019). Perfil empresarial. Recuperado el 24 de febrero de 2019, de <https://www.fuchs.com/es/es/la-empresa/acerca-de-fuchs/perfil-empresarial/>
- Garcés, R., Martínez-Force, E., & Salas, J. J. (2011). Vegetable oil basestocks for lubricants. *Grasas y Aceites*, 62(1), 21–28. <https://doi.org/10.3989/gya.045210>
- García Colomer, A. (2011). *Diseño, selección y producción de nuevos biolubricantes*. (Tesis doctoral). Instituto Químico de Sarriá, Barcelona, España.
- García, S. (2003). Organización y gestión integral de mantenimiento. España: Días de Santos
- García Ruiz, J. R., & García López, J. (2016). *Guía del Cultivo de la Colza*. Córdoba, Argentina: Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.
- Garg, A., Kazunari, K., & Pulles, T. (2006). Volumen 2: Energía, Capítulo 1: Introducción. IPCC. Recuperado el 5 de marzo de 2019, de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol1.html>
- Gawrilow, H. (2005). Uso de aceite vegetal en lubricantes. *Palmas*. 26(3), 55-61.

- Gómez, D., Watterson, J., Americano B., Ha, Ch., ...Treanton, K. (2006). Volumen 2: Energía. Capítulo 2: Combustión Estacionaria. *IPCC*. Recuperado el 19 de junio, de [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf)
- Heikal, E. K., Elmelawy, M. S., Khalil, S. A., & Elbasuny, N. M. (2017). Manufacturing of environment friendly biolubricants from vegetable oils. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.03.003>
- Herrera, I., De la Rúa, C., Caldés, N., & Lechón, Y. (2016). Análisis de ciclo de vida del proceso de producción de biodiésel a partir de un mix de materias primas grasas en la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR). España.
- InnMain. (2015). Industrial Maintenance Definition. Recuperado el 7 de enero de 2019, de <http://www.innmain.eu/wp-content/uploads/intranet/annual%20meetings/2015%20olbia/Olbia%2014%20-%20Industrial%20Maintenance%20definition.pdf>
- ISO 14040:2006. (2006). Gestión ambiental-Análisis del ciclo de vida-Principios y marco de referencia. Recuperado el 27 de marzo de 2019, de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Instituto de la Grasa. (s.f). Biolubricantes basados en aceites vegetales y sus derivados sintéticos: BIOVESIN. Memoria técnica del proyecto.
- Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología (INCYT). (2017). Potencial de acidificación. Recuperado el 27 de marzo de 2019, de <http://incyt.org/indicadores/potencial-de-acidificacion/>
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2018). Factores de emisión de gases de efecto invernadero, Octava edición 2018.
- International Organization for Standardization (ISO). (s.f). About ISO. Recuperado el 20 de marzo de 2019, de <https://www.iso.org/about-us.html>
- INTE/ISO 14001:2015. (2015). Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso. (Tercera edición). Costa Rica: INTECO
- INTE/ISO 14044:2006. (2006). Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices. Recuperado el 22 de Agosto, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Ley para la Gestión Integral de Residuos (N° 8839). Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA), San José, Costa Rica, 2010.

- Lechón, Y., Cabal, H., De la Rúa, C., Lago, C., Izquierdo, L., Sáenz R., & San Miguel, M. (2006). *Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el transporte: Fase II. Análisis de ciclo de vida comparativo del biodiésel y el diésel*. Madrid: Fareso S.A.
- Lubriplate Lubricants Company. (2016). Recuperado el 24 de febrero de 2019, de <https://www.lubriplate.com/Home.html>
- Lubriplate. (2009). LUBRIPLATE Biobased Green Hydraulic Fluids Fluidos hidráulicos verdes de base tecnológica (ISO 32, 46, 68). Recuperado el 18 de junio, de <https://www.lubriplate.com/PDFs/SpanishPDF/BiobasedGreenHyd-Spanish.aspx/>
- Linares Llamas P., & Romero López C. (s.f). Economía y medio ambiente: herramientas de valoración ambiental. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Recuperado el 4 de julio, de <https://www.iit.comillas.edu/pedrol/documents/becke08.pdf>
- Manejo de desechos peligrosos industriales, (N° 27001). Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 1998.
- McNutt, J., & He, Q. S. (2016). Development of biolubricants from vegetable oils via chemical modification. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.02.008>
- Ministerio de Sanidad y Servicios Sociales e Igualdad y AECOSAN. (2017). Aceites Minerales. Recuperado el 15 de enero de 2019, de [http://www.aecosan.mssi.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad\\_alimentaria/gestion\\_riesgos/Aceites\\_minerales.pdf](http://www.aecosan.mssi.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/gestion_riesgos/Aceites_minerales.pdf)
- Ministerio para la transición ecológica. (s.f). Principales elementos del Acuerdo de París. Recuperado el 13 de junio, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elmentos-acuerdo-paris.aspx>
- Mobarak, H. M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Al Mahmud, K. A. H., Habibullah, M., & Ashraful, A. M. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.062>
- Mobil. (2019). Mobil DTE Oil Medium. Recuperado el 4 de marzo de 2019, de <https://www.mobil.com/en/industrial/Lubricants/Products/Mobil-DTE-Oil-Medium>
- Murilo, F., Luna, T., Cavalcante, J., Ordelei, F., Silva, N., Célio L. & Cavalcante Jr. (2015). Studies on biodegradability of bio-based lubricants. *Tribology International*, Volume 92, Pages 301-306, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.007>.
- Nagendramma, P., & Kaul, S. (2012). Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 764–774. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.002>

