



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS DE  
GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UN CONTEXTO REGIONAL MEDIANTE ANÁLISIS  
DE CICLO DE VIDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

FELIPE IGNACIO CORTINES GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:  
MANUEL DÍAZ ROMERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
GERARDO DÍAZ RODENAS  
SEBASTIÁN PÜSCHEL LØVENGREEN

SANTIAGO DE CHILE  
AÑO 2017

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UN CONTEXTO REGIONAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En el marco de la nueva política Energía 2050 se propuso como meta que las energías renovables deben representar el 60% de la matriz al año 2030 y al menos un 70% de la generación para el 2050. La región de Antofagasta posee uno de los mayores potenciales de energía solar en el mundo, esto ha permitido paulatinamente la entrada de generación fotovoltaica, y los escenarios prospectivos aquí presentados estiman que su presencia representará entre un 11,3% y un 19,6% del total de la matriz de generación eléctrica regional al 2030. Además, otras tecnologías como eólica, concentración solar y geotermia ingresarán a la región en diferentes magnitudes. Los gases de efecto invernadero han sido el principal foco de los estudios internacionales y nacionales en materia de impacto ambiental, sin embargo sorprende la ausencia de otras categorías de estudio en los planes futuros a nivel país. ¿No se estará acaso incurriendo en otros daños negativos al ecosistema al enfatizar únicamente en combatir el cambio climático?

Así, se traza como objetivo plantear una metodología basada en la herramienta de análisis de ciclo de vida para comparar impactos ambientales entre las diversas tecnologías de generación de energía eléctrica en un contexto regional, en particular a la II Región de Antofagasta. Para ello se analizarán impactos unitarios, del escenario actual y se compararán escenarios proyectados. Se obtiene que la mayoría de los impactos provienen de la generación térmica, siendo éstos principalmente locales, originados en su mayoría de la quema de combustibles fósiles para generar energía en la fase de operación. No obstante, el crecimiento de la producción energética fotovoltaica y eólica traerán consigo un aumento en ciertos impactos que previo al estudio no eran esperados. Por ejemplo, para la energía solar se observan impactos considerables en el uso de aguas, incluso mayores que la generación en base a carbón. Según los escenarios estudiados, la generación fotovoltaica representará entre un 28,46 y un 43,73% del impacto total. Por su parte, la toxicidad terrestre aumenta ostensiblemente con el aumento de la participación de generación eólica, y eso debe ser comprendido por los *stakeholders* involucrados, en particular si hay comunidades cercanas que podrían verse afectadas. También el uso de suelos es una categoría donde las energías renovables aumentan sus impactos progresivamente. La concentración solar y geotermia, también tendrán impactos unitarios importantes en la generación de smog fotoquímico, daño a la capa de ozono, eutrofización y acidificación, entre otros.

Se concluye que en la actualidad, el parque de generación eléctrica de Antofagasta está alejado de las metas impuestas por el país según la política Energía 2050. La alta dependencia en combustibles fósiles (95,6% del total) está generando importantes impactos medioambientales. El conocimiento de estos impactos debe estar disponible, y una perspectiva de análisis de ciclo de vida será útil para impedir el desplazamiento de problemas de un proceso a otro, o bien entre áreas geográficas.

“Los verbos vivir y soñar son rigurosamente sinónimos”- El Zahir, J.L.B.

A tu (en mi) (en nuestra) memoria Alicia.

# TABLA DE CONTENIDO

.....	I
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>III</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>V</b>
<b>INDICE DE GRÁFICOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN .....	3
1.2 OBJETIVOS .....	6
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	6
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	6
1.3 MARCO CONCEPTUAL .....	7
1.3.1 <i>Análisis de ciclo de vida (ACV)</i> .....	7
1.3.2 <i>Tecnologías de generación renovable</i> .....	13
1.3.3 <i>Tecnologías de generación convencionales</i> .....	17
<b>2 METODOLOGÍA</b> .....	<b>18</b>
2.1 DESARROLLO METODOLÓGICO .....	18
2.2 LIMITACIONES METODOLÓGICAS .....	22
2.2.1 <i>Limitaciones de las categorías de impacto</i> .....	23
<b>3 RESTRICCIONES Y LIMITACIONES</b> .....	<b>25</b>
<b>4 DESARROLLO Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS</b> .....	<b>27</b>
<b>5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA</b> .....	<b>32</b>
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
6.1 IMPACTOS AMBIENTALES UNITARIOS .....	35
6.1.1 <i>Comparación resultados internacionales</i> .....	38
6.2 IMPACTOS LOCALES .....	39
6.2.1 <i>Caracterización de hotspots</i> .....	39
6.2.2 <i>Impactos unitarios por hotspots</i> .....	41
6.3 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA REGIONAL .....	47
6.3.1 <i>Impactos escenario actual</i> .....	47
6.3.2 <i>Impactos escenarios predictivos</i> .....	50
6.3.3 <i>Discusión impactos escenario esperado</i> .....	56
<b>7 CONSOLIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA</b> .....	<b>62</b>
<b>8 CONCLUSIONES</b> .....	<b>65</b>
8.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO .....	65
8.2 RECOMENDACIONES .....	67
<b>9 GLOSARIO</b> .....	<b>70</b>
<b>10 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>71</b>
<b>11 ANEXOS Y APÉNDICES</b> .....	<b>74</b>
11.1 ANEXO 1: COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS (LCIA) .....	74
11.2 ANEXO 2: CATEGORÍAS DE IMPACTO .....	74
11.3 ANEXO 3: ALCANCES DE BD ECOINVENT 3 .....	79
11.4 ANEXO 4: GENERACIÓN BRUTA ANUAL ESCENARIO ACTUAL PARA ANTOFAGASTA .....	82
11.5 ANEXO 6: GRÁFICOS IMPACTOS UNITARIOS .....	83
11.6 ANEXO 7: TABLA IMPACTOS ANUALES 2016 .....	86

11.7	ANEXO 8: CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS .....	87
11.8	ANEXO 9: GRÁFICOS IMPACTOS GLOBALES COMPARACIÓN DE ESCENARIOS .....	92
11.9	ANEXO 10: GRÁFICOS IMPACTOS LOCALES .....	101
11.10	ANEXO 11: DESCRIPCIÓN PARTES INVOLUCRADAS MONTAJE ERNC, BIBLIOGRAFÍA DE HOTSPOTS.....	109
11.11	ANEXO 12: IMPACTOS ANUALES ESCENARIO ESPERADO .....	111

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1: CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL .....	12
TABLA 2: IMPACTOS UNITARIOS.....	83
TABLA 3: IMPACTOS ANUALES ESCENARIO ACTUAL .....	86
TABLA 4: IMPACTOS ANUALES ESCENARIO ESPERADO.....	113

## INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: ENERGÍA GENERADA ANUAL EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CORRESPONDIENTE A 14058 GWH.....	27
GRÁFICO 2: COMPOSICIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA POR TECNOLOGÍA PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	29
GRÁFICO 3: COMPARACIÓN DE ESCENARIOS MESA ERNC.....	29
GRÁFICO 4: PENETRACIÓN ERNC ESCENARIO PESIMISTA PARA ANTOFAGASTA, AÑOS 2020, 2025, 2030 Y 2037..	30
GRÁFICO 5: PENETRACIÓN ERNC ESCENARIO ESPERADO PARA ANTOFAGASTA, AÑOS 2020, 2025, 2030 Y 2037..	30
GRÁFICO 6: PENETRACIÓN ERNC ESCENARIO OPTIMISTA PARA ANTOFAGASTA, AÑOS 2020, 2025, 2030 Y 2037..	31
GRÁFICO 7: CONTRIBUCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A IMPACTOS TOTALES POR CATEGORÍA..	35
GRÁFICO 8: IMPACTOS UNITARIOS ACIDIFICACIÓN (IZQ.) Y EUTROFIZACIÓN (DER.).....	36
GRÁFICO 9: IMPACTOS UNITARIOS POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (IZQ.) Y ECOTOXICIDAD TERRESTRE (DER.).....	36
GRÁFICO 10: IMPACTOS UNITARIOS USO DE AGUA (IZQ.) Y USO DE SUELOS (DER.) .....	37
GRÁFICO 11: IMPACTOS LOCALES DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN EN ANTOFAGASTA DESGLOSADOS POR CATEGORÍAS .....	40
GRÁFICO 12: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL [KG CO <sub>2</sub> EQ/KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS.....	41
GRÁFICO 13: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL RENOVABLES [KG CO <sub>2</sub> EQ/KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS .....	41
GRÁFICO 14: ACIDIFICACIÓN RENOVABLES [KG SO <sub>2</sub> EQ. /KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS .....	42
GRÁFICO 15: EUTROFIZACIÓN RENOVABLES [KG FOSFATO EQ. /KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS.....	42
GRÁFICO 16: AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO RENOVABLES [KG R11-EQ. /KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS .....	43
GRÁFICO 17: SMOG FOTOQUÍMICO RENOVABLES [KG ETILENO-EQ. /KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS.....	43
GRÁFICO 18: CONSUMO DE AGUA [L/KWH] DESGLOSADO POR HOTSPOTS .....	44
GRÁFICO 19: HOTSPOTS GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	46
GRÁFICO 20: HOTSPOTS GENERACIÓN DE CONCENTRACIÓN SOLAR .....	46
GRÁFICO 21: HOTSPOTS GENERACIÓN EÓLICA .....	47
GRÁFICO 22: USO DE AGUAS ANUAL, 2016 ANTOFAGASTA .....	48
GRÁFICO 23: USO DE SUELOS ANUAL, 2016 ANTOFAGASTA.....	48
GRÁFICO 24: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DEBIDO A LA GENERACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES [KG CO <sub>2</sub> EQ/ AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	50
GRÁFICO 25: ACIDIFICACIÓN DEBIDO A LA PRODUCCIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES [KG SO <sub>2</sub> EQ. /AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	51
GRÁFICO 26: EUTROFIZACIÓN RENOVABLES [KG FOSFATO EQ. /AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	51
GRÁFICO 27: ECOTOXICIDAD HUMANA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. /AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	52
GRÁFICO 28: AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO [KG R11-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	52
GRÁFICO 29: SMOG FOTOQUÍMICO RENOVABLES [KG ETILENO-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	53
GRÁFICO 30: ECOTOXICIDAD TERRESTRE RENOVABLES [KG DCB-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	53
GRÁFICO 31: CONSUMO DE AGUA [L/AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	54
GRÁFICO 32: CONSUMO DE AGUA [L/AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA ESCENARIOS ESPERADO Y PESIMISTA .....	54
GRÁFICO 33: CONSUMO DE AGUA RENOVABLES [L/AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	55
GRÁFICO 34: USO DE SUELOS RENOVABLES [M <sup>2</sup> /AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	55
GRÁFICO 35: IMPACTOS ANUALES ACIDIFICACIÓN ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES(DER) .....	56
GRÁFICO 36: IMPACTOS ANUALES EUTROFIZACIÓN ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER).....	56
GRÁFICO 37: IMPACTOS ANUALES POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER).....	57
GRÁFICO 38: IMPACTOS ANUALES AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER).....	57

GRÁFICO 39: IMPACTOS ANUALES TOXICIDAD TERRESTRE ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER) .....	58
GRÁFICO 40: IMPACTOS ANUALES ESCENARIO ESPERADO USO DE AGUAS (IZQ.) Y USO DE SUELOS (DER.) .....	58
GRÁFICO 41: IMPACTOS UNITARIOS, AGOTAMIENTO ABIÓTICO (IZQ.) Y TOXICIDAD DE AGUA FRESCA (DER.) .....	83
GRÁFICO 42: IMPACTOS UNITARIOS, TOXICIDAD HUMANA (IZQ.) Y TOXICIDAD DE AGUA MARINA (DER.) .....	84
GRÁFICO 43: IMPACTOS UNITARIOS, AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO (IZQ.) Y SMOG FOTOQUÍMICO (DER.)....	84
GRÁFICO 44: IMPACTOS UNITARIOS, TOXICIDAD TERRESTRE .....	85
GRÁFICO 45: PROYECCIÓN ESCENARIO PESIMISTA.....	87
GRÁFICO 46: PROYECCIÓN ESCENARIO PESIMISTA, AÑO 2020 .....	87
GRÁFICO 47: PROYECCIÓN ESCENARIO PESIMISTA, AÑO 2020 .....	88
GRÁFICO 48: PROYECCIÓN ESCENARIO ESPERADO.....	88
GRÁFICO 49: PROYECCIÓN ESCENARIO ESPERADO 2020.....	89
GRÁFICO 50: PROYECCIÓN ESCENARIO ESPERADO 2030.....	89
GRÁFICO 51: PROYECCIÓN ESCENARIO OPTIMISTA.....	90
GRÁFICO 52: PROYECCIÓN ESCENARIO OPTIMISTA, AÑO 2020 .....	90
GRÁFICO 53: PROYECCIÓN ESCENARIO OPTIMISTA, AÑO 2030.....	91
GRÁFICO 54: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL [KG CO <sub>2</sub> EQ/ AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	92
GRÁFICO 55: AGOTAMIENTO ABIÓTICO [KG Sb EQ/ AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	93
GRÁFICO 56: AGOTAMIENTO ABIÓTICO RENOVABLES [KG Sb EQ/ AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	93
GRÁFICO 57: ACIDIFICACIÓN [KG SO <sub>2</sub> EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	94
GRÁFICO 58: EUTROFIZACIÓN [KG FOSFATO-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	94
GRÁFICO 59: ECOTOXICIDAD DE AGUA FRESCA [KG DCB-EQUIV. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	95
GRÁFICO 60: ECOTOXICIDAD DE AGUA FRESCA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	96
GRÁFICO 61: ECOTOXICIDAD HUMANA [KG DCB-EQUIV. / AÑO]IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	96
GRÁFICO 62: ECOTOXICIDAD DE AGUA MARINA [KG DCB-EQUIV. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	97
GRÁFICO 63: ECOTOXICIDAD DE AGUA MARINA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	98
GRÁFICO 64: SMOG FOTOQUÍMICO [KG ÉTILENO-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	98
GRÁFICO 65: ECOTOXICIDAD TERRESTRE [KG DCB-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS.....	99
GRÁFICO 66: AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO RENOVABLES [KG R11-EQ. / AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS .....	100
GRÁFICO 67: USO DE SUELOS [M <sup>2</sup> /AÑO] IMPACTOS GLOBALES, PARA DIVERSOS ESCENARIOS Y AÑOS. ....	100
GRÁFICO 68: AGOTAMIENTO ABIÓTICO [KG Sb EQ/KWH].....	101
GRÁFICO 69: AGOTAMIENTO ABIÓTICO RENOVABLES [KG Sb EQ/KWH].....	101
GRÁFICO 70: ACIDIFICACIÓN [KG SO <sub>2</sub> EQ. /KWH].....	102
GRÁFICO 71: EUTROFIZACIÓN [KG FOSFATO-EQ. /KWH].....	102
GRÁFICO 72: ECOTOXICIDAD DE AGUA FRESCA [KG DCB-EQUIV. /KWH] .....	103
GRÁFICO 73: ECOTOXICIDAD DE AGUA FRESCA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. /KWH] .....	103
GRÁFICO 74: ECOTOXICIDAD HUMANA [KG DCB-EQUIV. /KWH].....	104
GRÁFICO 75: ECOTOXICIDAD HUMANA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. /KWH].....	104
GRÁFICO 76: ECOTOXICIDAD DE AGUA MARINA [KG DCB-EQUIV. /KWH] .....	105
GRÁFICO 77: ECOTOXICIDAD DE AGUA MARINA RENOVABLES [KG DCB-EQUIV. /KWH].....	105
GRÁFICO 78: AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO [KG R11-EQ. /KWH] .....	106
GRÁFICO 79: SMOG FOTOQUÍMICO [KG ÉTILENO-EQ. /KWH] .....	106
GRÁFICO 80: ECOTOXICIDAD TERRESTRE [KG DCB-EQ. /KWH] .....	107
GRÁFICO 81: ECOTOXICIDAD TERRESTRE RENOVABLES [KG DCB-EQ. /KWH] .....	107

GRÁFICO 82: USO DE AGUA [L/KWH].....	108
GRÁFICO 83: IMPACTOS ANUALES AGOTAMIENTO ABIÓTICO ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER) .....	113
GRÁFICO 84: IMPACTOS ANUALES TOXICIDAD AGUA FRESCA ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER) .....	113
GRÁFICO 85: IMPACTOS ANUALES TOXICIDAD AGUA MARINA ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES (DER) .....	114
GRÁFICO 86: IMPACTOS ANUALES SMOG FOTOQUÍMICO ESCENARIO ESPERADO. TODAS LAS TECNOLOGÍAS (IZQ), SÓLO RENOVABLES(DER) .....	114

## INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: LÍMITES DEL SISTEMA.....	8
ILUSTRACIÓN 2: SISTEMA COMPRENDIDO COMO UNA SERIE DE SUBSISTEMAS, ASIGNACIÓN DE PORCENTAJES A CADA TIPO DE TECNOLOGÍA PRESENTE EN LA REGIÓN. TABLA Y DATOS ÚNICAMENTE REFERENCIALES.....	9
ILUSTRACIÓN 3: PARQUE EÓLICO VALLE DE LOS VIENTOS, REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	14
ILUSTRACIÓN 4: AUTO SOLAR EOLIAN, PRIMER AUTO SOLAR EN CHILE. EN LOS ALEROS, POSEE CELDAS MONOCRISTALINAS, MIENTRAS QUE EN LA CÚPULA USA CELDAS AÚN MÁS COSTOSAS DE TECNOLOGÍA ESPACIAL (GAAS).....	15
ILUSTRACIÓN 5: DE IZQUIERDA A DERECHA: CILINDRO PARABÓLICO, FRESNEL LINEAL, TORRE SOLAR Y DISCO STIRLING.....	16
ILUSTRACIÓN 6: TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA.....	17
ILUSTRACIÓN 7: CENTRAL TERMOELÉCTRICA MEJILLONES.....	18
ILUSTRACIÓN 8: METODOLOGÍA.....	19
ILUSTRACIÓN 9: MODELO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE ANTOFAGASTA.....	34
ILUSTRACIÓN 10: CONSUMO DE AGUA PROMEDIO POR UNIDAD DE ELECTRICIDAD Y CALOR PRODUCIDO PARA EL PERÍODO ENTRE 2008-2012 MUNDIALMENTE.....	45
ILUSTRACIÓN 11: MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS (LCIA) COMPARADOS.....	74
ILUSTRACIÓN 12: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.....	75
ILUSTRACIÓN 13: POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN.....	76
ILUSTRACIÓN 14: PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DE SUELOS Y AGUAS.....	77
ILUSTRACIÓN 15: GENERACIÓN DE SMOG FOTOQUÍMICO.....	77
ILUSTRACIÓN 16: DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO.....	78

## 1 INTRODUCCIÓN

La 21<sup>o</sup> Conferencia de las partes de la convención del cambio climático (COP21), que tuvo lugar en París en diciembre del 2015 marcó un hito para el mundo. Al alcanzarse este acuerdo, se estima que habrá un “antes y un después de París” para el mundo, y en especial para los países en desarrollo, los que tendrán que sumarse activamente a la reducción de emisiones para bajar a los niveles que aconseja la comunidad científica. Chile ya ha iniciado ese camino al anunciar su contribución nacional al nuevo tratado de cambio climático. El tercer pilar de la política chilena Energía 2050 [30] hace referencia a que la generación energética nacional debe ser compatible con el medio ambiente. Para ello se propone abordar paralelamente dos desafíos: impulsar una matriz energética renovable y el desarrollo de lineamientos para abordar los impactos medioambientales, locales y globales.

El primer desafío propone tomar medidas para que las energías renovables constituyan el 60% de la matriz al año 2030 y al menos un 70% de la generación para el 2050. Estas metas han sido trazadas en el marco del consenso científico y la conciencia internacional creciente respecto al fenómeno del cambio climático. Así, se insta a aprovechar los recursos renovables presentes en el país, como la generación hidroeléctrica, eólica y principalmente la radiación solar, que es privilegiada particularmente en el norte del país. Sin embargo, el potencial de cambio climático es sólo una categoría de impacto de muchas otras que pueden incidir en el medioambiente y en la sociedad. La presente investigación propone un estudio acabado de todos los impactos que puede ocasionar la generación eléctrica en su ciclo de vida en un contexto regional, a modo de aportar con nuevas variables a la toma de decisiones de cómo debiese expandirse la matriz energética de forma sustentable.

La herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) es cada vez más utilizada a nivel nacional e internacional y ha demostrado su utilidad en todos los campos de producción [2]. Su uso en análisis de proyectos de generación eléctrica no es nuevo, sin embargo hasta el día de hoy no existe una metodología que considere esta herramienta en la medición de los impactos ambientales a nivel regional.

Chiao H.Liu et al. destacan la prominencia del método de análisis de ciclo de vida y lo caracterizan desde un punto de integración con análisis I-O (input-output) para caracterizar el sector eléctrico en Taiwan [1]. De esa forma se pueden ver los impactos ambientales no sólo directos sino que también los indirectos de otras industrias relacionadas por la economía (lo que supondría un marco teórico interesante si se quiere revisar el impacto del intensivo uso energético del sector minero del país). Por su parte, Asdrubali et al. dan cuenta de la aún mayoritaria presencia de los combustibles fósiles en las matrices energéticas mundiales, con cerca de un 81,9% de presencia, y realzan la importancia de la generación de nuevos indicadores que permitan orientar los nuevos proyectos de generación a energías renovables [3]. Daniel Weisser, por su parte, propone una guía de análisis de ciclo de vida para la generación eléctrica, basándose en el impacto que tiene la generación de gases de efecto invernadero [6], encontrando que la falta de

análisis de ciclo de vida y el uso de técnicas menos eficientes ha generado diferencias significativas en los resultados del análisis de impactos ambientales, especialmente en etapas de instalación y abandono de proyectos, lo que genera confusión entre los responsables políticos y en estudiantes respecto a la efectividad y la precisión de estos estudios.

La metodología de ACV permite la evaluación de impactos ambientales en productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida [3]. Es un proceso evolutivo que gana en detalles y complejidad a medida que aumentan los casos de estudio, por lo que cada nuevo de éstos debe hacerse con más precisión que el anterior [6].

Antofagasta es calificada como la región más importante en cuanto a producción industrial en el país, según informes de la ODEPA<sup>1</sup>, principalmente por la presencia de la gran minería del cobre; ésta es muy intensiva en demanda energética. Además, proyectos de generación eléctrica mediante ERNC están apareciendo en la región principalmente por sus beneficiosas características climáticas que la dotan de potencial energético renovable (solar, eólica, geotermia). Sin embargo, no existe un análisis del impacto ambiental que está provocando la generación energética en la región. Se hace necesario un diagnóstico de los impactos provocados por estos proyectos. En particular, ésta investigación no considerará los impactos ambientales generados por la transmisión y la distribución de energía, por lo que los resultados obtenidos se remitirán a un análisis “desde la cuna a la puerta” [7] de la generación eléctrica.

De datos extraídos del CDEC-SING se identifica que el parque energético, en Mwh producidos, actual de la región de Antofagasta está compuesto en un 95,6% de energías no renovables convencionales (Carbón, GNL, Diesel), dejando apenas un 4,4% de penetración de ERNC proveniente en su mayoría de tecnologías de generación fotovoltaicas [14] [15]. Por tanto, los grandes cambios en generación se evidenciarán recién pasado el 2020, lo que hace interesante una evaluación de escenarios futuros de generación y sus consiguientes impactos ambientales.

La Mesa ERNC impulsada por el Ministerio de Energía fue ejecutado por la Universidad de Chile como secretaría técnica y apoyada por el Programa de Energías de GIZ que se financia con fondos del Ministerio de Medioambiente de Alemania (BMUB) en el marco de la Iniciativa Internacional para la Protección al Clima (IKI). Su objetivo fue analizar las implicancias operacionales y económicas producto de la participación de energías renovables no convencionales sobre los sistemas eléctricos, con el fin de generar evidencia para la definición de la política energética nacional<sup>2</sup>.

El presente informe utilizará escenarios de expansión propuestos por la Mesa ERNC y los contrastará con la situación actual y entre ellos, permitiendo identificar posibles

---

<sup>1</sup> [http://www.odepa.cl/wp-content/files\\_mf/1426532105Antofagastamarzo.pdf](http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1426532105Antofagastamarzo.pdf) - Aporte al PIB nacional de Antofagasta

<sup>2</sup> <http://www.4echile.cl/mesa-ernc> - Mesa ERNC

impactos ambientales no dimensionados antes de la expansión del parque energético de la región de Antofagasta.

La investigación aquí detallada es una propuesta de una metodología de análisis de ciclo de vida en un contexto regional, en particular Antofagasta, sobre la generación de energía eléctrica, desde la construcción de los proyectos de diversas tecnologías, pasando por su operación, hasta la entrega de la energía generada al sistema de transmisión. Para ello, y basándose en bibliografía de ACV pertinente se seguirán los pasos formales del uso de esta herramienta: definir objetivos y alcances, inventario del ciclo de vida, análisis como tal y su consiguiente interpretación.

## **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN**

Si bien las energías renovables no utilizan combustibles fósiles en su generación esto no es suficiente argumento como para aseverar que son tecnologías que no impactan el medioambiente. Si la matriz de generación energética es optimizada basándose únicamente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, nuevos impactos podrían ser introducidos en la región estudiada a partir de otras emisiones (por ejemplo NOx y SO<sub>2</sub>). Así, se vuelve imperante una nueva perspectiva respecto a los impactos ambientales que puede ocasionar la generación eléctrica, de modo de tener claridad de los impactos transversales de estas tecnologías y entregar elementos de análisis que puedan servir para balancear la penetración de cada tecnología ERNC.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta de toma de decisiones muy útil a la hora de seleccionar entre diferentes alternativas que proveen de un mismo producto, en este caso la energía [4]. A diferencia de otras opciones de análisis de impacto ambiental, permite identificar impactos con la conciencia de que los procesos no están aislados unos de otros; la detección de hotspots o procesos intensivos en impactos permite evitar el paso de daños de una sección a otra en el ciclo de vida del servicio. Además, permite tomar decisiones a largo plazo considerando no algunos sino que todos los impactos ambientales incluidos en el proceso estudiado. Sus complejidades vienen dadas debido a la disponibilidad de bases de datos e inventarios intensivos en información, que de no existir pueden exigir una gran cantidad de tiempo en la elaboración del ACV.

La propuesta de esta investigación consiste en generar una metodología de identificación de impactos ambientales mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida en un contexto regional, siendo Antofagasta identificada como el caso de estudio, para luego ,de demostrarse su efectividad, ser replicada a otras regiones a nivel nacional e internacional. El presente estudio toma la herramienta de ACV y la adapta a las condiciones regionales (generación local), y a través de escenarios predictivos permitirá estimar la magnitud de los impactos futuros. Su comparación y análisis permitirá a los gestores de políticas públicas tomar decisiones conscientes respecto a la expansión de la

matriz de generación eléctrica, pensando no sólo en la variable de cambio climático exigida por la nueva política energética del país sino que en nuevos impactos que deben ser valorados y comprendidos como tales.

A diferencia de la metodología tradicional de un ACV, dónde uno de los objetivos es identificar hotspots, o bien puntos de actividad significativa o crítica dentro de los procesos identificables en el ciclo de vida de un proyecto (Extracción de materias primas, Producción, Operación, Mantenimiento, entre otros), este proyecto apunta a generar comparaciones entre las diversas tecnologías de generación existentes en la región desde sus impactos generales desde la “cuna a la puerta”, permitiendo diagnosticar la conveniencia de una distribución determinada de la matriz energética por sobre otra. Además, se concentrará en hacer análisis prospectivos de los impactos futuros, siendo un insumo importante para la toma de decisiones respecto al cómo debiese evolucionar la matriz de generación de forma de disminuir los impactos ambientales.

El Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es uno de los principales instrumentos para prevenir el deterioro ambiental. Este instrumento permite introducir la dimensión ambiental en el diseño y la ejecución de los proyectos y actividades que se realizan en el país; a través de él se evalúa y certifica que las iniciativas, tanto del sector público como del sector privado, se encuentran en condiciones de cumplir los requisitos ambientales que les son aplicables<sup>3</sup>.

Existen varias dimensiones de impacto ambiental que se están pasando por alto a la hora de construir, operar y desmantelar proyectos de generación eléctrica que ganarán en información, detalles y propuestas con este estudio como por ejemplo: potencial de acidificación, eutrofización, potencial de calentamiento global, uso de aguas, uso de suelos, generación de ozono fotoquímico, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua fresca, impacto en la salud humana, agotamiento abiótico, entre otros [3] [4].

Antofagasta forma parte del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), que abastece la zona norte del país, desde Arica y Parinacota por el norte hasta la localidad de Coloso en el límite sur de Antofagasta, con una distancia aproximada de 800 km. Este sistema representa aproximadamente el 27% de la capacidad instalada total en el país, atendiendo el 7,5% de la población nacional. Su generación es principalmente a base de tecnologías térmicas. El paisaje de la segunda región es árido, con escasez hidrográfica, poca vegetación y un relieve similar al resto del país.

Es sabido que en el Norte Grande de Chile, existe uno de los mayores potenciales de energía solar en el mundo, superando con creces los índices de ciudades en las que la penetración de este tipo de tecnologías es mucho mayor. Esto ha permitido paulatinamente la entrada de generación fotovoltaica, y los escenarios prospectivos estiman que su presencia representará entre un 11,3% y un 19,6% del total de la matriz de

---

<sup>3</sup> <http://sea.gob.cl/sea/que-es-seia> - Servicio de Evaluación Ambiental

generación eléctrica regional al 2030. Además, otras tecnologías como eólica, concentración solar y geotermia ingresarán a la región en diferentes magnitudes. Se vislumbran entonces avances para las metas establecidas en Energía 2050, sin embargo sorprende la ausencia del resto de categorías de impacto en los planes a futuro a nivel país. ¿No se estará acaso incurriendo en otros daños negativos al ecosistema al enfatizar únicamente en combatir el cambio climático? Sin obviar la tarea llevada a cabo por el SEIA el presente estudio tiene la finalidad de comparar las diversas formas de generación eléctrica aportando con más variables ambientales a la toma de decisiones.

Para ello se utilizará la herramienta computacional GaBi que permitirá modelar la situación actual de la matriz energética de la región, evidenciando los impactos ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida. Además, se generarán modelos contrastables con la situación actual que permitan hacer propuestas de mejora y mitigación de impactos de aquí al 2037, año límite de los estudios prospectivos de la Mesa ERNC.

El tema es atingente a diversos actores:

- **Generadores de políticas:** Ya se ha nombrado al Estado como un ente importante en potenciar proyectos que evalúen proyectos desde aristas distintas a la netamente económica. Así, el ministerio de energía y el ministerio del medioambiente verá en este estudio un análisis detallado de los impactos ambientales que generan los sistemas de generación eléctrica presentes en la región, y se detallarán también los provenientes de futuras tecnologías entrantes: geotermia y concentración solar [3].
- **Generadores de energía:** También las empresas encargadas y/o interesadas en implementar proyectos de generación eléctrica se interesarán en la investigación, ya que esta entregará información fidedigna y atingente a los proyectos que ellos impulsan. Por el lado de los generadores de ERNC, es un buen insumo para comprender que aún pese a ser productores de energía más limpia en comparación a los tradicionales hay muchos daños que pueden estar incurriendo al medioambiente y que deberían amortiguarse. La generación de energía en base a carbón y gases tendrá la dura tarea de disminuir sus impactos que son mayores, y el estudio les permitirá identificar donde se están generando los mayores impactos, una disminución de éstos podría permitirles mantenerse en funcionamiento en la medida que sean mejor vistos por autoridades y la comunidad.
- **Stakeholders regionales:** La municipalidad de Antofagasta, empresas locales y organismos públicos encontrarán en esta investigación información de utilidad para comprender que impactos ambientales generan los procesos que se llevan a cabo y como en la región. Otros actores como ONG asociadas a temáticas ambientales y la Sociedad Civil misma pueden nutrirse de la información aquí presentada.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Plantear una metodología basada en análisis de ciclo de vida para comparar impactos ambientales entre las diversas tecnologías de generación de energía eléctrica en un contexto regional, en particular a la II Región de Antofagasta.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Generar un diagnóstico del parque de generación eléctrico actual en la región, mediante la comparación de las diversas tecnologías implementadas en ésta.
2. Definir objetivos y alcances del análisis de ciclo de vida que permitan generar un inventario del ACV de las tecnologías de generación eléctrica en la región.
3. Estimar y comparar impactos ambientales de escenarios diversos, en base a proyecciones y modelaciones, de la matriz energética regional al 2037.
4. Elaborar una propuesta de metodología de análisis de ciclo de vida de la generación eléctrica replicable en un contexto regional.

## **1.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **1.3.1 Análisis de ciclo de vida (ACV)**

El correcto empleo de la herramienta de análisis de ciclo de vida está normado por las ISO14040 e ISO14044 [7] [8]. A partir de las certificaciones internacionales citadas, se presenta a continuación una explicación detallada de la metodología de análisis de ciclo de vida. De la versión 2006 de la ISO14040 se puede obtener la siguiente definición de ACV:

“ACV da cuenta de los aspectos ambientales y los potenciales impactos en éstos a través del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de las materias primas, a través de la producción y uso, fin del tratamiento, reciclaje y deposición final (i.e. de la cuna a la tumba).”

Así, la herramienta de ACV posee 4 fases de estudio, que están determinadas en la ISO14044, ésta normativa internacional es utilizada como referencia para las secciones contenidas en la presente sección de la investigación [8].