- Naciones Unidas. (2004). Atlas de productos básicos. Recuperado el 18 de enero de 2019, de <https://books.google.co.cr/books?id=KhzSZUMdIUEC&pg=PT9&dq=origen+de+los+aceites&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjRgvmqy-jfAhUjpFkKHdUqBEo4ChDoAQgwMAI#v=onepage&q=origen%20de%20los%20aceites&f=false>
- Nieto Gallego, E. (2011). Industria de las refinerías de petróleo. *Eco-innovación en Procesos Industriales: Gestión en las Industrias de la Eco-innovación* (pp. 120-121). España: Escuela de Organización Industrial (EOI).
- Noria. (2013). Contaminación de aceites hidráulicos bio-basados. Recuperado el 20 de enero de 2019, de <http://noria.mx/lublearn/contaminacion-de-aceites-hidraulicos-bio-basados/>
- Noria. (2013). La importancia de efectuar a tiempo el cambio de aceite. Recuperado el 12 de junio de 2019, de <http://noria.mx/lublearn/la-importancia-de-efectuar-tiempo-el-cambio-de-aceite/>
- Noria. (2016). Cómo administrar lubricantes usados y su disposición. (Traductor, J. Páez Alfonzo, F.J, Noria Latin America). Recuperado el 4 de junio de 2019, de <http://noria.mx/lublearn/como-administrar-lubricantes-usados-y-su-disposicion/>
- Olivier, J., Gaudioso, D., Gillenwater, M., Ha, Ch., Hockstad, L., Martinsen, T., Neelis, M., Park, H., Simmons, T., & Patel, M. (2006). Volumen 3: Procesos industriales y uso de productos, Capítulo 5: Uso de productos no energéticos de combustibles y de solventes. *IPCC*. Recuperado el 5 de marzo de 2019, de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol3.html>
- Osorio Múnera, J. D. & Correa Restrepo, F. (2004). *Valoración económica de costos ambientales: marco conceptual y métodos de estimación*. Semestre Económico, 7 (13), 159-193.
- Raimondi, A., Girotti, G., Blengini, G. A., & Fino, D. (2012). LCA of petroleum-based lubricants: state of art and inclusion of additives, 987–996. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0437-4>
- Ramírez Romero, J. (2014). *Estudio experimental de las propiedades fisicoquímicas y tribológicas de un biolubricante formulado a partir de aceite de higuera*. (Tesis de maestría, Universidad Veracruzana). Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41976/RamirezRomeroAlberto.pdf?sequence=1>
- Reyes López, J. (2015). *Evaluación del potencial de eutrofización y huella hídrica en sistemas de producción de rosas de corte en la sabana de Bogotá*. (Tesis de grado para optar al título de Biólogo Ambiental, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano). Recuperado el 27 de marzo de 2019, de <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1478/T015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales (N° 2700). Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 1998.
- Rousset P., Carli, M., Costa, F., Silva, O., Bélot, J., Clement, D.,...Silva, D. (2008). *Guía técnica para la utilización de aceites vegetales*. Brasil: Cirad.
- Roldán, C. (2010). *Consultoría: “Eficiencia Energética en la Producción de Biocombustibles”*. San Salvador.
- Salazar, D., García, F., López A., Aldana, R., Álvarez, E., García, L., & Hernández, J. (2015). *El ciclo de evolución de los lubricantes*. Universidad Veracruzana, Xalapa, México.
- Salimon, J., Salih, N., & Yousif, E. (2010). Biolubricantes: Materias primas, modificaciones químicas y beneficios medioambientales. *Revista Europea de Ciencia y Tecnología de Lípidos*. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900205>
- SETAC. (2012). 6th SETAC World Congress/SETAC Europe 22nd Annual Meeting: Abstract Book. Brussels.
- Shell. (2014). Technical data sheet, Shell Turbo Oil T 46.
- Solorzano, R. (2017). *Hydraulics & Pneumatics. Encuentra el Punto Ideal del Fluido Hidráulico*. Recuperado el 11 de enero de 2019, de <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/encuentre-el-punto-ideal-del-fluido-hidraulico>
- Sotavento Galicia. *Lubricantes atóxicos, biodegradables y de origen renovable para Aerogeneradores*. Recuperado el 3 de enero de 2019, de <http://www.sotaventogalicia.com/es/proyectos/lubricantes-atoxicos-biodegradables-aerogeneradores>
- Syahir, A. Z., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., & Harith, M. H. (2017). A review on bio-based lubricants and their applications. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.106>
- Swissoil. (2012). Grados de Viscosidad ISO. Recuperado el 20 de marzo de 2018, de [https://www.swissoil.com.ec/boletines/SO\\_Boletin05\\_viscosidad%20ISO.pdf](https://www.swissoil.com.ec/boletines/SO_Boletin05_viscosidad%20ISO.pdf)
- Tellus S2 MX (2016). Shell Tellus S2 MX 46 (2016). Recuperado el 25 de marzo de 2019, de <https://www.lubritec.com/wp-content/uploads/2018/04/FT-SH-Tellus-S2-MX-46.pdf>
- Total. (2012). *Biolubricantes Protegiendo el Medio Ambiente*. Recuperado el 20 de junio, de [http://www4.total.fr/Europe/Spain/PDF/BioLubricantes\\_SP.pdf](http://www4.total.fr/Europe/Spain/PDF/BioLubricantes_SP.pdf)
- Total. (2016). Equivis ZS. Recuperado el 20 de marzo de 2018, de <https://www.purseroil.com/wp->

content/uploads/pdf/EQUIVIS%20ZS%20SERIES%20TOTAL%20rev5%207-2016.pdf

Total. (s.f). Total–Energy is our history. Recuperado el 25 de marzo de 2019, de <https://www.total.com/en/group/identity/history>

Union of Concerned Scientists. (s.f). Los costos ocultos de los combustibles fósiles: los verdaderos costos del carbón, gas natural y otros hidrocarburos no siempre son obvios, pero su impacto puede ser desastroso. Recuperado el 30 de marzo, de <https://es.ucsusa.org/nuestro-trabajo/energia-limpia/los-costos-ocultos-de-los-combustibles-foviles>

Viswanath, D., Ghosh, T., Prasad, D., Dutt, K., & Rani, Y. (2007). Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data. Países Bajos: Springer.

Wagner, H. J. & Mathur J. (2011). Introduction to Hydro Energy Systems: Basics, Technology and Operation. Nueva York: Springer.



## 7 APÉNDICES

### APÉNDICE 7.1. CUESTIONARIO: INFORMACIÓN GENERAL.

#### Apéndice 7.1.1. Cuestionario Planta Hidroeléctrica Angostura.

Mi nombre es Jacqueline Sánchez Avendaño, estudiante de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), me encuentro realizando mi proyecto de graduación el cual consiste en la evaluación técnica y ambiental para la sustitución de aceites minerales por biolubricantes en las plantas hidroeléctricas, específicamente en el sector de casa máquinas y el vertedor. Solicito muy respetuosamente contestar las siguientes preguntas, la información brindada será utilizada para los fines descriptos, de ante mano muchas gracias.

1. ¿Cuál es la cantidad de aceite de cada una de las unidades ubicadas en casa máquinas?

EQUIPO O COMPONENTE	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	CANTIDAD DE ACEITE (litro)	TIPO DE ACEITE
Gobernador hidráulico U1	Casa Máquinas	1,600	SHELL TURBO T46
Cojinete superior U1	Casa Máquinas	2,000	SHELL TURBO T46
Cojinete inferior U1	Casa Máquinas	600	SHELL TURBO T46
Cojinete turbina U1	Casa Máquinas	300	SHELL TURBO T46
Gobernador hidráulico U2	Casa Máquinas	1,600	SHELL TURBO T46
Cojinete superior U2	Casa Máquinas	2,000	SHELL TURBO T46
Cojinete inferior U2	Casa Máquinas	600	SHELL TURBO T46
Cojinete turbina U2	Casa Máquinas	300	SHELL TURBO T46
Gobernador hidráulico U3	Casa Máquinas	1,600	SHELL TURBO T46
Cojinete superior U3	Casa Máquinas	2,000	SHELL TURBO T46
Cojinete inferior U3	Casa Máquinas	600	SHELL TURBO T46
Cojinete turbina U3	Casa Máquinas	300	SHELL TURBO T46
Gobernador hidráulico VC	Válvula Conducción	600	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Toma de Agua	Vertedor	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Compuertas C 1.1 y C 1.2	Vertedor	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Compuertas C 1.3 y C 1.4	Vertedor	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Compuertas C 2 y C 3	Vertedor	400	SHELL TURBO T46
Limpiaarreas	Vertedor	1,300	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Toma de agua	Toma de Agua Turrialba	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Descarga de Fondo	Toma de Agua Turrialba	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Desarenador	Toma de Agua Turrialba	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Toma de agua	Toma de Agua Tuis	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Descarga de Fondo	Toma de Agua Tuis	400	SHELL TURBO T46
Unidad hid. Desarenador	Toma de Agua Tuis	400	SHELL TURBO T46
		<b>19,400</b>	

Los datos indicados en la tabla anterior son las cantidades necesarias para que los equipos operen, cuando se requiere se hacen rellenos o cambios totales, pero depende de la condición del aceite. Cada 3 meses se realizan muestreos para ejecutar análisis químico en laboratorio del ICE.

2. ¿Cuáles son los precios de los aceites utilizados?

El aceite SHELL cuesta ¢430 530 cada estañon.

3. ¿Cada cuánto compran los aceites?

Se compran 20 estañones cada 2 años.

4. ¿A cuál empresa les dan los aceites después de su uso?

Se llama MADISA, quienes a su vez lo venden a CEMEX y/o ECOTRAIDING.

5. ¿Les pagan por recoger los aceites?

Existe un convenio institucional con MADISA para que recojan todos los residuos, existe un equilibrio entre los residuos valorizables y los que no lo son. Cuando hay ganancias para el ICE la empresa entrega productos u objetos relacionados con la gestión ambiental. No existe un pago como tal en efectivo, sino más bien un intercambio entre ambas empresas.

6. ¿Con qué frecuencia se les da mantenimiento a los equipos?

Se realizan mantenimientos preventivos de forma anual.

#### **Apéndice 7.1.2. Cuestionario Planta Hidroeléctrica Río Macho.**

1. ¿Cuál es la cantidad de aceite de cada una de las unidades ubicadas en casa máquinas?

<b>TOTAL casa máquinas</b>	<b>17888</b>
<b>Total vertedor</b>	<b>1800</b>
<b>Total</b>	
<b>Total tomas</b>	<b>3536</b>

2. ¿Cuáles son los precios de los aceites utilizados?

Los precios de los aceites sintéticos rondan los ¢500 000 por cada tonel de 200 l y el biodegradable hasta ¢750 000 por cada estañon de 204 l.

3. ¿Cada cuánto compran los aceites?

Las compras se realizan dependiendo del grado de degradación del aceite según los informes del análisis físicoquímicos realizados en el laboratorio ICE.