#### **1.3.1.1 Objetivos y alcances**

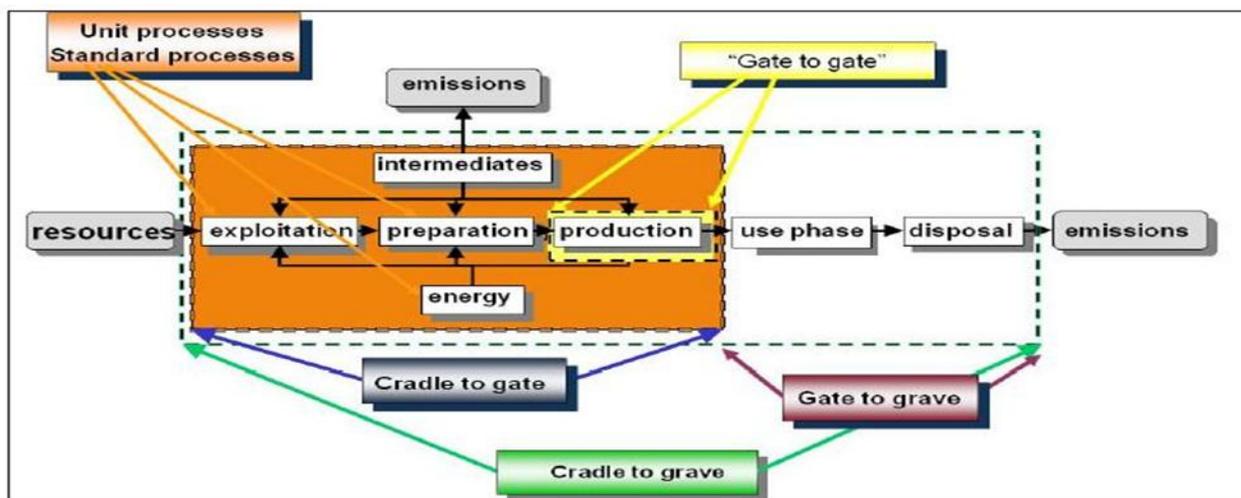
En el objetivo se establece el tema de estudio, los motivos que llevan a realizarlo, el público objetivo del estudio y si los resultados serán utilizados con fines comparativos para ser luego revelados al público. Por otro lado, el alcance especifica todos los detalles de la metodología, como el sistema del producto, la unidad funcional y los límites del sistema. La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado, proporcionando una referencia respecto a la cual las entradas y salidas del sistema pueden ser normalizadas en un sentido matemático. El flujo de referencia, relacionado a la unidad funcional, es la cantidad de producto en el que se basan los resultados del estudio. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV.

También se debe aclarar en esta etapa cuál es el procedimiento de asignación de cargas ambientales y las categorías de impactos ambientales que se considerarán, junto con la forma de interpretación que se les dará.

Se debe también definir una unidad funcional. Ésta permitirá medir y contrastar los resultados, ya sea entre las distintas aplicaciones del ACV a realizarse, entre los distintos modelos que serán propuestos, o bien con los impactos de otras industrias.

Al definir los límites del sistema a evaluar se pueden escoger cuatro opciones de estudio:

- *Cradle-to-grave*: Incluye la cadena de producción de energía y materiales y todos los procesos desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, transporte y uso hasta llegar a la deposición final y el fin del ciclo de vida del producto.
- *Cradle-to-gate*: Incluye todos los procesos desde la extracción de la materia prima, pasando por su producción hasta llegar al producto terminado y listo para su uso. Este enfoque permite determinar los impactos ambientales de la producción del producto estudiado.
- *Gate-to-grave*: Incluye los procesos de uso y deposición final, i.e. fin del ciclo de vida del producto (todo lo que ocurre post-producción). Permite medir los impactos ambientales de un producto posterior a su producción.
- *Gate-to-gate*: Incluye los procesos de la fase de producción, permite determinar los impactos ambientales de un paso del ciclo de vida de un producto.



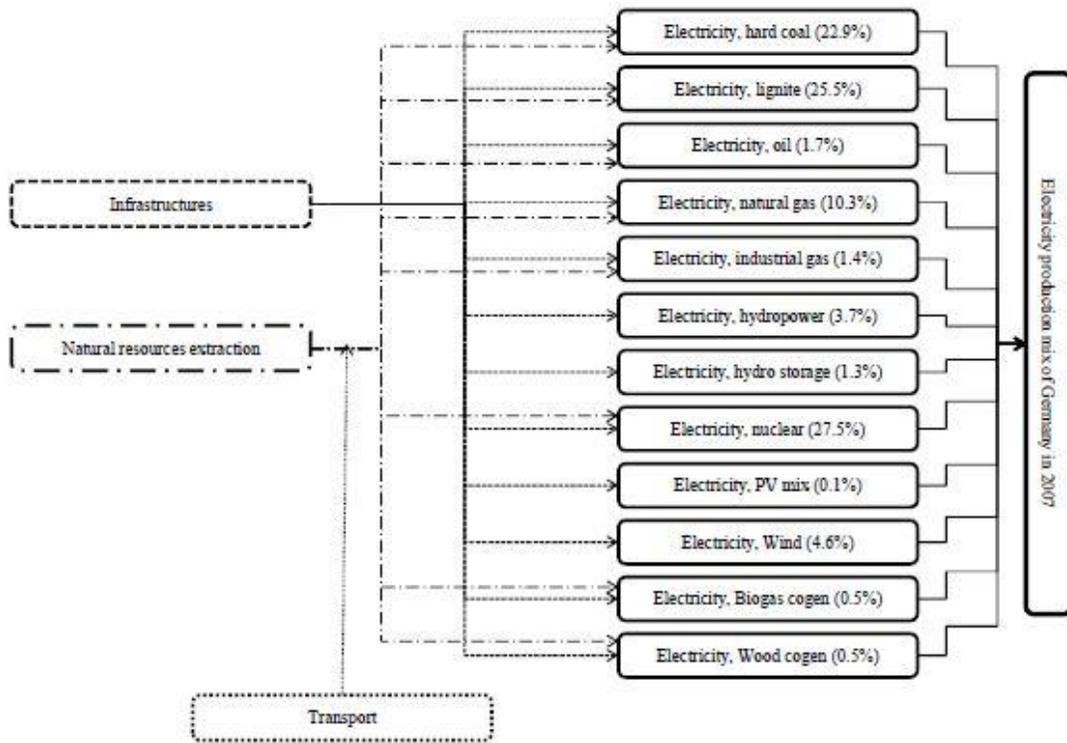
*Ilustración 1: Límites del sistema.*

*Fuente: [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial*

### 1.3.1.2 Inventario del ciclo de vida

El segundo paso es recolectar y cuantificar las entradas y salidas de materia y energía correspondientes al sistema durante su ciclo de vida. Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todas las cargas ambientales asociadas a la unidad funcional.

El inventario del ciclo de vida es un proceso iterativo, ya que a medida que se obtienen datos y se aprende más del sistema, van apareciendo nuevos requerimientos o limitaciones que demandan un cambio en los procedimientos de manera que el objetivo aún se pueda lograr. Es apropiado ver el sistema como una serie de subsistemas.



**Ilustración 2:** Sistema comprendido como una serie de subsistemas, asignación de porcentajes a cada tipo de tecnología presente en la región. Tabla y datos únicamente referenciales.

**Fuente:** [10] Blanc et al.

Modelar la producción de electricidad con una perspectiva de análisis de ciclo de vida requiere, a lo menos, un registro de la proporción de energía generada por cada tecnología, su infraestructura, su producción energética, tiempo de vida, distancia de transporte de los recursos naturales y la extracción de recursos.

### 1.3.1.3 Análisis del impacto del ciclo de vida

La estructura de esta fase distingue entre elementos obligatorios y elementos opcionales.

Los elementos considerados obligatorios son:

- i. Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
- ii. Clasificación: en esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
- iii. Caracterización: consiste en la modelación, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto.

Los elementos opcionales son la normalización de los indicadores de categoría, su agrupación y la ponderación de los mismos.

### **Modelación de punto final v/s modelación de puntos medios**

Categorías de impacto como acidificación, eutrofización, potencial de calentamiento global, uso de tierras, toxicidad de aguas y otros, son consideradas categorías de impacto medio en una cadena de causa-efecto de los impactos ambientales. Un análisis de puntos medios, si bien es exhaustivo en información respecto a las cantidades de químicos o flujos energéticos generados a lo largo de todo el ciclo de vida, es menos informativa para el lector final. Por otro lado, una modelación de punto final agrupa las categorías de punto medio en 3 grandes *clusters*: salud humana, calidad del ecosistema y cambio climático. Ésta modelación es preferible ya que también permite diferenciar entre impactos locales y globales y el aporte de la región a ambos.

### **Métodos de Análisis de Impacto**

En la literatura existen diversos métodos de análisis de impacto del ciclo de vida (*LCIA methods*) a continuación se repasan los principales, haciendo énfasis en los que serán utilizados para medir los impactos ambientales de la generación eléctrica en un contexto regional. Las diferencias entre métodos vendrán dadas por las categorías de impacto escogidas, si tienen una entrega de información en *midpoints* o *endpoints*, entre otros.

Se adjunta una tabla resumen del detalle en la sección Anexos: 1

CML2001: Método de análisis de impactos que restringe la modelación cuantitativa a fases primarias en la cadena de causa-efecto para limitar las incertezas. Los resultados son agrupados en categorías medias. Creado por la Universidad de Leiden.

EDIP2003: Acercamiento de puntos medios que cubre casi todos los impactos relacionados a emisiones, uso de recursos e impactos en el medioambiente. La normalización es basada en equivalencias a personas impactadas, donde el peso asignado a cada categoría es dado por metas de mitigación políticas y horizontes de provisión de recursos de una manera sustentable.

Eco-Indicator 99: Método tipo *endpoint*. Es uno de los más usados en la literatura, generalmente a la par del CML2001 (ambos son de la Universidad de Leiden). Reconoce tres tipos de daños finales: salud humana, ecosistemas y recursos. Distingue perspectivas culturales o arquetipos: jerárquico, individualista e igualitario. Contiene diferentes normalizaciones y factores de peso dadas las varias perspectivas disponibles.

De una comparación entre estos métodos se puede aseverar lo siguiente:

- CML2001 y EDIP2003 son métodos orientados a daños intermedios, Ecoindicator99 es orientado a daños finales.
- CML2001 y EDIP2003 entregan información muy similar al estudiar el potencial de calentamiento global, ozono fotoquímico, eutrofización, agujero de la capa de ozono y acidificación. Para categorías relacionadas a toxicidad, tanto los resultados de los indicadores como la jerarquización de los principales contribuidores varía. Post normalización, las diferencias en efectos disminuyen, pero persisten.

Para el trabajo de memoria en cuestión, se propone el uso de los métodos CML2001 y Ecoindicator99, dado que el primero es detallado en información específica y el segundo sería apropiado para entregar la información al lector final. Se propone también avanzar en la confección de indicadores locales.

### **Categorías de Impacto Ambiental**

A continuación se presentan las categorías de impacto ambiental evaluadas en la presente investigación y sus correspondientes factores de equivalencia, que permiten normalizar los diversos impactos en una unidad de medición única. Descripciones detalladas de las categorías de impacto ambiental pueden encontrarse en la sección de Anexos: Anexo 2.

Categoría de impacto	Unidad de medida
Agotamiento abiótico	kg Sb-Equiv.
Potencial de acidificación	kg SO <sub>2</sub> -Equiv.
Eutrofización	kg Fosfato-Equiv.
Ecotoxicidad de agua fresca	kg DCB-Equiv.
Potencial de calentamiento global (a 100 años)	kg CO <sub>2</sub> -Equiv.
Ecotoxicidad humana	kg DCB-Equiv.
Ecotoxicidad de agua marina	kg DCB-Equiv.
Agotamiento de la capa de ozono	kg R11-Equiv.
Smog fotoquímico	kg Etileno-Equiv.
Ecotoxicidad terrestre	kg DCB-Equiv.
Consumo de agua	Litros
Uso de suelos	M <sup>2</sup> / ha

**Tabla 1:** Categorías de impacto ambiental.

**Fuente:** Confección propia en base a [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

## ACV consecuencial

Finnvenden et al. [27] caracteriza los ACV atribucionales, los más usados internacionalmente, por su “foco en describir los flujos físicos relevantes para el medioambiente desde y hacia un ciclo de vida y sus subsistemas”. Por su parte, al describir un ACV consecuencial asevera que “se define por sus metas para describir como flujos medioambientales relevantes cambiarán en respuesta a posibles decisiones”. De las descripciones del autor, se hace notoria la diferencia entre ambas perspectivas, caracterizadas por su temporalidad y por la perspectiva a largo plazo de los ACV consecuenciales. La investigación aquí llevada es de carácter consecuencial, al utilizar modelos de predicción a futuro para elucubrar respecto a cómo se modificarán los impactos regionales.

## **Hotspots**

Corresponden a los procesos o puntos críticos en donde pueden verse acumulados los mayores impactos ambientales del sistema de impacto estudiado para sus diversas categorías de impacto. En particular, este estudio no llevará a cabo un análisis de inventario (LCIA) tradicional, y por tanto los *hotspots* serán modelados mediante una revisión bibliográfica consistente a los alcances, unidad funcional y objetivos de la investigación.

### **1.3.1.4 Interpretación del ciclo de vida**

En esta fase se consideran en forma conjunta los hallazgos del inventario y el análisis del ciclo de vida. Los resultados que se obtengan deben ser consistentes con el objetivo y alcances definidos, llegando a conclusiones, explicando limitaciones y la entrega de recomendaciones.

### **1.3.2 Tecnologías de generación renovable**

A continuación se presenta una breve explicación de las energías renovables presentes en Antofagasta de aquí al 2037:

Las energías renovables pueden ser definidas como “flujos de energía que son regenerados a la misma tasa a la cual son usados” [31]. La principal de estas fuentes de energía es la radiación solar, ya que el Sol da origen de forma directa o indirecta a la gran mayoría de las energías renovables. La energía fotovoltaica y de concentración solar son inmediatos a la hora de pensar en aprovechar la energía del sol. No obstante, éste es también responsable de calentar las masas de aire, provocando en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica.

No obstante, no todas las tecnologías renovables dependen del Sol, así en Antofagasta también se puede encontrar potencial de geotermia, para ella el calor del centro de la Tierra es una fuente de energía.

#### **1.3.2.1 Generación eólica**

A grandes rasgos, se aprovecha la energía del viento para hacer girar una turbina, la cual está acoplada a un generador eléctrico. Existen diversas turbinas con diseños y tamaños adecuados para diferentes perfiles de viento, ejemplos de esto son los

aerogeneradores con velocidad fija, velocidad variable, modelos bi-pala, tri-pala, entre otros.

Una planta de generación eólica se compone de un conjunto de turbinas o generadores eólicos debidamente controlados, con el fin de obtener un efecto aditivo sobre las potencias que genera cada turbina individualmente. En este aspecto el sistema de control posee una componente de control individual para cada turbina y una componente de control supervisor del parque eólico en su conjunto, encargada de dar curso de acción sobre los controles individuales y coordinar. Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las aspas del rotor de los aerogeneradores. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire y de la velocidad del viento, ambos factores se encuentran fuertemente condicionados por el emplazamiento elegido para el parque eólico, en lo que se refiere a la altura y rugosidad del terreno, temperaturas y humedad registradas y presencia de obstáculos o efectos aceleradores propios de la geografía.

Una condicionante importante de la energía eólica es su variabilidad. La producción de potencia a partir del recurso eólico se encuentra condicionado por la variabilidad de la velocidad del viento.



**Ilustración 3:** Parque eólico Valle de los vientos, región de Antofagasta.

**Fuente:** El Dínamo

### **1.3.2.2 Generación fotovoltaica**

La generación fotovoltaica es considerada como el sistema ideal de conversión energética desde el punto de vista de los recursos, ya que a través de las celdas fotovoltaicas se aprovecha la fuente de energía más abundante de las disponibles en el planeta- la Tierra recibe del Sol más de 10000 veces la cantidad de energía proveniente de combustibles fósiles y nuclear usada por los humanos [31] Vargas et al. Por otro lado, las celdas FV (fotovoltaicas) en sus formas más comunes son hechas de silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre. Y por último, su producto es electricidad, una forma de energía muy usada hoy en día.

La eficiencia de una celda solar está definida como el cociente entre la energía eléctrica convertida y la energía que cae sobre su superficie. Una celda FV convencional produce cerca de 1,5 watts, de modo que para obtener mayores potencias, grupos de celdas son conectadas entre sí formando un módulo. Para obtener aún más energía, los módulos son montados uno al lado del otro y conectados para formar un arreglo que puede abastecer prácticamente a cualquier tamaño de consumo.

Los elementos más importantes de un sistema FV son: paneles, baterías, transformadores, inversores, elementos de control (como controladores de carga), sistemas de seguimiento, MPPT (en inglés *Maximum Power Point Tracker*), elementos de seguridad como diodos *by-pass* y diodos de bloqueo y por supuesto el cableado eléctrico. Los paneles convierten la energía solar en corriente continua. La energía es almacenada en baterías (al conjunto de éstas se le suele llamar banco). Para que éstas se usen de forma apropiada se emplea un controlador de carga, el cual evita las sobrecargas (las desconecta cuando están llenas), las descargas excesivas, las protege de sobretensiones y también puede coordinar otras fuentes de energía en caso de existir. Si las cargas operan a un voltaje distinto que las baterías resulta necesario un transformador. Si además las cargas son alternas hace falta emplear un inversor.