4. ¿A cuál empresa les dan los aceites después de su uso?

Actualmente los recicla la empresa MADISA.

5. ¿Les pagan por recoger los aceites?

No lo sé, pero creo que existe un convenio entre empresas para este asunto y los detalles en relación a este tema los manejan los gestores ambientales, nosotros solo nos encargamos de embazar y tener el aceite listo para su traslado.

6. ¿Con qué frecuencia se les da mantenimiento a los equipos?

Normalmente los mantenimientos preventivos de los equipos son anuales, sin embargo, existe una rotación de una unidad de purificación de aceite en las unidades generadoras en planta con un muestreo de tres veces al año para análisis físicoquímico.

### Apéndice 7.1.3 Cuestionario Planta Hidroeléctrica Reventazón.

1. Con respecto a esta tabla, los litros de aceite de cada unidad, ¿son la cantidad total que ocupa para funcionar o es una cantidad mensual o anual?

Esta es la cantidad que se requiere para funcionar.

Aceites de planta PH Reventazon	Unidades	Cantidad por unidad	Tipo de aceite
Unidades hidráulicas (4) y válvula de conducción (1)	5	1600 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Cojinetes combinados GENERADOR	1	1750 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Cojinetes guía de generador	1	600 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Cojinete guía de turbina	1	600 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Limpiaresas toma de agua principal y CCE	2	208 lts	Equivis ISO VG 46
Unidades hidráulicas vertedor CRV	4	3328 lts	Lubriplate ISO VG 46
Unidad hidráulica CCE Gobernador hidráulico	1	936 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Unidad Hidráulica CCE GENERADOR	1	1248 lts	Shell iso VG 46 turbo t
Compuerta Toma CCE (atagüia)	1	728	Shell iso VG 46 turbo t
Unidad Hidráulica de Disipadora CCE	1	728	Shell iso VG 46 turbo t
Compuerta Descarga de Fondo (RADIALES)	1	3328	Lubriplate ISO VG 46
Compuerta Descarga de fondo (ATAGÜÍA)	1	2912 lts	Lubriplate ISO VG 46
Compuerta toma principal (atagüia)	1	2080 lts	Lubriplate ISO VG 46
TOTAL:	18		

2. ¿Cuáles son los precios de los aceites Shell y Equivis?

El costo del aceite Shell es de ₡5 908/l. Valor según datos de almacén.

3. ¿Cada cuánto los compran?

No ha sido requerido comprar, hay existencias en almacén.

4. ¿A cuál empresa les dan los aceites después de su uso?

La empresa MADISA.

5. ¿Les pagan por recoger los aceites?

Es un convenio, el pago o cobro normalmente está ligado a la calidad del hidrocarburo entregado.

6. ¿Con qué frecuencia se les da mantenimiento a los equipos?

Se realizan mantenimientos preventivos cada 1 000 horas.

## APÉNDICE 7.2. REQUIRIMIENTOS DE LUBRICANTE.

Cuadro A.7.2.1. Cantidad de lubricante de origen mineral requerido para el funcionamiento de las partes en estudio.

<b>Planta hidroeléctrica</b>	<b>Litros (±1) l</b>	<b>Kilogramos aceite colza (kg)</b>	<b>Kilogramos aceite origen mineral (kg)</b>
Angostura	19 400	17 721	16 878
Río Macho	17 888	16 340	15 563
Reventazón	15 006	13 707	13 055
<b>Total</b>	<b>52 294</b>	<b>47 767</b>	<b>45 496</b>

Cuadro A.7.2.2. Cantidad de aceite de colza que se obtiene de una hectárea de cultivo de colza y cantidad de hectáreas para producir el aceite requerido.

<b>Hectáreas (ha)</b>	<b>Litros (l)</b>
1	7 000
7	52 294

Cuadro A.7.2.3. Cantidad de plantas y semillas de colza que se pueden sembrar en una hectárea de cultivo de colza y cantidad requerida para el proyecto.

<b>Metro cuadrado (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Hectáreas (ha)</b>	<b>Plantas colza</b>	<b>Semillas colza (kg)</b>
1		40	3
10 000	1	400 000	3
70 000	7	2 800 000	21

Cuadro A.7.2.4. Cantidad de granos de colza, obtenidos de una hectárea de cultivo y cantidad requerida para el proyecto.

<b>Hectárea (ha)</b>	<b>Granos colza (kg)</b>
1	1 800
7	12 600

Cuadro A.7.2.5. Operaciones manuales, mecánicas e insumos requeridos en el cultivo de una hectárea de colza, clima caliente.

<b>Etapa</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Año</b>
<b>Operaciones manuales:</b>			
	Chapeo/Raleo/Replanteo	días hombre	3
	Fertilización	días hombre	2,20
	Siembra	días hombre	3
	Personal p/cosecha	días hombre	1
<b>Operaciones mecánicas:</b>			
	Allanar la tierra	horas máquina	4
	Arado	horas máquina	4
	Gradeo	horas máquina	1
	Pulverizadora	horas máquina	1
	Cosechadora	horas máquina	1
	Transporte interno	miles km-t	0,010
	Transporte semillas cultivadas	miles km-t	0,04
<b>Insumos:</b>			
<b>Fertilizantes</b>	Fósforo	t	0,07
	Potasio	t	0,06
	Sulfato	t	0,07
	Nitrosulfato amónico	t	0,27
<b>Preparación suelo</b>	Herbicida Glifosato	l	2
	Herbicida DMA 6 (2,4D)	l	0,80
	Herbicida Agroquat	l	2,50
<b>Siembra</b>	Insecticida	l	0,00625
	Semilla	kg	3
<b>Cuidados del cultivo</b>	Insecticida	kg	0,06
	Fungicida	kg	1
	Herbicida	l	0,70

### APÉNDICE 7.3. FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub>.

Cuadro A.7.3.1. Factores de emisión de CO<sub>2</sub> de los requerimientos e insumos del cultivo de colza.