**Ilustración 4:** Auto Solar Eolian, primer auto solar en Chile. En los aleros, posee celdas monocristalinas, mientras que en la cúpula usa celdas aún más costosas de tecnología espacial (GaAs)

**Fuente:** [31] Vargas et al.

### 1.3.2.3 Generación por concentración solar

La tecnología de concentración solar consiste en dirigir todos los rayos solares que inciden en el colector sobre una superficie más pequeña: su foco. Esto se logra mediante espejos, que son apuntados a un punto en común. De esta manera se puede alcanzar una radiación incidente que supera varias veces la radiación solar sin concentrar.

Actualmente se usan mayoritariamente 4 tecnologías: cilindros parabólicos, *fresnel* lineal, concentradores paraboloides o discos Stirling y torres solares. Las primeras dos son de geometría 2D, es decir, se tiene una parábola en dos dimensiones que se alarga hacia

el fondo. A diferencia de los cilindros parabólicos, la tecnología *fresnel* aproxima la parábola mediante el uso de varios espejos rectos sin curvar. Las últimas dos corresponden a tecnologías 3D: una parábola plana se hace girar entorno de su eje (formado entre el vértice y el foco). Mientras que el disco Stirling es de dos dimensiones relativamente reducidas (del orden de decenas de metros), la torre solar puede rodearse de pequeños espejos, llamados helióstatos, que pueden cubrir miles de metros cuadrados. Estos helióstatos aproximan un paraboloides en el plano. La gran ventaja de la tecnología 3D es la transmisión óptica de la energía hasta el foco caliente. Esto disminuye las pérdidas.

Se debe notar que las tecnologías de concentración solar tienen que poseer sistemas de seguimiento para asegurar que los rayos solares ingresen de forma paralela durante todo el día y así pueden ser dirigidos al foco. Además, no se debe olvidar que consumen agua para mantener limpios los controladores.



**Ilustración 5:** De izquierda a derecha: cilindro parabólico, Fresnel lineal, torre solar y disco Stirling.

**Fuente:** [31] Vargas et al.

### 1.3.2.4 Generación geotérmica

Un reservorio geotérmico es una zona bajo la superficie, por lo general entre 500 y 4000 m de profundidad (para que sea aprovechable por la tecnología), donde existen rocas a alta temperatura con alta permeabilidad (fracturas+poros) saturadas en fluidos<sup>4</sup>.

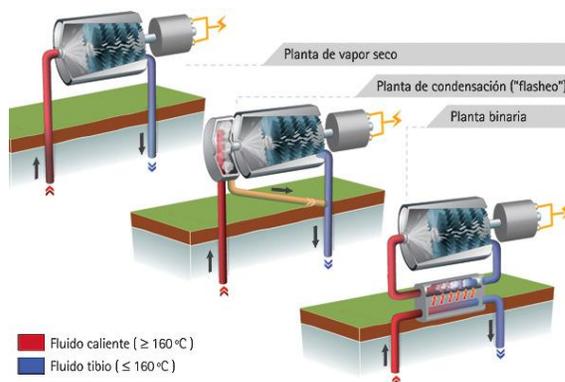
Estos fluidos circulan por rocas que están a más de 230°C y son una mezcla con vapor y minerales disueltos. En ocasiones, parte de estos fluidos se abren camino a la superficie a través de fallas (el agua caliente es menos densa que la fría) y generan manifestaciones como fuentes termales, fumarolas o géiseres.

Para aprovechar el recurso geotérmico que se encuentra en profundidad, es necesario perforar pozos para extraer el fluido que es el que transporta la energía desde la roca caliente. Una vez en superficie, el fluido es separado en una fase vapor, que se envía hasta una planta de generación eléctrica, donde finalmente se transforma la energía calórica en energía eléctrica. La fase líquida, junto a las sales disueltas, son reinsertadas al reservorio

---

<sup>4</sup> <http://www.energiandina.cl/2010/10/descripcion-de-la-geotermia-como-fuente-de-energia-3/> - Generación geotérmica

nuevamente. Existen varios tipos de plantas geotérmicas de generación de electricidad, dependiendo del tipo de reservorio geotérmico que se explote, es decir de las condiciones de temperatura y presión del fluido y de cual sea la fase dominante en el mismo (líquido y/o vapor dominante).



**Ilustración 6:** Tecnologías de generación geotérmica.

**Fuente:** [31] Vargas et al.

### 1.3.3 Tecnologías de generación convencionales

Se consideran como tecnologías de generación convencionales a los combustibles fósiles como el carbón, petróleo o gas natural, tecnologías estudiadas en la presente investigación.

Una central termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la liberación de calor, normalmente asociada a los combustibles fósiles antes nombrados. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía.

Básicamente, el funcionamiento de este tipo de centrales es el mismo independiente del combustible que se consuma. Así, éste se quema en la caldera, liberando calor que se usa para calentar agua. Ésta se transformará en vapor con una presión muy elevada, que es la que hace girar una turbina de vapor transformando la energía interna del vapor en energía mecánica. La producción de electricidad se generará en el alternador, por el giro del rotor (que comparte el mismo eje que la turbina de vapor), mediante inducción electromagnética.



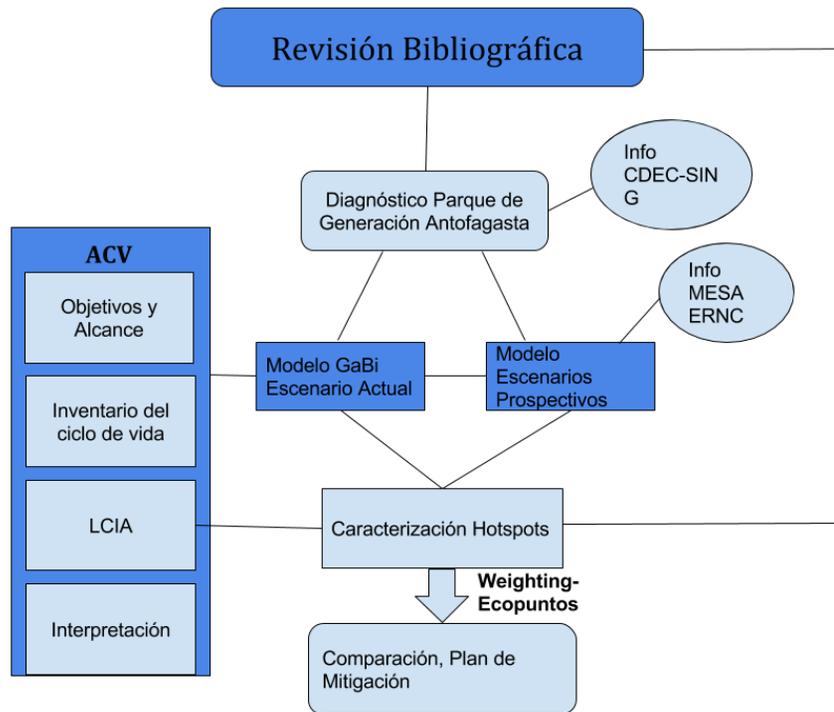
*Ilustración 7: Central Termoelectrica Mejillones*

Fuente: Nueva Minería

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Desarrollo metodológico**

Al día de hoy, la herramienta del análisis de ciclo de vida (ACV) ha sido utilizada intensivamente en muchos productos y servicios a nivel mundial, y el caso de la generación de energía eléctrica no es la excepción, sin embargo, existe una falta de conclusiones consistentes sobre el impacto en el ciclo de vida de las distintas tecnologías [3] estudiadas. Además, a nivel local no existen usos de esta metodología para el mercado energético y regiones como Antofagasta requieren la evidencia empírica de los impactos ambientales que genera la matriz. En la presente investigación se propone una nueva metodología, que incorpore la herramienta de ACV y que mediante datos de generación local y escenarios predictivos del crecimiento de la matriz permita generar recomendaciones y consideraciones para los gestores de políticas públicas a la hora de comparar y escoger tecnologías a instalar.



**Ilustración 8:** Metodología

**Fuente:** Confección propia

- 1) La investigación comienza con una revisión del estado del arte o benchmarking internacional que permita comprender cómo podría generarse una metodología adecuada para un contexto regional en Chile. Comprendiendo que al día de hoy no existe un análisis del inventario del ciclo de vida del país ni de sus regiones y por tanto los ciclos de vida para cada tecnología no se han caracterizado por hotspots, de la misma revisión bibliográfica se homologará esta información para el caso regional estudiado a modo de comprender en qué procesos radican los impactos. Esto permitirá determinar si los impactos son globales o locales.
- 2) Para estimar el parque de generación de electricidad actual de la región de Antofagasta se utilizarán dos bases de datos obtenidas del CDEC-SING [14] [15]. Si bien una de éstas contiene la información de la generación energética nacional mensual en GWh ésta es insuficiente para filtrar únicamente a las correspondientes a Antofagasta dado que están representadas con sus nombres por unidad y empresa constructora. Sin embargo, de la segunda base que contiene la información en potencia (MW), se podrán identificar a los participantes de la región y por tanto calcular su aporte al parque de generación eléctrica. Del trabajo de ambas matrices se obtendrán los insumos necesarios que permiten caracterizar la generación de electricidad regional en la actualidad.

- 3) Luego, siguiendo los pasos de un análisis de ciclo de vida enmarcado en las normas ISO14040 e ISO14044 se definen los objetivos y alcances de éste. La unidad funcional será definida como 1 kwh a modo de poder contrastar con gastos cotidianos para facilitar el entendimiento y el acercamiento al lector (tomador de decisiones, gestor de políticas públicas). En la bibliografía, esta es una decisión recurrente a modo de comparar con matrices de generación de características similares a la estudiada [11]. El análisis de ciclo de vida no considerará los impactos ambientales generados por la transmisión y la distribución de energía, por lo que los resultados obtenidos se remitirán únicamente a un análisis “desde la cuna a la puerta” [7] de la generación eléctrica.

El inventario del análisis de ciclo de vida es definitivamente la actividad más intensiva en tiempo para un estudio de éste tipo. Sin embargo, para este estudio se aprovechará las modelaciones ya existentes en la base de datos Ecoinvent de algunos productos energéticos para Chile. Así, se descargarán los procesos y planes pertinentes que permitan tener una modelación exhaustiva de la generación energética regional. Se ha previsto que existen algunos procesos que no están configurados en Ecoinvent, como es el caso de la producción de generación energética a partir de biomasa. Para estos casos se tomará como supuesto que los inputs/outputs podrán ser replicados de ejemplos internacionales donde se utilice tecnologías de producción similares a las estudiadas para la región y país. Modelar la producción de electricidad con una perspectiva de análisis de ciclo de vida requiere, a lo menos, un registro de las proporciones de energía generadas por cada tecnología, su infraestructura, su producción energética, tiempo de vida, distancia de transporte de los recursos naturales y la extracción de recursos [10].

Los resultados serán presentados a través de las siguientes categorías de impacto: agotamiento abiótico, potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, toxicidad de agua fresca, toxicidad humana, toxicidad agua marina, agotamiento de la capa de ozono, smog fotoquímico, toxicidad terrestre, uso de agua y uso de suelos. Con el modelo ya caracterizado y las categorías de impacto definidas se utilizará el software GaBi para obtener los impactos ambientales esperados. Este proceso se repetirá en varias ocasiones de acuerdo al escenario utilizado. Para interpretar el ACV se utilizará la convención CML2001 en desmedro de las otras anteriormente presentadas, por su utilización preferente en análisis similares [10] [11]. Es importante esta decisión dado que la intención es acercar de mejor manera los resultados obtenidos al lector del trabajo de título.

La metodología aquí utilizada, a diferencia de otros ACV's, ha conferido el proceso de generación de inventario del ciclo de vida a los archivos provenientes de la base de datos Ecoinvent 3, por tanto al no realizarse manualmente la recopilación de flujos de entrada y salida para los procesos que componen el desarrollo de una tecnología, no se pueden identificar hotspots de manera directa. No obstante, está diferenciación de procesos es esencial para determinar qué daños quedan en la región y cuales ocurren fuera de ésta.

Para determinar los impactos locales se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de diversos estudios de ACV para las tecnologías de generación presentes en Antofagasta. Ésta no es una tarea menor, ya que a modo de ser consistente con lo propuesto en la investigación, las referencias escogidas debían de tener los mismos alcances y unidad funcional (1 kwh) del presente estudio.

- 4) Para crear los escenarios prospectivos, tan importantes para obtener conclusiones atingentes a los objetivos planteados en esta investigación, se utilizarán las proyecciones de generación energética propuestas por la Mesa ERNC en sus escenarios de expansión de energías renovables para el país [16][17][18][19]. Nuevamente se deberá filtrar la información dejando únicamente la energía generada en Antofagasta. De aquí se desprenden 3 escenarios identificados con los números 50, 100 y 150. Siendo 100 el escenario representativo y esperado por Energía 2050. 150 es un escenario optimista en el que la inclusión de ERNC supera hasta en un 50% lo esperado. Análogamente, 50 es el escenario en el que lo esperado no es alcanzado y la penetración de energías renovables sólo alcanza un 50% de lo presupuestado. Los escenarios serán caracterizados de acuerdo a las metas planteadas en la política energética Energía 2050 [30] que sugieren que la matriz debiese ser en un 60% dependiente de energías renovables al 2030 y un 70% al 2050. Es importante recalcar que los modelos prospectivos de la Mesa ERNC son a nivel país, por tanto podrían no verse escenarios tan distintos entre los diferentes escenarios a nivel regional.
  
- 5) Los resultados obtenidos de la herramienta de ACV para las tecnologías presentes en la generación permitirán obtener impactos unitarios de la cuna a la puerta (transmisión). Éstos al ponderarse por la generación anual para el escenario actual y los predictivos caracterizados según la información de la Mesa ERNC permitirán obtener impactos globales, vale decir indiferenciables entre Antofagasta y otras regiones. No obstante, del benchmarking antes nombrado se caracterizarán 4 hotspots: Extracción de combustibles y materias primas, procesamiento y transporte, construcción y operación. Más aún, el hotspot de construcción puede diferenciarse entre producción de piezas (paneles solares, torres, aspas, y otros según corresponda) y ensamblaje. De la ponderación de los impactos unitarios y los porcentajes asociados a cada hotspot se podrán desglosar los impactos locales. Todos los resultados, unitarios, globales y locales, deberán ser comparados según tecnología, escenario y año a modo de proveer conclusiones interesantes.

Algunas salvedades, de la revisión bibliográfica no se encontraron datos suficientes que permitiesen segmentar los hotspots de la geotermia por lo que éstos no fueron incluidos en el análisis. De igual forma, la categoría de impacto uso de suelos tampoco reunió suficiente información para ser utilizado en la presente investigación. En el primer caso se debe a que la geotermia aún no ha sido lo suficientemente explorada, sin ir más lejos, Cerro Pabellón<sup>5</sup> recién será el primer proyecto de esta tecnología en Latinoamérica.

---

<sup>5</sup> [http://www.enap.cl/sala\\_prensa/noticias\\_detalle/general/982/enap-y-enel-green-power-inician-en-chile-la-construccion-de-la-primera-central-geotermica-de-sudamerica](http://www.enap.cl/sala_prensa/noticias_detalle/general/982/enap-y-enel-green-power-inician-en-chile-la-construccion-de-la-primera-central-geotermica-de-sudamerica) - Cerro Pabellón

De la investigación sólo se encontraron ACV para sistemas de calefacción mediante geotermia, que están lejos de poder ser extrapolados a la metodología aquí utilizada. Por su parte, la categoría de uso de suelos aún no tiene acuerdo en la comunidad científica respecto a cómo debe ser incluido en ACV, principalmente porque afecta 3 áreas de protección que no han sido debidamente limitadas y/o ponderadas (medioambiente natural, recursos naturales, ambiente antropogénico). Esta incertidumbre respecto a la categoría de impacto ha determinado que en la mayoría de la bibliografía de ACV el uso de suelos sea dejado de lado o bien nombrado sin entrar en profundidad.

La bibliografía que permitió generar los hotspots fue:

- Carbón, gas natural y petróleo [11]
- Eólica [22] [24]
- Concentración Solar [21] [23]
- Fotovoltaica: se utilizó un proceso modelado para otra investigación del Centro de Energía [26]. El archivo utilizado en GaBi si tenía segmentados los hotspots.

En la sección de Anexos 11 se explicita con detalle información respecto a los modelos de generación y componentes de cada tecnología de generación renovable.

- 6) De los resultados obtenidos se generará un análisis comparativo que permita razonar sobre que es óptimo para la región. Además, se darán pasos a seguir respecto a cómo poder replicar esta metodología en otras regiones.

## **2.2 Limitaciones metodológicas**

En el ACV no existe conocimiento respecto a emisiones simultáneas de otros procesos en la región que podrían exacerbar los daños, por ejemplo de la gran minería del cobre, y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. En ese sentido se debe intentar consolidar el estudio de impactos con otras herramientas suplementarias, algunos ejemplos son entregados en 10.4 Recomendaciones.

Si se toma una decisión sobre invertir en una tecnología (i.e. aumento porcentual en la generación regional) esto puede contribuir al desarrollo de la misma, lo que podría ocasionar reducción de costos de manufactura, costos de equipamiento y mejoras en los factores de capacidad, por tanto entre 2016 y 2037, las categorías de impacto presentadas podrían disminuir sus daños al medioambiente con tecnología aún no trabajada. Algunos ejemplos no tan lejanos son herramientas de captación de CO<sub>2</sub>, tecnologías de reutilización de aguas, entre otros.

## **2.2.1 Limitaciones de las categorías de impacto**

### **2.2.1.1 Agotamiento abiótico**

Para los recursos, en general se hace la distinción entre bióticos y abióticos. El agotamiento de recursos abióticos es frecuentemente discutida como una categoría de impacto poco rigurosa, que abarca una variedad dispar de métodos para ser calculada, y por tanto de la bibliografía existente aún no existe claridad respecto a qué resultados son más precisos que otros. En particular para esta investigación si bien fueron reportados resultados de la categoría agotamiento abiótico, éstos fueron considerados como despreciables dado que para la tecnología de concentración solar los impactos se disparaban de manera irreal. Al comparar con otros ACV en la materia no se llegó a una conclusión respecto a como debiese tratarse esta categoría de impacto, no obstante se desmintió que la concentración solar pudiese impactar de sobremanera por sobre las otras tecnologías.

### **2.2.1.2 Uso de suelos**

Tanto la ocupación de suelos, como la transformación de éstos han sido considerados para la distinción, no obstante el transporte y la extracción de recursos también pueden tener impactos tanto positivos como negativos. Sin embargo, en la actualidad no existe acuerdo respecto a cómo debiesen ser incluidos estos impactos en el proceso de generación de inventario del análisis de ciclo de vida (LCIA). El uso de suelos afectará 3 áreas de protección directamente: ambiente natural, recursos naturales y ambiente antropogénico y por consiguiente salud humana, de forma indirecta. Algunos ejemplos de impactos incluyen la pérdida de biodiversidad, pérdida de calidad de los suelos, pérdida de potencial de producción biótico. No obstante, la lista de impactos es aún mayor. Podría ser necesario incluir más de una categoría de impacto para este fin [27].

### **2.2.1.3 Uso de aguas**

A nivel de inventario del ACV los flujos de agua son reportados usualmente como parámetros de entrada, pero se da poca atención respecto a la diferenciación entre los tipos de agua existentes y el criterio de calidad de aguas, que es de vital importancia para el cálculo de los impactos para esta categoría. En particular, el uso industrial de aguas está apenas documentado.

Pese a la eminente importancia de la escasez de agua dulce y la variabilidad regional en la disponibilidad de agua (tema crítico en Antofagasta) sólo un par de métodos poseen el consumo de agua como categoría de impacto.

#### **2.2.1.4 Categorías de toxicidad**

La ecotoxicidad humana y de aguas ha sido considerada de la revisión bibliográfica como otras categorías de impacto conflictivas. Las críticas van del lado de la ausencia de información suficiente en el inventario como para generar una categoría *per se*. En particular el uso de químicos es una condicionante normada por las leyes locales, por lo que la categoría de impacto se ve modificada de país en país.

### 3 RESTRICCIONES Y LIMITACIONES

Elaborar una metodología de análisis de ciclo de vida para la generación energética en un contexto regional, es una tarea que a priori, se ve como innovadora y nunca antes hecha como tal, al menos a nivel país. Sin embargo, de una revisión bibliográfica internacional [2] [3] [4] [6] se puede aseverar que el uso de ACV en generación eléctrica no es para nada nuevo y existen múltiples ejemplos de su uso al menos como insumo para la toma de decisiones, o bien como otro argumento favorable al uso de energías renovables en desmedro de las tradicionales intensivas en la generación de Co2.

El estudio a ser desarrollado generará una metodología capaz de replicarse en otras regiones del país. Se debe entender que los inputs y condiciones de la generación energética y del mercado serán distintas para cada zona y por tanto bastará adecuar las variables al caso estudiado para utilizar lo propuesto. Se propone acotar inicialmente el estudio a la región de Antofagasta por la importancia económica de ésta para el país y el uso intensivo de energía en que ésta incurre (principalmente por la industria minera). Así, un primer uso de esta metodología permitirá ver la factibilidad de que ésta sea replicada y la importancia y uso de los resultados obtenidos. Bajo este mismo argumento, y considerando que la generación eléctrica en Antofagasta proviene principalmente de combustibles fósiles, viento, sol y geotermia, este estudio deja fuera a tecnologías energéticas de uso nacional e internacional importantes como son la energía hidroeléctrica, nuclear, maremotriz, undimotriz, entre otras.

Otra limitante para la investigación es que el análisis de ciclo de vida no considerará los impactos ambientales generados por la transmisión y la distribución de energía, por lo que los resultados obtenidos se remitirán únicamente a un análisis “desde la cuna a la puerta” [7] de la generación eléctrica, siendo el fin del ciclo de vida la entrega de 1 kwh al sistema de transmisión.

Impactos sociales y económicos son excluidos de este análisis, entendiendo que estas variables son consideradas por los gobiernos regionales y a nivel país en la toma de decisiones de la instalación de generación eléctrica. Así, este estudio propone categorías e indicadores de carácter únicamente ambiental que puedan servir como un insumo para la toma de decisiones enfatizando en un crecimiento y desarrollo de carácter sustentable<sup>6</sup>.

Es de especial interés del Centro de Energía de la FCFM ver el impacto medioambiental que tiene la generación de energía eléctrica solar en la región, por lo que los análisis enfatizarán en la comparación de esta tecnología con el resto y algunas modelaciones también estarán asociadas a la misma; ejemplo fehaciente de ello es la modelación al 2035, donde los porcentajes asociados a generación por tecnología verán un incremento en el uso de energía solar en desmedro de las en base a carbón, como dice

---

<sup>6</sup> <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml> - Definición de “sostenibilidad” de la ONU

la tendencia mundial. Los modelos a ser comparados, están enmarcados en las estimaciones al 2037 de la mesa de ERNC orientada a la política Energía 2050.

Cabe también señalar que las modelaciones de la mesa de ERNC no consideraban la inclusión de proyectos de geotermia, no obstante, en los últimos meses se ha continuado la construcción de la planta Cerro Pabellón<sup>7</sup>, por lo que en la presente investigación se ha decidido añadir este proyecto a las proyecciones, pensando también en una probable inclusión de nuevos proyectos de esta tecnología.

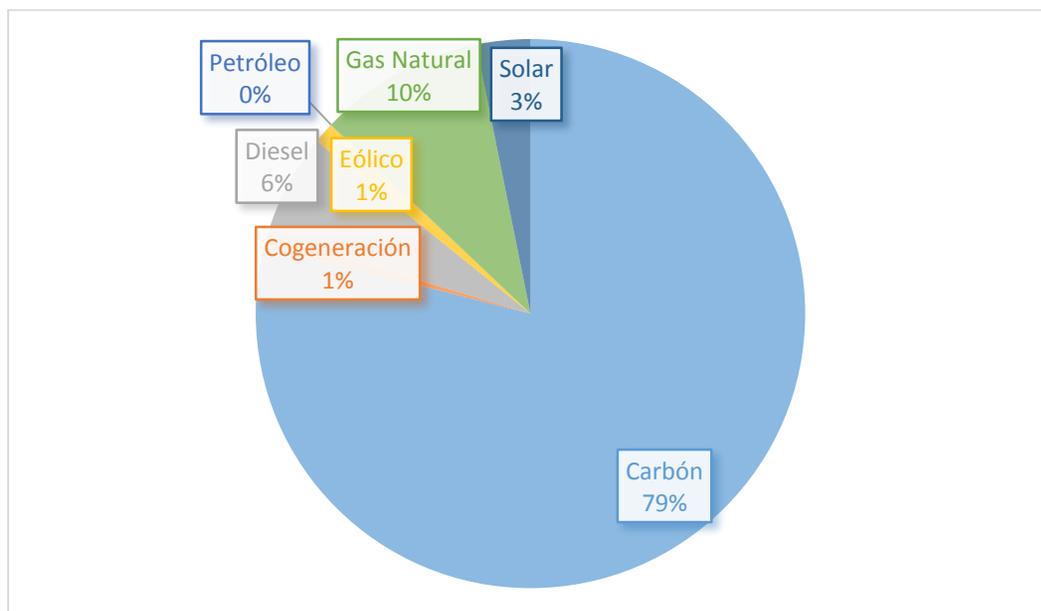
Por último, el alcance de la investigación es también limitado por la herramienta computacional GaBi y la base Ecoinvent 3 utilizada para el análisis. Así, el inventario de análisis de ciclo de vida vendrá dado de los procesos modelados en la base de datos antes nombrada, éstos serán vistos en profundidad en la sección “8 Análisis de ciclo de vida”.

---

<sup>7</sup> <https://www.veoverde.com/2015/07/inician-construccion-de-cerro-pabellon-la-primera-central-geotermica-de-sudamerica/> - Primera central geotérmica de Latinoamérica

#### 4 DESARROLLO Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

De información obtenida del centro de despacho de carga del SING se puede caracterizar el escenario actual de generación eléctrica de Antofagasta:



**Gráfico 1:** Energía generada anual en la Región de Antofagasta, correspondiente a 14058 Gwh.

**Fuente:** Confección propia.

Se observa que un 95,5% de la generación eléctrica actual proviene de energías no renovables convencionales (Carbón, GNL, Diesel), dejando apenas un 4,5% de penetración de ERNC proveniente en su mayoría de tecnologías de generación fotovoltaicas.

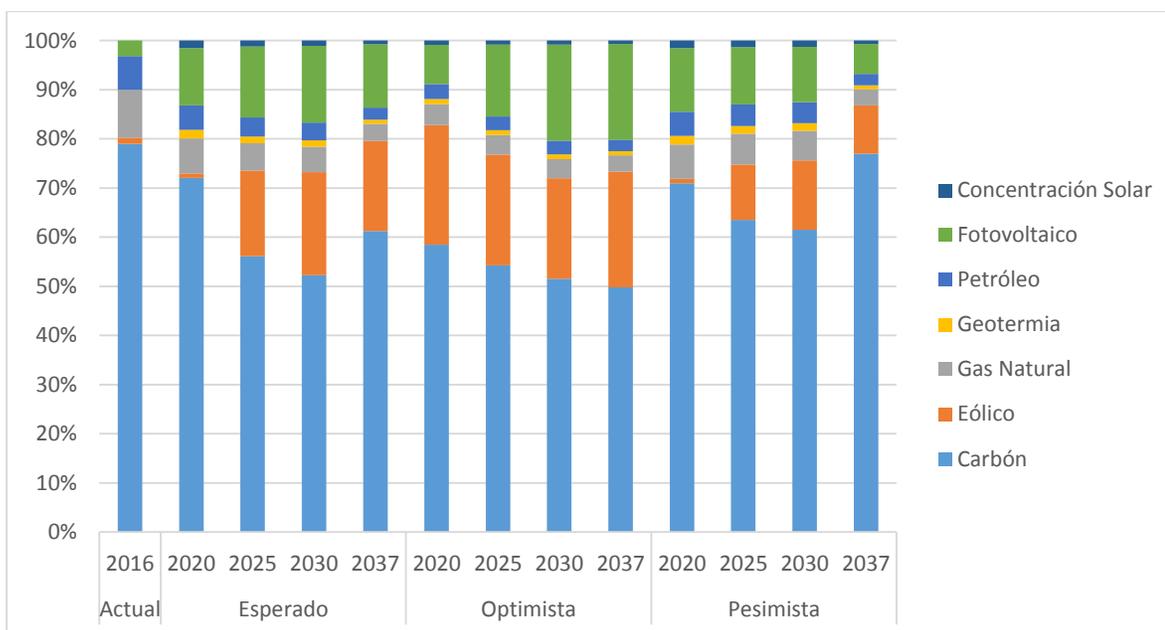
En efecto, si bien es interesante el resultado de los impactos ambientales que se pueda obtener del escenario de generación actual mediante el ACV, éste es previsible ya que se ha evidenciado anteriormente que los daños ambientales provenientes de la generación térmica son en promedio mayores en todas las categorías de impacto en comparación a las ERNC [3]. Lo realmente interesante, y la principal generación de valor entregada por esta investigación es el análisis prospectivo de qué diferencias existirían en el aumento/disminución de impactos ambientales asociados a la elección de algún tipo de tecnología en desmedro de otra. Particular interés podría generarse de la revisión de impactos asociados al consumo de agua, uso de suelo, entre otros, por la generación fotovoltaica donde se avizora un fuerte crecimiento según los escenarios de proyección utilizados en esta investigación [16][17][18][19].

La modificación de los porcentajes de generación eléctrica establecidos en el escenario base actual además de la probable inclusión de nuevas tecnologías a la región (geotermia), permite generar escenarios a futuro que podrán ser comparados permitiendo la propuesta de sugerencias y planes de mitigación de impactos ambientales.

Acorde a la Hoja de Ruta 2050 se ha definido la meta de que la matriz energética del país debe estar compuesta en un 60% de generación de energías renovables para el 2030, y un 70% al 2050. En ese sentido la Mesa ERNC ha propuesto 3 escenarios predictivos, éstos escenarios, al ser una predicción avalada por un panel de expertos en materia energética, serán los considerados en la presente investigación para plantear escenarios prospectivos.

- Escenario Pesimista: Sigue primando el ingreso de generación no-renovable, el ingreso de proyectos de generación renovable es contenido.
- Escenario Esperado: la matriz continúa su expansión basándose principalmente en proyectos solares y eólicos. También ingresan proyectos de concentración solar y geotermia.
- Escenario Optimista: la matriz se expande en base a energías renovables únicamente y no hay nuevos proyectos en base a carbón, gas natural o petróleo. Ingresan proyectos en su mayoría fotovoltaicos y eólicos, pero también de concentración solar y geotermia.

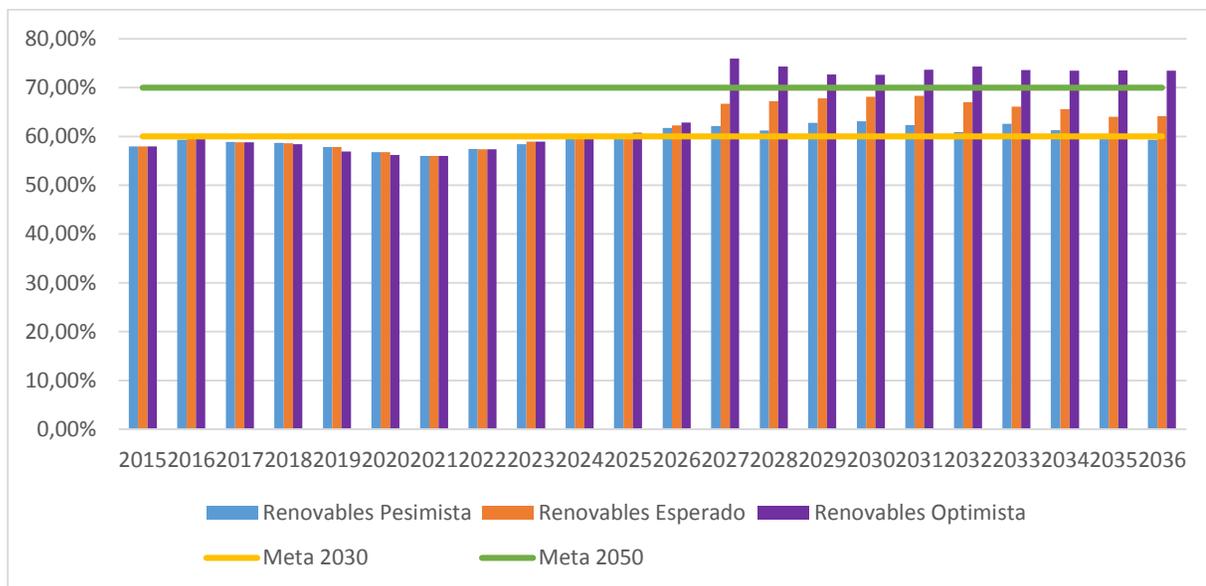
El detalle de la composición de la matriz energética para los distintos años y escenarios estudiados puede explicarse con el siguiente gráfico:



**Gráfico 2:** Composición de la matriz energética por tecnología para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia

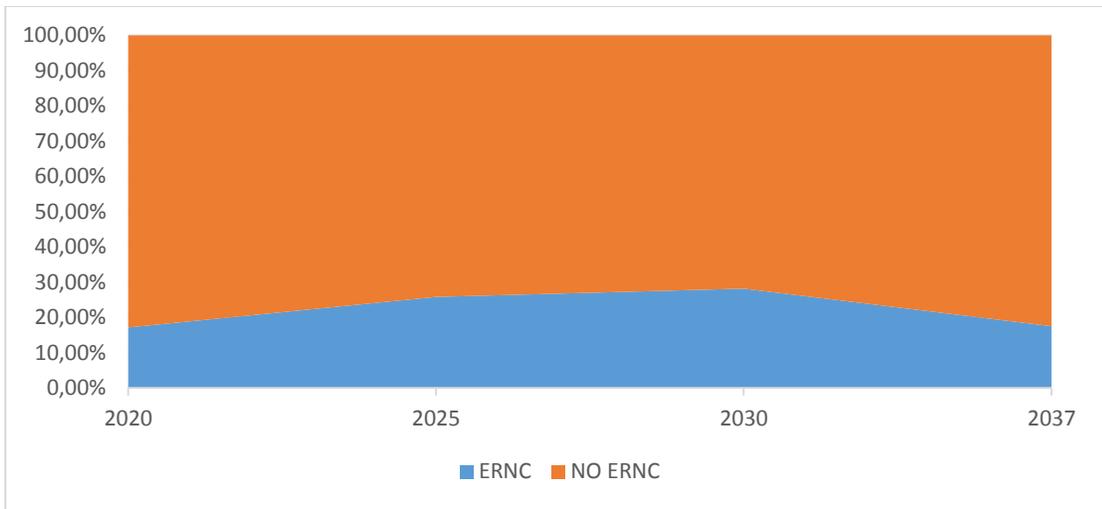
Es atingente comparar el éxito de los 3 escenarios declarados según las metas establecidas en la política energética Energía 2050.