Etapa	Requerimientos	Unidad	Combustible (MJ)	Factor energético (MJ/unidad)	Factor de emisión de (Kg CO <sub>2</sub> /MJ)
<b>Operaciones manuales:</b>					
	Chapeo/Raleo/Replanteo	días hombre	179,76	8,56	0,074
	Fertilización	días hombre	131,82	8,56	0,074
	Siembra	días hombre	179,76	8,56	0,074
	Personal por cosecha	días hombre	59,92	8,56	0,074
<b>Operaciones mecánicas:</b>					
	Allanar la tierra	horas máquina	3 522,68	880,67	0,074
	Arado	horas máquina	24 658,77	880,67	0,074
	Gradoo	horas máquina	6 164,69	880,67	0,074
	Pulverizadora	horas máquina	6 164,69	880,67	0,074
	Cosechadora	hora máquina	6 164,69	880,67	0,074
	Transporte interno	miles km-t	0,19	2,80	0,074
	Transporte semillas cultivada	miles km-t	0,71	2,80	0,074
<b>Insumos:</b>					
<b>Fertilizantes</b>	Fósforo	t	12 936	26 400	0,060
	Potasio	t	4 777,50	10 500	0,060
	Sulfato	t	3 283	6 700	0,056
	Nitrosulfato amónico	t	169 207,50	87 900	0,060
<b>Preparación suelo</b>	Herbicida Glifosato	l	6 335	452,50	0,056
	Herbicida DMA 6 (2,4D)	l	2 534	452,50	0,056
	Herbicida Agroquat	l	7 918,75	452,50	0,056
<b>Siembra</b>	Insecticida	l	10,74	245,57	0,056
	Semilla	kg	273	13	0,004
<b>Cuidados del cultivo</b>	Insecticida	kg	103,1394	245,57	0,056
	Fungicida	kg	1 718,99	245,57	0,056
	Herbicida	l	2 217,25	452,50	0,056



## APÉNDICE 7.4. AHORRO EMISIONES.

Cuadro A.7.4.1. Emisiones que se ahorran por usar biolubricantes en Río Macho y Reventazón.

Planta	Solo LM (±1) l	LM y BIO (±1) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)								Ahorro
			Producción		Uso		Disposición		Total		
			LM	LM Y BIO	LM	LM Y BIO	LM	LM Y BIO	LM	LM Y BIO	
Río Macho	23 224	17 888	19,90	15,33	11,85	9,12	0,90	0,90	32,65	25,35	7,30
Reventazón	36 638	15 006	31,44	12,86	18,69	7,65	0,00	0,00	50,13	20,51	29,62
Angostura	19 400	19 400	16,62	16,62	9,90	9,90	3,19	3,19	29,71	29,71	0,00

Cuadro A.7.4.2. Emisiones que se ahorrarían si sustituyeran los lubricantes convencionales biolubricantes en las tres plantas.

Planta	Lubricante requerido (±1) l	Emisiones CO <sub>2</sub> (t)								Ahorro
		Producción		Uso		Disposición		Total		
		BIO	LM	BIO	LM	BIO	LM	BIO	LM	
Angostura	19 400	11,30	16,62	8,38	9,90	-	3,19	19,68	29,71	10,03
Río Macho	17 888	10,01	15,33	7,73	9,12	-	0,90	17,74	25,35	7,61
Reventazón	15 006	9,00	12,86	6,48	7,65	-	0,00	15,48	20,51	5,03
<b>Total</b>	<b>52 294</b>	<b>30,31</b>	<b>44,81</b>	<b>22,59</b>	<b>26,67</b>	<b>-</b>	<b>4,09</b>	<b>52,9</b>	<b>75,57</b>	<b>22,67</b>

APÉNDICE 7.5. ESCENARIOS: LUBRICANTE RELLENADO EN UN AÑO.

Cuadro 7.5.1. Escenario A, lubricante de origen mineral.

Planta	Lubricante ( $\pm 1$ ) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)			
		Producción	Uso	Disposición	Total
Reventazón	15 006	12,86	7,65	0,00	20,51
Río Macho	18 238	15,63	9,30	0,90	25,83
Angostura	20 648	17,69	10,53	3,19	31,41
<b>Total</b>	<b>53 892</b>	<b>46,18</b>	<b>27,48</b>	<b>4,09</b>	<b>77,75</b>

Cuadro 7.5.2. Escenario A, biolubricante.

Planta	Lubricante ( $\pm 1$ ) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)			
		Producción	Uso	Disposición	Total
Reventazón	15 006	9,00	6,48	-	15,48
Río Macho	18 238	10,20	7,88	-	18,08
Angostura	20 648	12,17	8,92	-	21,09
<b>Total</b>	<b>53 892</b>	<b>31,37</b>	<b>23,28</b>	<b>-</b>	<b>54,65</b>

Cuadro 7.5.3. Escenario B, lubricante de origen mineral.