**Gráfico 3:** Comparación de Escenarios Mesa ERNC

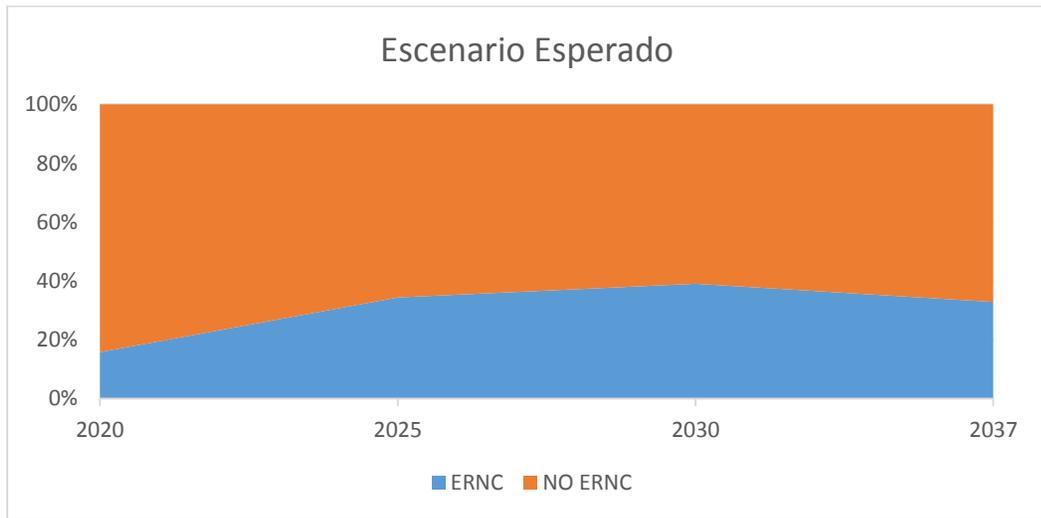
**Fuente:** Confección propia

Si bien las metas declaradas por la política energética nacional son a nivel país, no deja de ser interesante evidenciar que para los 3 escenarios declarados la meta al 2035 se cumple antes de lo esperado, en particular para el año 2026. Además para el escenario optimista la meta al 2050 comienza a satisfacerse desde el 2017. No obstante, la situación no es igual de prometedora para Antofagasta, que pese a que tendrá un potente incremento en ERNC no superará las metas establecidas a nivel país. Esto puede justificarse dada la inexistencia de generación hidroeléctrica, una fuerte componente de la matriz de generación nacional. La penetración de energías renovables para la región se puede ver en los siguientes gráficos:



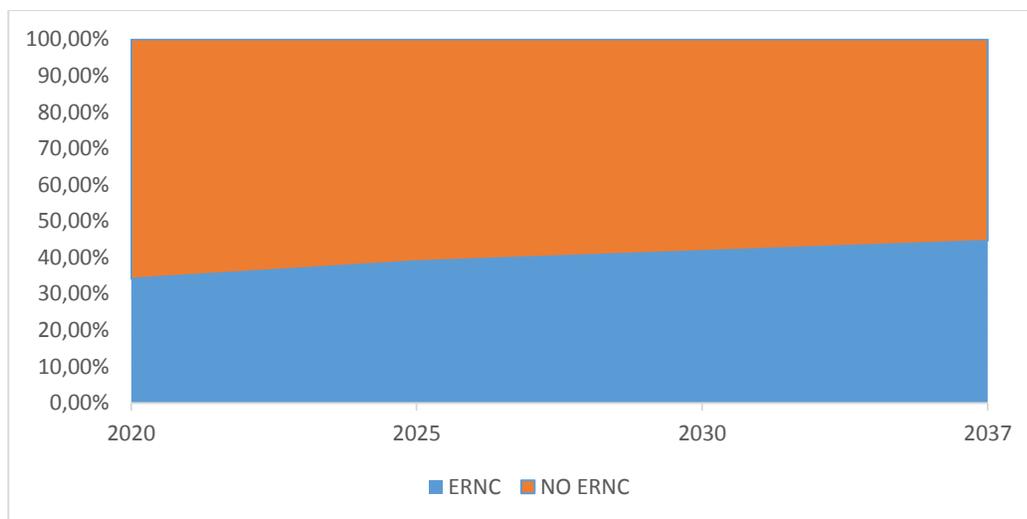
**Gráfico 4:** Penetración ERNC escenario pesimista para Antofagasta, años 2020, 2025, 2030 y 2037

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 5:** Penetración ERNC escenario esperado para Antofagasta, años 2020, 2025, 2030 y 2037

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 6:** Penetración ERNC escenario optimista para Antofagasta, años 2020, 2025, 2030 y 2037

**Fuente:** Confección propia

Más información concerniente a la descripción de los escenarios aquí presentados puede observarse en la sección de Anexos 8.

## 5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Se ha definido como unidad funcional de ACV 1 kwh. Los límites del sistema producción eléctrica han sido definidos como *Cradle-to-Gate*, vale decir de la cuna a la puerta, abarcando el proceso del producto energía desde su generación indiferente del tipo de tecnología abordado hasta que se deposita el kwh de energía en el sistema de transmisión, dejando fuera del análisis a éste último y a la distribución del producto.

Es importante comprender que factores consideran los procesos obtenidos de la base de datos Ecoinvent<sup>3</sup>. Para ello, a continuación se presentan resúmenes para cada tecnología, obtenidos de los manuales de la base de datos ya nombrada. Para más información, revisar la sección de Anexos 3.

### Tecnologías convencionales:

- **Carbón:** producción de electricidad de alto voltaje en una planta de generación en base a carbón duro promedio en Chile en 2012. El carbón duro incluye antracita, carbón de coque y carbón bituminoso. El ciclo de vida abarca la extracción del carbón y el transporte a la planta, la construcción de ésta y su operación. Termina con 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado a la barra colectora.
- **Gas Natural:** producción de electricidad de alto voltaje en una planta convencional con caldera a vapor de gas natural sin ciclo combinado en Chile en 2012. El ciclo de vida abarca la extracción del gas natural, su posterior traslado y recepción en la entrada de la planta de generación. La actividad termina con 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado en la barra colectora.
- **Petróleo:** producción de alto voltaje en una planta de petróleo conectada a la red con una capacidad de 500MW en Chile el 2012. El ciclo de vida abarca la extracción de la materia prima y su transporte y posterior recepción. La actividad termina con 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado en la barra colectora.

### Energías renovables no convencionales:

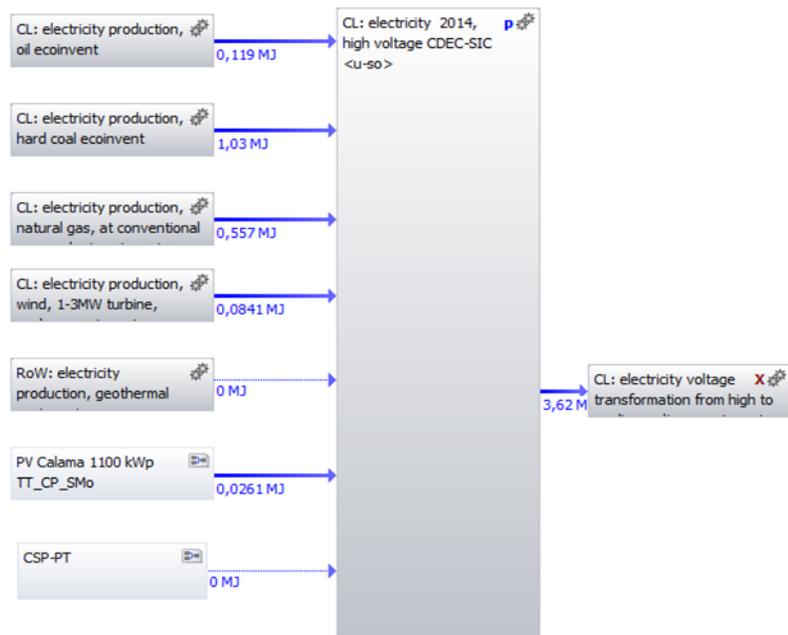
- **Eólica:** producción de electricidad de alto voltaje en una planta eólica onshore conectada a la red con una capacidad entre 1 y 3 MW en Chile el 2012. Incluye gastos en operación y mantención y los insumos de infraestructura. La carga de viento ha sido adaptada a las condiciones locales. Los límites del sistema incluyen todos los componentes mayores de la planta de generación. Las etapas del ciclo de vida van desde la construcción de los componentes de la planta, hasta la transmisión de 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado a la barra colectora.

- Geotermia: producción de alto voltaje en una planta de geotermia genérica modelada a partir del escenario RoW (“*Rest of the world*”) de la base de datos Ecoinvent. RoW es equivalente a un escenario global, y es considerado por la base de datos como un promedio válido para todos los países del mundo. Su incerteza está ajustada. Los límites del sistema incluyen todos los componentes mayores de la planta de generación. Las etapas del ciclo de vida van desde la construcción de los componentes de la planta hasta la transmisión de 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado a la barra colectora.
- Fotovoltaica: El foco de este instrumento de medición es cuantificar los impactos ambientales de una planta fotovoltaica en un espacio abierto, con un seguimiento de un solo eje utilizado para proveer electricidad para la minería del cobre. Los límites del sistema incluyen todos los componentes mayores de la planta de generación. Las etapas del ciclo de vida van desde la construcción de los componentes de la planta hasta la transmisión de 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado a la barra colectora.
- Concentración Solar: El foco de este instrumento de medición es cuantificar los impactos ambientales de una planta de concentración solar en un espacio abierto, con un seguimiento de un solo eje utilizado para proveer electricidad para la minería del cobre. Los límites del sistema incluyen todos los componentes mayores de la planta de generación. Las etapas del ciclo de vida van desde la construcción de los componentes de la planta hasta la transmisión de 1 kwh de alto voltaje producido en la planta y entregado a la barra colectora.

Para la confección del inventario del ACV se descargaron los procesos de generación eléctrica para las tecnologías presentes en Antofagasta, y también las previstas (CSP y Geotermia) de la Base de datos Ecoinvent 3, de la cual la presente investigación se provee de acceso gracias a las gestiones del Centro de Energía. Posteriormente, se modeló mediante la herramienta computacional GaBi el proceso representativo del parque de generación eléctrica regional.

## Antofagasta Electricity Production

Process plan: Reference quantities  
The names of the basic processes are shown.



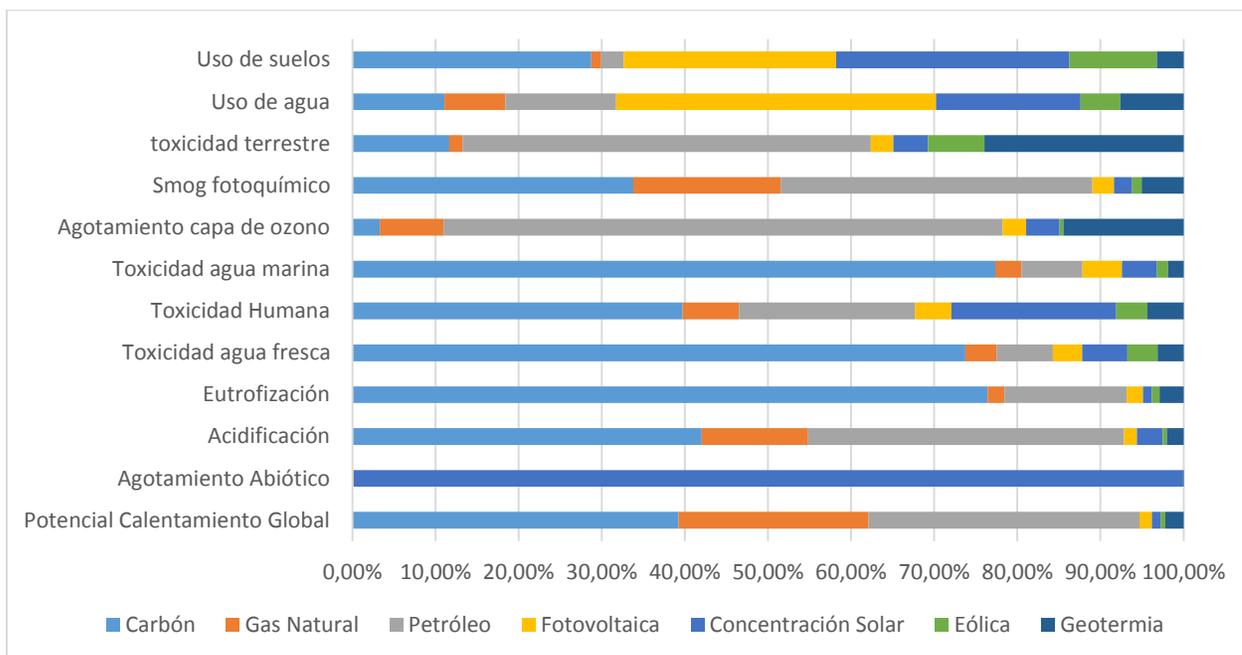
**Ilustración 9:** Modelo de generación eléctrica de Antofagasta

**Fuente:** Realizado en el software GaBi por el autor

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Impactos ambientales unitarios

De la modelación en el software de ACV GaBi se obtienen los impactos ambientales unitarios de poner 1 kwh de energía en el sistema de transmisión para todas las categorías de impacto antes declaradas.



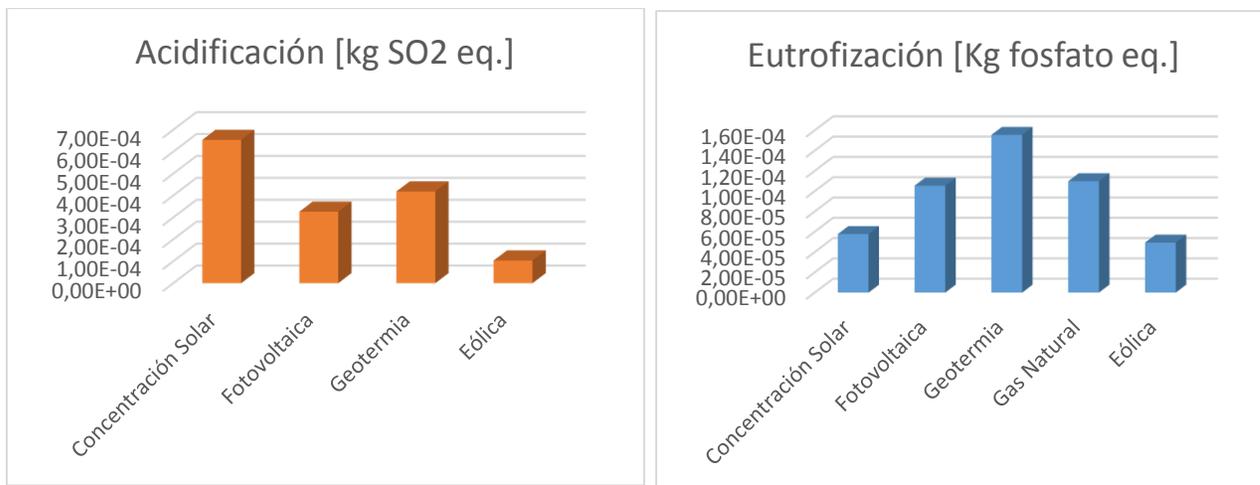
**Gráfico 7:** Contribución de tecnologías de generación eléctrica a impactos totales por categoría

**Fuente:** Confección propia

De una inspección preliminar del Gráfico 7 se puede observar inmediatamente que los impactos de la generación energética en base a tecnologías convencionales, no renovables, superan con creces a los de las ERNC. Es por eso que en muchos de los gráficos subsiguientes éstos se aislarán del análisis a modo de no entorpecer la comprensión real de los impactos, entendiendo que el plan Energía 2050 y la tendencia mundial apuntan a discontinuar el uso de estas tecnologías de generación. No obstante es importante (y preocupante) observar la magnitud de éstos impactos, que como se verá en las próximas secciones de la presente investigación provienen en su mayoría de la operación de las plantas.