Planta	Lubricante ( $\pm 1$ ) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)			
		Producción	Uso	Disposición	Total
Reventazón	17 956	15,39	9,16	45,93	70,48
Río Macho	20 329	17,42	10,37	52,00	79,79
Angostura	22 865	19,59	11,66	58,49	89,74
<b>Total</b>	<b>61 150</b>	<b>52,40</b>	<b>31,19</b>	<b>156,42</b>	<b>240,01</b>

Cuadro 7.5.4. Escenario B, biolubricante.

Planta	Lubricante ( $\pm 1$ ) l	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (t)			
		Producción	Uso	Disposición	Total
Reventazón	17 956	11,31	7,76	-	19,07
Río Macho	20 329	12,81	8,78	-	21,59
Angostura	22 865	14,40	9,88	-	24,28
<b>Total</b>	<b>61 150</b>	<b>38,52</b>	<b>26,42</b>	<b>-</b>	<b>64,94</b>

## APÉNDICE 7.6. CUESTIONARIO: VALORACIÓN CONTINGENTE.

Cuestionario: Valoración sobre el uso de biolubricantes en las plantas hidroeléctricas de la Región Huetar

Actualmente, la mayoría de las plantas hidroeléctricas utilizan lubricantes de origen mineral para poner a funcionar las unidades generadoras y los componentes de la presa, este producto es derivado del petróleo, por lo que es considerado un producto peligroso, dado a que su producción, uso y disposición repercuten negativamente al ambiente y su impacto se ve reflejado en emisiones de CO<sub>2</sub> y por contaminación a fuentes de agua o tierra. Al ser un producto esencial pero riesgoso, se evaluando el cambiarlos por biolubricantes. Los biolubricantes son lubricantes elaborados a base de aceites vegetales, rápidamente biodegradables y no tóxicos para los seres humanos y otros organismos vivos, su biodegradabilidad es del 90-100% y son capaces de degradarse aproximadamente un 80% en 21 días, según la prueba de biodegradabilidad CEC L-33-T-82, mientras que los lubricantes de origen mineral, lo son un 20-40% (Ramírez, 2014).

La idea de sustituir los lubricantes, surge de una inquietud del ICE debido a la gran cantidad de lubricantes que utilizan en las plantas, tanto por las emisiones de CO<sub>2</sub> que se liberan de todo el ciclo de vida del producto, como la preocupación de que los lubricantes entren en contacto con el agua del embalse. Con la sustitución se pretende reducir la huella de carbono, al dejar de contribuir a las emisiones procedentes de productos derivados del petróleo y de paso, eliminar cualquier riesgo de contaminación al agua, en caso de que el producto entre en contacto directo.

Para valorar la sustitución, es importante realizar un análisis financiero costo-beneficio, por lo que pido responder las siguientes preguntas, con el fin de asignar un valor tangible (económico) a los beneficios ambientales:

1. ¿Está en disposición de comprar un producto amigable con el ambiente con el cual la huella de carbono (contemplando producción, uso y disposición del producto) disminuye 2,87 kg de CO<sub>2</sub> por litro de lubricante y además cumple con todos los requerimientos y necesidades de los equipos?
2. ¿Cuánto está dispuesto a pagar por un producto biodegradable, no tóxico, que va a contribuir a disminuir la huella de carbono de la empresa, aportando acciones para alcanzar la carbono neutralidad y elimina cualquier amenaza de riesgo si entra en contacto con el suelo o agua? Considere que los lubricantes de origen mineral, usados actualmente, rondan los ₡3 476 por litro.
  - ( ) ₡ 6 769 por litro
  - ( ) ₡ 7 500 por litro
  - ( ) ₡ 9 100 por litro
  - ( ) ₡ 19 000 por litro

3. ¿Considera que un producto biodegradable, como los biolubricantes, le va a dar una mejor imagen a la empresa, fortaleciendo la responsabilidad social y ambiental, siendo pionera al generar energía limpia con productos amigables con el ambiente que contribuyen en la disminución de la huella de carbono, dejando de contribuir a las emisiones generadas por la producción, uso y disposición, de productos derivados del petróleo?

Sí

No

4. Si su respuesta fue sí, en escala de 1 al 5, tomando 5 como muy importante ¿Cuánto considera que es importante para la empresa reflejar una imagen ambientalmente sostenible?

5 Muy importante

4 Importante

3 Indiferente

2 Poco importante

1 No es importante

#### Bibliografía

Ramírez Romero, J. (2014). Estudio experimental de las propiedades fisicoquímicas y tribológicas de un biolubricante formulado a partir de aceite de higuera. (Tesis de maestría, Universidad Veracruzana). Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41976/RamirezRomeroAlberto.pdf?sequence=1>

APÉNDICE 7.7. RESPUESTAS CUESTIONARIO VALORACIÓN CONTINGENTE.

Cuadro 7.7.1. Resumen de respuestas del cuestionario “Valoración contingente”.

	<b>Planta</b>	<b>Angostura</b>	<b>Río Macho</b>		<b>Reventazón</b>		<b>Ingenieros</b>		
	<b>Entrevistado</b>	Ronny	Pablo	Danilo	Santiago	Jefrey	Eduardo	José	Miguel
	2	₡7 500	₡6 769	₡6 769	₡6 769	₡6 769	₡7 500	₡ 6 769	₡6 769
<b>Pregunta</b>	3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	4	Muy importante	Muy importante	Muy importante	Muy importante	Muy importante	Importante	Importante	Muy importante

APÉNDICE 7.8. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO.

Documento de Excel adjunto.



## 8 ANEXOS

### ANEXO 8.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS TÍPICAS DE LOS ACEITES.

Cuadro A.8.1.1. Características físicas típicas de Shell Turbo Oil T46.

<b>Propiedades</b>	<b>Turbo T 46</b>
Viscosidad cinemática	
40 °C, cSt	46,0
100 °C, cSt	6,90
Índice de viscosidad	105
Color	L 0,5
Densidad (g/ml)	0,8681
Punto de congelación (°C)	<-27
Punto de inflamación COC (°C)	>220
Número ácido total TAN (mg KOH/g)	0,10
Liberación del aire (min)	4
Demulsibilidad Agua (min)	15
Demulsibilidad Vapor (seg)	153
Ensayo de resistencia a la corrosión	Pasa
Ensayo de estabilidad a la oxidación –TOST (hrs)	10,000+
Ensayo de estabilidad a la corrosión – RPVOT (min)	>950

Adaptado de Shell (2014).

Cuadro A.8.1.2. Características físicas típicas de Mobil DTE Excel 46.

<b>Propiedades</b>	<b>ISO VG 46</b>
Viscosidad cinemática	
40 °C, cSt	44,5
100 °C, cSt	6,9
Índice de viscosidad	98
Punto de fluidez °C	-15
Punto de inflamación °C	221
Densidad 15 °C (kg/l)	0,86
TOST, ASTM D943, Horas a 2 NN	3700
Agua destilada	Pasa
Agua de mar	Pasa
Separabilidad con el agua 54 °C	15
Punto de congelación °C	-33
Corrosión al cobre 130,3 hrs 121 °C	1B
Secuencia de espuma (ml/ml)	50/0

Adaptado y traducido de Mobil DTE Oil Medium (2019).

Cuadro A.8.1.3. Características físicas típicas de Equivis ISO VG 46.

<b>Propiedades</b>	<b>ISO VG 46</b>
Densidad 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	874
Viscosidad cinemática 40 °C, cSt	46,0
100 °C, cSt	8,4
Índice de viscosidad	161
Punto de inflamación °C	215
Punto de congelación °C	-39
FZG (A/80, 3/90)- Desgaste palier	11
Índice de filtrabilidad (IF)	1,02
Ciclos	5

Adaptado de Total (2016).

Cuadro A.8.1.4. Características físicas típicas de Shell Tellus S2 MX 46.

<b>Propiedades</b>	<b>ISO VG 46</b>
Viscosidad cinemática 40 °C, cSt	46
100 °C, cSt	6,9
Índice de viscosidad	105
Densidad a 15 °C (kg/l)	0,856
Punto de chispa °C (COC)	230
Punto de fluidez °C	-30
Color	L0,5
Separación de agua (minutos)	20
Vida de TOST (horas mínimo)	5 000

Tomado de Tellus S2 MX (2016).

ANEXO 8.2. CICLO DE VIDA: BIOLUBRICANTE Y LUBRICANTE MINERAL.

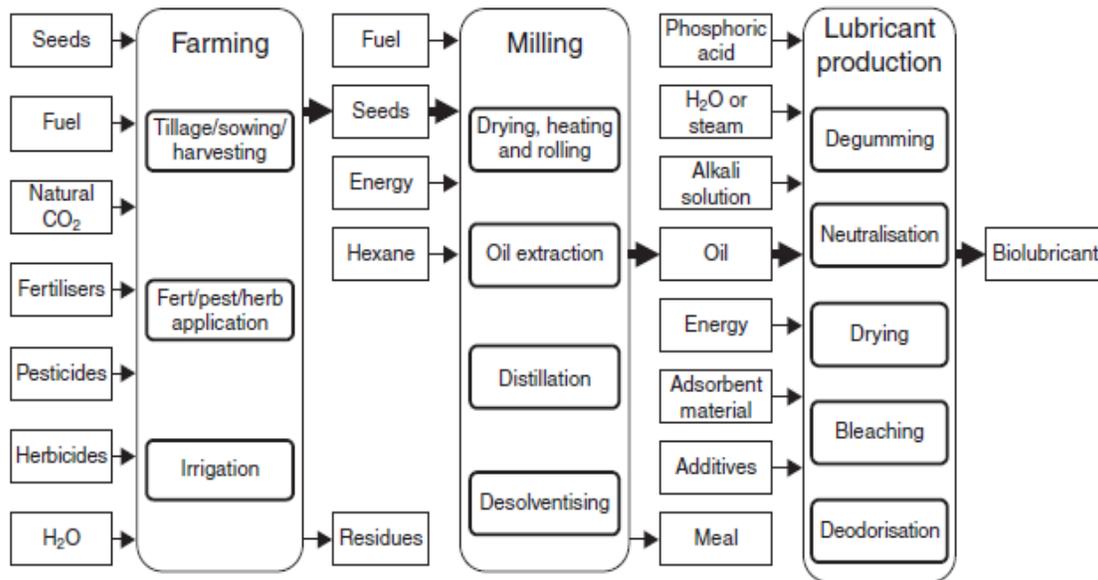


Figura A.8.1. Esquema del ciclo de vida de un biolubricante. Tomado de Bart et al., (2013)