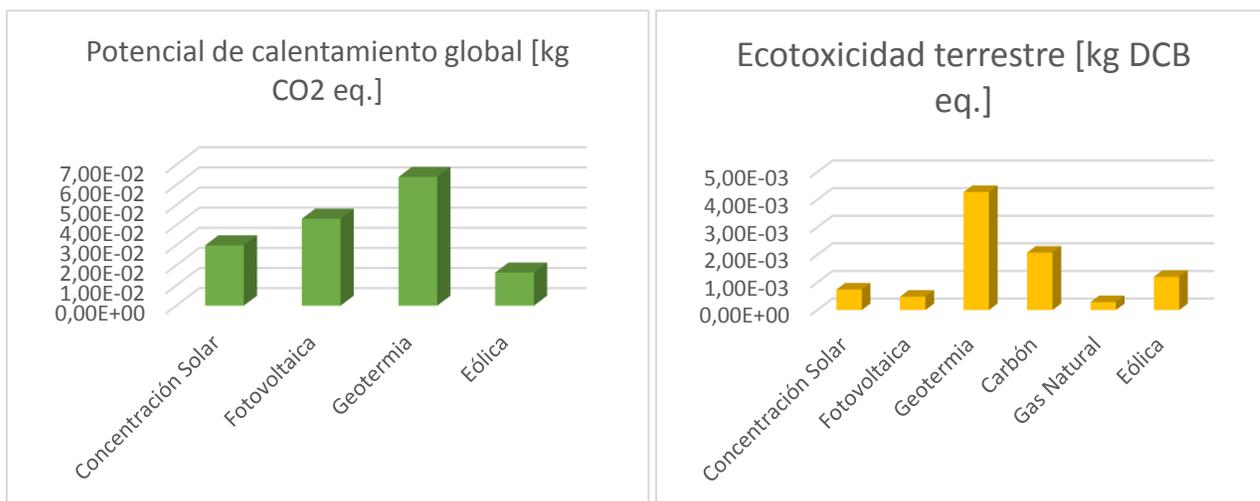
Es importante señalar al lector, que cada categoría de impacto posee su propia unidad de medida y por tanto no siempre las dimensiones serán comparables. A continuación se

presentan sólo los impactos unitarios más destacables, y por consiguiente debatibles, el detalle de estos resultados puede encontrarse en la sección de Anexos 5 y Anexos 6 junto con el resto de categorías no analizadas en esta sección.



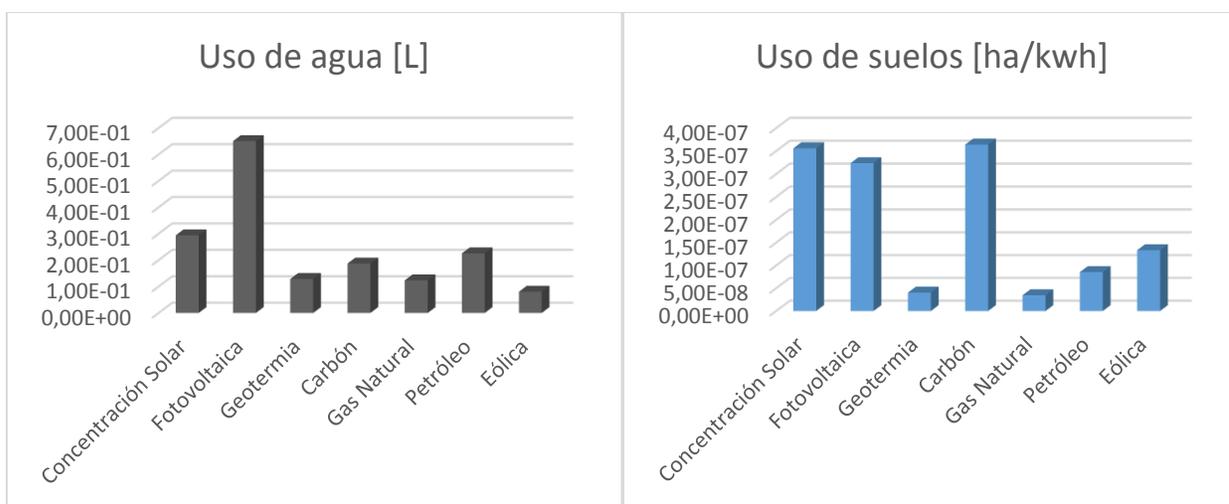
**Gráfico 8:** Impactos unitarios acidificación (izq.) y eutrofización (der.)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 9:** Impactos unitarios potencial de calentamiento global (izq.) y ecotoxicidad terrestre (der.)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 10:** Impactos unitarios uso de agua (izq.) y uso de suelos (der.)

**Fuente:** Confección propia

Se puede observar de los resultados obtenidos que la energía eólica es la de mejor rendimiento ambiental de las ERNC, siendo la que menos impactos genera en 8 de las 12 categorías de impacto estudiadas.

Las tecnologías de energía solar por su parte obtienen resultados intermedios, no obstante, el CSP tiene altos impactos en acidificación ( $6,5E-04$ ) con 56% generación de  $SO_2$  equivalente por sobre la geotermia que es el siguiente en la lista de generación de daños ambientales de este tipo. En el caso del potencial de toxicidad humana, es también el CSP quién genera la mayor cantidad de diclorobenceno equivalente (0,28 kg por kwh generado). Particular preocupación podría generar el hecho de que en consumo de agua la tecnología más intensiva en su uso es la solar fotovoltaica (650 ml por kwh), entendiendo que como se ha dicho anteriormente, Antofagasta tiene problemas de escasez de este recurso hídrico. Preocupa más aún este resultado al observar los escenarios proyectados provenientes de la mesa ERNC de Energía 2050, que como se verá más adelante en este estudio aumentan ostensiblemente el porcentaje de dependencia de la matriz en la generación fotovoltaica.

Otra categoría de importancia, en donde las ERNC no obtienen resultados tan positivos como se esperaría, es en el uso de suelos. Las generaciones por concentración solar y fotovoltaica tienen impactos muy similares a la generación en base a carbón.

La tecnología que obtiene un peor rendimiento en cuanto a impactos ambientales es la geotermia que tiene los peores registros en eutrofización ( $1,5E-04$  kg de fosfato equivalente por kwh), potencial de calentamiento global (0,06 kg de  $CO_2$  eq. por kwh), agotamiento de la capa de ozono ( $3,59E-08$  kg de R11 eq. por kwh), potencial de creación de ozono fotoquímico ( $6,82E-05$  kg de eteno eq. por kwh) y ecotoxicidad terrestre (0,004

kg de DCB eq. por kwh). No obstante, es muy prematuro conjeturar comprendiendo que un impacto individualizado de nada sirve si no es ponderado por la cantidad de generación de energía anual proveniente de esta tecnología.

Cabe señalar que las categorías de impacto de agotamiento abiótico, y toxicidad de aguas (fresca y marina) entregan resultados poco coherentes que deben ser comparados con otros estudios para comprobar su veracidad y por tanto no han sido reportados en el cuerpo del reporte pero si en la sección de anexos antes nombrada.

### **6.1.1 Comparación resultados internacionales**

Como se ha señalado anteriormente, el análisis de ciclo de vida es una herramienta que ya ha sido utilizada anteriormente en otros países para comparar los impactos de la generación eléctrica. A continuación se contrastan los resultados obtenidos con bibliografía pertinente a modo de validar la consistencia de la investigación.

En el mundo se han hecho esfuerzos de distinta factura por calcular los impactos ambientales de categorías más allá de la ya bastante trabajada de cambio climático, no obstante, y comprendiendo que los resultados de un ACV pueden ser diametralmente opuestos a otro según la precisión con que se haya llevado a cabo el inventario, la base datos utilizada, las tecnologías utilizadas, los alcances definidos, entre otros, existen diferencias significativas en el estado del arte internacional respecto al tema. En este contexto, una investigación relevante es la de Asdrubali et al. [3]. La investigación realizada en la Universidad de Perugia tuvo como objetivo final, mediante una metodología de armonización de resultados, normalizar lo obtenido por más de 50 papers a modo de comparar el rendimiento ambiental de las tecnologías renovables.

De la comparación entre el ACV realizado en este informe y lo presentado en la investigación recién descrita se observa consistencia en las categorías de acidificación, eutrofización, potencial de calentamiento global, uso de suelos y uso de aguas, si bien hay diferencias menores entre las cifras promedio obtenidas en [3] y las del presente estudio éstas se encuentran en el mismo orden de magnitud y muestran tendencias similares respecto a que categorías impactan más que otras. Algunas conclusiones importantes de la investigación italiana que son atinentes al presente informe hacen referencia a la alta variabilidad encontrada en los indicadores ambientales observados para la generación de energía geotérmica, esto principalmente debido a que ésta tecnología aún está en un proceso de inserción a nivel mundial y no existen estudios de ACV consistentes y exclusivos para aquella forma de generación. Por lo mismo los resultados obtenidos para la geotermia en el presente informe deben tomarse con mesura, comprendiendo los alcances antes descritos y la metodología utilizada para obtener resultados.

De la revisión bibliográfica también surge otra investigación importante a ser comparada con el presente estudio, se trata de aquella realizada por Santoyo-Castelazo et al., un ACV realizado a la generación eléctrica en México con una unidad funcional y

alcances idénticos a los de la investigación aquí estudiada. Es además fuente de inspiración bibliográfica para la generación de hotspots como se verá en la sección 9.3 Impactos Locales, por lo que su comparación se hace necesaria. La tendencia es clara respecto a las energías no renovables, y en ambos estudios se observa que los principales impactos en cada categoría de impacto provienen de éstas tecnologías que usan combustibles fósiles. El estudio entrega los impactos unitarios diferenciados por emisiones (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O) por lo que no son directamente comparables con los aquí presentados. Pese a ello, la tendencia sigue siendo la misma y la tecnología más limpia entre las ERNC es nuevamente la generación eólica.

No obstante, de la investigación aquí presentada hay algunos resultados que podrían ser discutibles. La tecnología de concentración solar, si bien presenta resultados en el orden de magnitud de los estudios comparados, pareciese ser sobreestimada, obteniendo impactos mayores que los que se esperarían de ésta. Además, la categoría de agotamiento abiótico no entrega resultados sensatos en comparación a la revisión bibliográfica. Si bien tanto la concentración solar como la categoría de agotamiento abiótico son presentadas en este estudio, el lector debe entender los resultados con criterio comprendiendo la metodología llevada a cabo y los alcances y criterios utilizados para definir hotspots. A priori, el sobredimensionamiento de los impactos de la concentración solar se pueden aquejar al proceso de Ecoinvent 3 utilizado para su modelación.

## **6.2 Impactos locales**

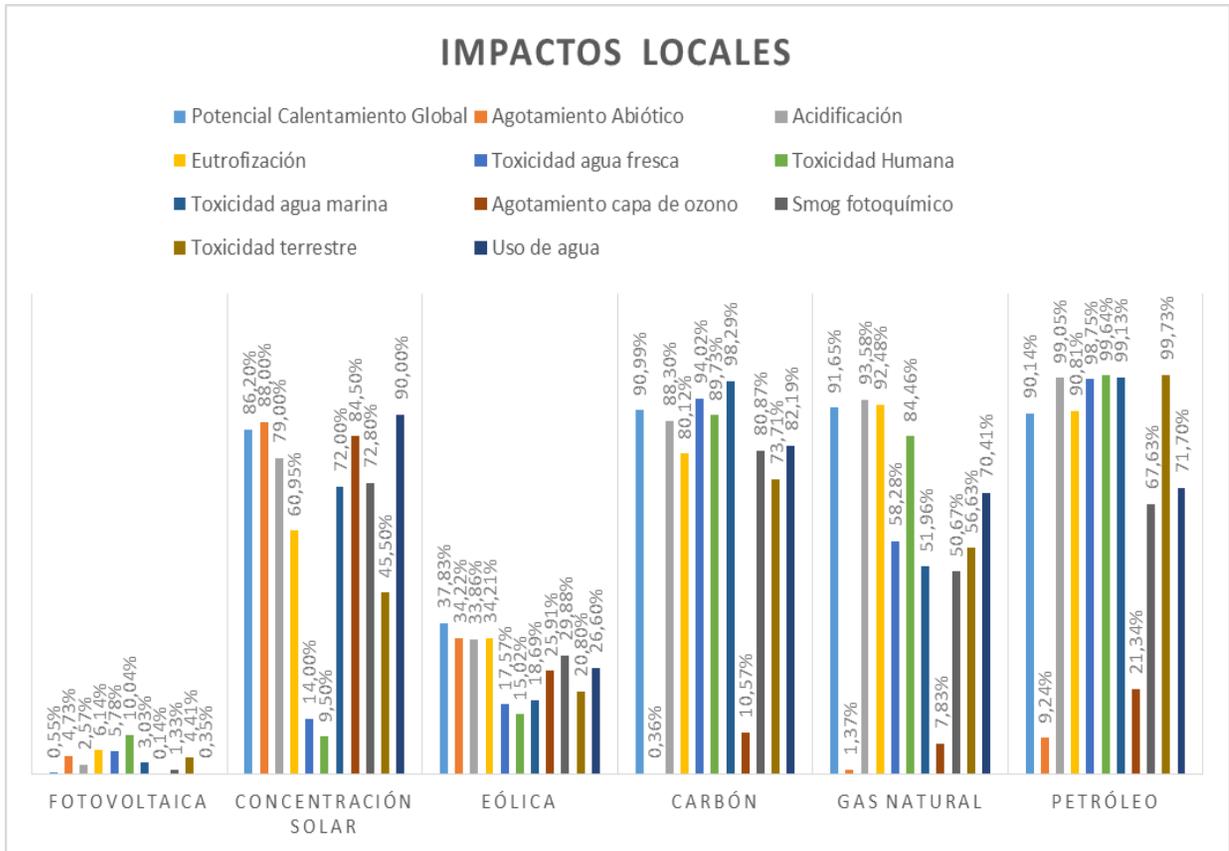
### **6.2.1 Caracterización de hotspots**

Según la metodología explicitada en secciones anteriores, los hotspots escogidos son los siguientes:

- Extracción de combustibles y materias primas
- Procesamiento y transporte
- Construcción
- Operación

Cabe señalar que para las ERNC el hotspot “Construcción” puede dissociarse entre producción (de las partes involucradas en la construcción, i.e. paneles solares, aspas, tuberías, según corresponda) y montaje. Como se observará en los resultados siguientes, tanto “extracción de combustibles y materias primas” como “procesamiento y transporte” son procesos que serán considerados como externos a la región, al igual que “montaje” en el caso de las ERNC.

Así, de una inspección inicial de la información hasta ahora presentada, se podrían diferenciar de los impactos globales los siguientes impactos locales.



**Gráfico 11:** Impactos locales de tecnologías de generación en Antofagasta desglosados por categorías

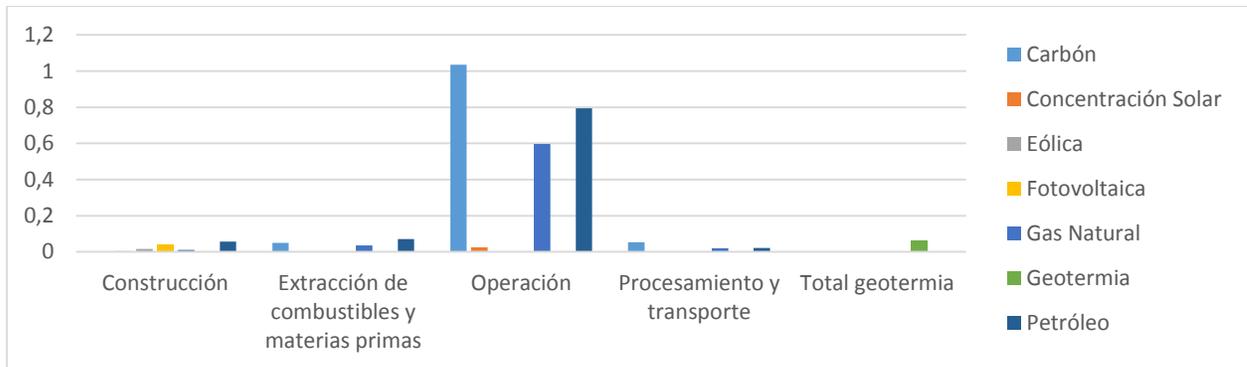
**Fuente:** Confección propia

Es inmediato observar que para las tecnologías de generación térmica la mayoría de sus impactos son locales, éstos provienen en su mayoría de la quema de combustibles fósiles para generar energía en la fase de operación. Son excepciones las categorías de agotamiento abiótico y agotamiento de capa de ozono, lo que hace mucho sentido ya que ambas categorías reciben sus mayores impactos en la extracción de materias primas, suceso que ocurre fuera de la región.