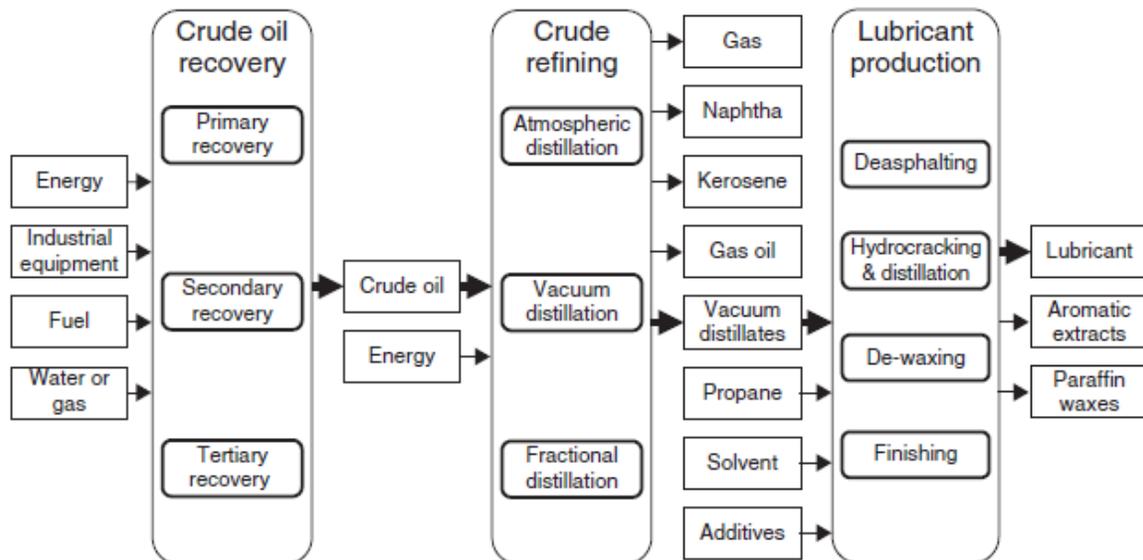


Figura A.8.2. Esquema del ciclo de vida de un lubricante de origen mineral. Tomado de Bart et al., (2013)

## ANEXO 8.3. COTIZACIONES BIOLUBRICANTES



Industrial Lithio Química S.A  
Cédula jurídica 3-101-248117  
De la rotonda de Hatillo 200 norte y 25 este bodega a mano izquierda  
Teléfonos: 2214-6323 / 2252-9050 / fax 2214-6282  
Correos: oc@lithiolubs.com & ventas@lithiolubs.com

### COTIZACION

FECHA: 26-02-2019  
COTIZACIÓN #: 260219-004  
VALIDO HASTA: 28-03-2019

### SS Soluciones

Atencion: Jaqueline Sánchez A.  
Correo: jackeviv21@gmail.com  
Telefono: 8750-34-90.

DESCRIPCIÓN	PRESENTACION	CANT	PRECIO	TOTAL
Lubriplate Biobased Green 46	Estañon de 55glns	1	€ 1,244,250.00	€ 1,244,250.00
				Subtotal
				Impuesto 13%
<b>TOTAL</b>				<b>€ 1,406,002.50</b>

#### TÉRMINOS Y CONDICIONES

1. Tiempo de entrega inmediato.
2. Producto puesto en sus instalaciones.
3. Crédito de 30 días.

#### CUENTAS BANCARIAS

**Banco Nacional de Costa Rica**  
✓ Cuenta Corriente: 100-01-147-000283-6  
✓ Cuenta Cliente: 15114710010002832  
**BAC San José**  
✓ Cuenta Corriente 904248846  
✓ Cuenta Cliente: 10200009042488466

**DAVID TORRES  
COTIZACIONES**

Si usted tiene alguna pregunta sobre esta cotización, por favor, póngase en contacto con nosotros  
*Gracias por hacer negocios con nosotros!*

Figura A.8.3.1. Cotización biolubricante Lubriplate Biobased Green 46. (D. Torres Chavarría, vía correo electrónico, 2019)



Industrial Lithio Química S.A  
Cédula jurídica 3-101-248117  
De la rotonda de Hatillo 200 norte y 25 este bodega a mano izquierda  
Teléfonos: 2214-6323 / 2252-9050 / fax 2214-6282  
Correos: oc@lithiolubs.com & ventas@lithiolubs.com

### COTIZACION

FECHA: 02-04-2019  
COTIZACIÓN #: 020419-006  
VALIDO HASTA: 02-05-2019

### SS Soluciones

Atencion: Jaqueline Sánchez A.  
Correo: jackeviv21@gmail.com  
Telefono: 8750-34-90.

DESCRIPCIÓN	PRESENTACION	CANT	PRECIO	TOTAL
Fuchs Plantohyd 40 N ISO 46	Estañon de 55glns	1	€ 1,248,000.00	€ 1,248,000.00
				Subtotal
				Impuesto 13%
<b>TOTAL</b>				<b>€ 1,410,240.00</b>

#### TÉRMINOS Y CONDICIONES

1. Tiempo de entrega de 45 días después de recibida la orden de compra.
2. Producto puesto en sus instalaciones.
3. Validez de la oferta 30 días.

#### CUENTAS BANCARIAS

**Banco Nacional de Costa Rica**  
✓ Cuenta Corriente: 100-01-147-000283-6  
✓ Cuenta Cliente: 15114710010002832  
**BAC San José**  
✓ Cuenta Corriente 904248846  
✓ Cuenta Cliente: 10200009042488466

**DAVID TORRES  
COTIZACIONES**

Si usted tiene alguna pregunta sobre esta cotización, por favor, póngase en contacto con nosotros  
*Gracias por hacer negocios con nosotros!*

Figura A.8.3.2. Cotización biolubricante Plantohyd 40 N ISO 46. (D. Torres Chavarría, vía correo electrónico, 2019)

## ANEXO 8.4. INFORMACIÓN BIOLUBRICANTE LUBRIPLATE BIOBASED GREEN HYDRAULIC FLUIDS ISO 46.

### 1. Información general

Adjunto al documento.

### 2. Hoja de seguridad del producto

Adjunto al documento.