En contraposición, las ERNC concentran la mayoría de sus impactos en la fase de producción de sus componentes principales, evento que no ocurre en la región ya que las tecnologías son importadas y no manufacturadas en Chile. No obstante la concentración solar escapa de esa tendencia y ese es un resultado que se discutirá en secciones posteriores.

## 6.2.2 Impactos unitarios por hotspots

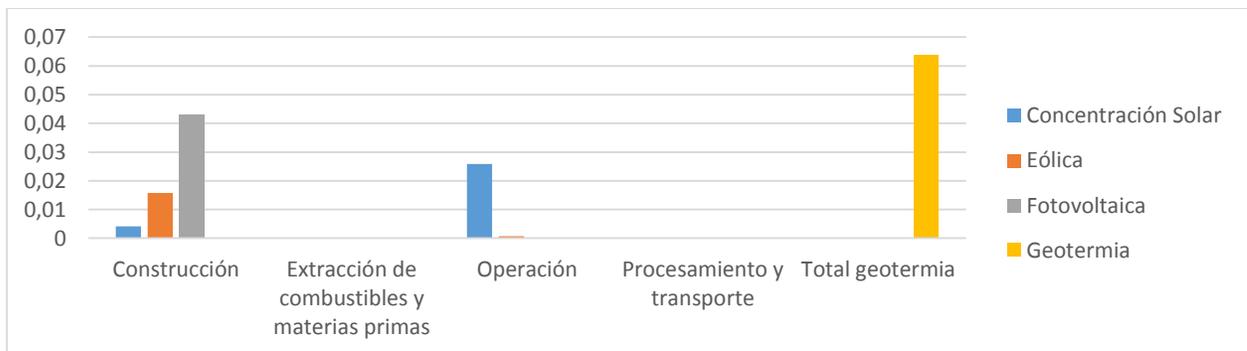
A continuación se presentan los resultados más destacados del desglose por hotspots de las tecnologías de generación, el resto pueden verse en la sección de Anexos 10. A modo de referencia en varios casos se ha adjuntado el total de la geotermia, que como ya se adelantaba no ha sido desglosado, pero es importante de ser comparado para no llevar a algún pensamiento erróneo de que esta tecnología podría ser más limpia que otras.



**Gráfico 12:** Potencial de calentamiento global [Kg Co2 eq/kwh] desglosado por hotspots.

**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

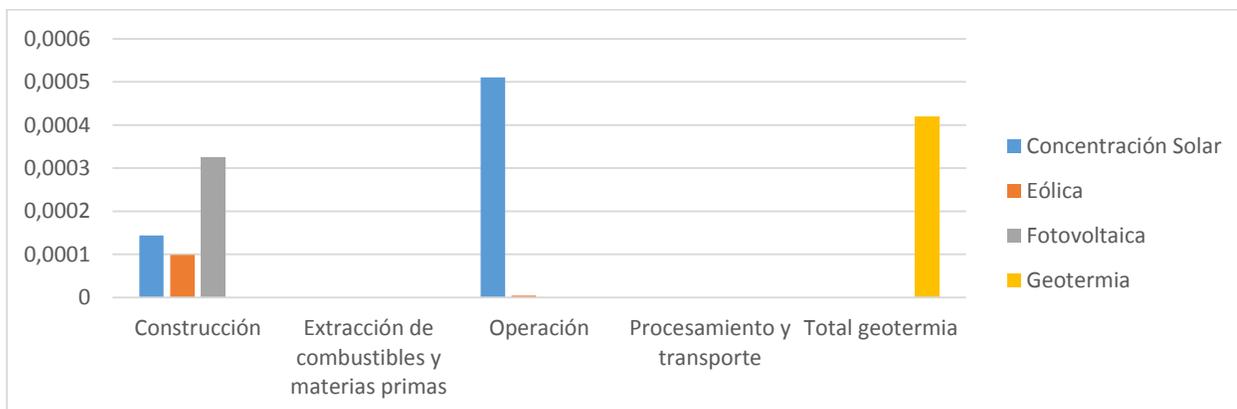
Como era de esperarse los principales impactos vienen dados de la combustión de combustibles fósiles para las energías convencionales en la fase de operación.



**Gráfico 13:** Potencial de calentamiento global renovables [Kg Co2 eq/kwh] desglosado por hotspots

**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

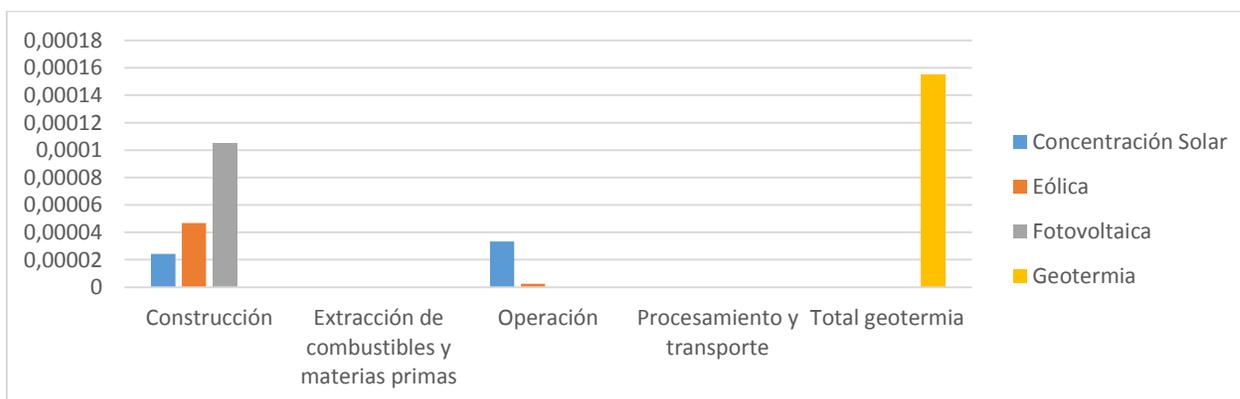
Al descartar a las energías no renovables se puede observar que los principales impactos en esta materia de partes de las ERNC vienen dados de la construcción de las plantas de generación, salvo en el caso de la concentración solar que también destaca un impacto no menor en su operación. No obstante, los impactos están muy por debajo del carbón, petróleo y gas natural. No es despreciable la inclusión del impacto total de la geotermia, que como se puede observar pese a no poder ser desglosado por hotspots es la tecnología ERNC con mayores impactos en esta materia.



**Gráfico 14:** Acidificación renovables [kg SO<sub>2</sub> eq. /kwh] desglosado por hotspots

**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

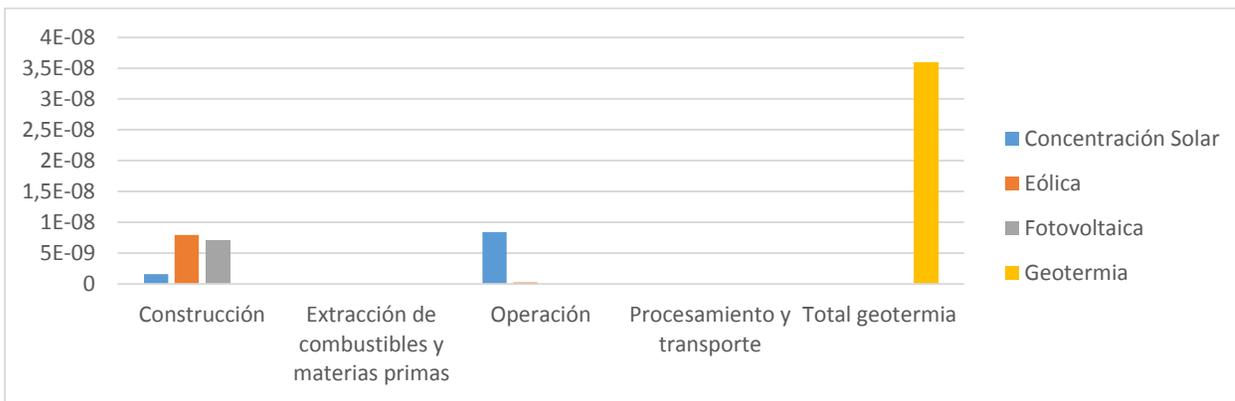
Nuevamente se observan impactos inesperados de la concentración solar en operación. La generación eólica y fotovoltaica tienen sus impactos concentrados en la construcción como se habría previsto.



**Gráfico 15:** Eutrofización renovables [kg Fosfato eq. /kwh] desglosado por hotspots

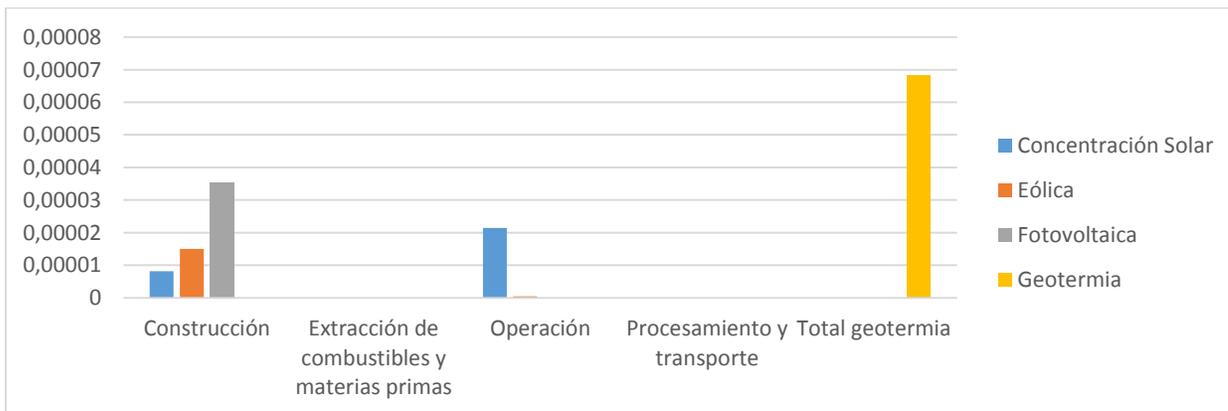
**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

La geotermia nuevamente destaca como la ERNC con mayor impacto para la categoría estudiada. Por su parte, en la construcción es la generación fotovoltaica la que saca peores resultados.



**Gráfico 16:** Agotamiento de la capa de ozono renovables [kg R11-eq. /kwh] desglosado por hotspots

**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

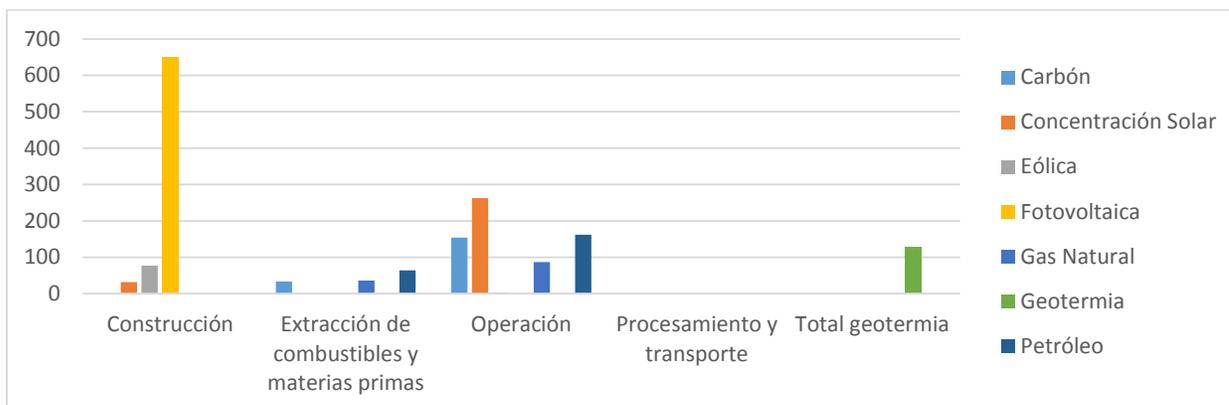


**Gráfico 17:** Smog fotoquímico renovables [kg Etileno-eq. /kwh] desglosado por hotspots

**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

Tanto para el agotamiento de la capa de ozono como para la generación de smog fotoquímico la geotermia vuelve a mostrar los peores resultados agregados, no obstante, estos resultados son despreciables en comparación a las tecnologías en base a carbón. Esta diferencia se produce principalmente por las emisiones antropogénicas emitidas en el proceso de extracción de tierras para la construcción de la planta, que destruyen el ozono

estratosférico. Las sustancias causantes de este problema son los clorofluorocarbonos (CFC's) y los óxidos nitrosos (NOX).



**Gráfico 18:** Consumo de agua [L/kwh] desglosado por hotspots

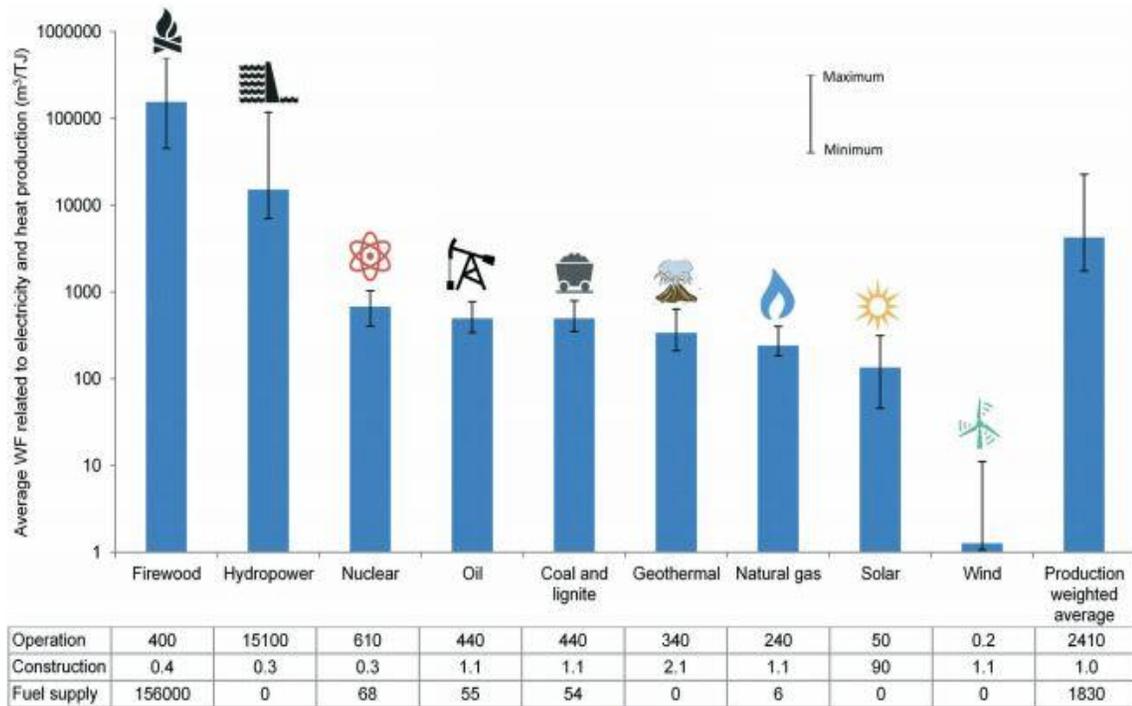
**Fuente:** Confección propia, basada en estudios internacionales.

La construcción de los paneles de silicio de las plantas de generación fotovoltaica es muy intensivo en consumo de agua, representando un 90,26% de la totalidad del *hotspot* construcción, también se utiliza una considerable cantidad de agua en el montaje del sistema de producción (8,20%). Sumados, están muy por encima del resto de los *hotspots* de impactos unitarios de la generación unitaria para el sistema modelado.

El resultado aquí citado suena contrario a la opinión generalizada<sup>8</sup> respecto a que la generación fotovoltaica tiene un uso mínimo de recursos hídricos, dado que usualmente sólo se consideran sus impactos en la operación y mantenimiento, donde el lavado de los paneles aparece como el principal flujo crítico alcanzando los 20 galones por Mwh<sup>9</sup>, lo que, manteniendo la consistencia con la unidad funcional acá escogida representa 0,0756 lt de agua por kwh emitido. No obstante, vale la pena recalcar que el impacto aquí presentado, gracias al completo análisis que permite la herramienta de ACV, hace referencia a la construcción de las partes que componen el sistema fotovoltaico y su impacto superior puede ser corroborado por el estudio de Mekonnen et al. [33] del que se desprende la siguiente ilustración explicativa:

<sup>8</sup> <https://cleantechnica.com/2014/03/22/solar-power-water-use-infographic/> - Energía fotovoltaica, ahorradora de agua

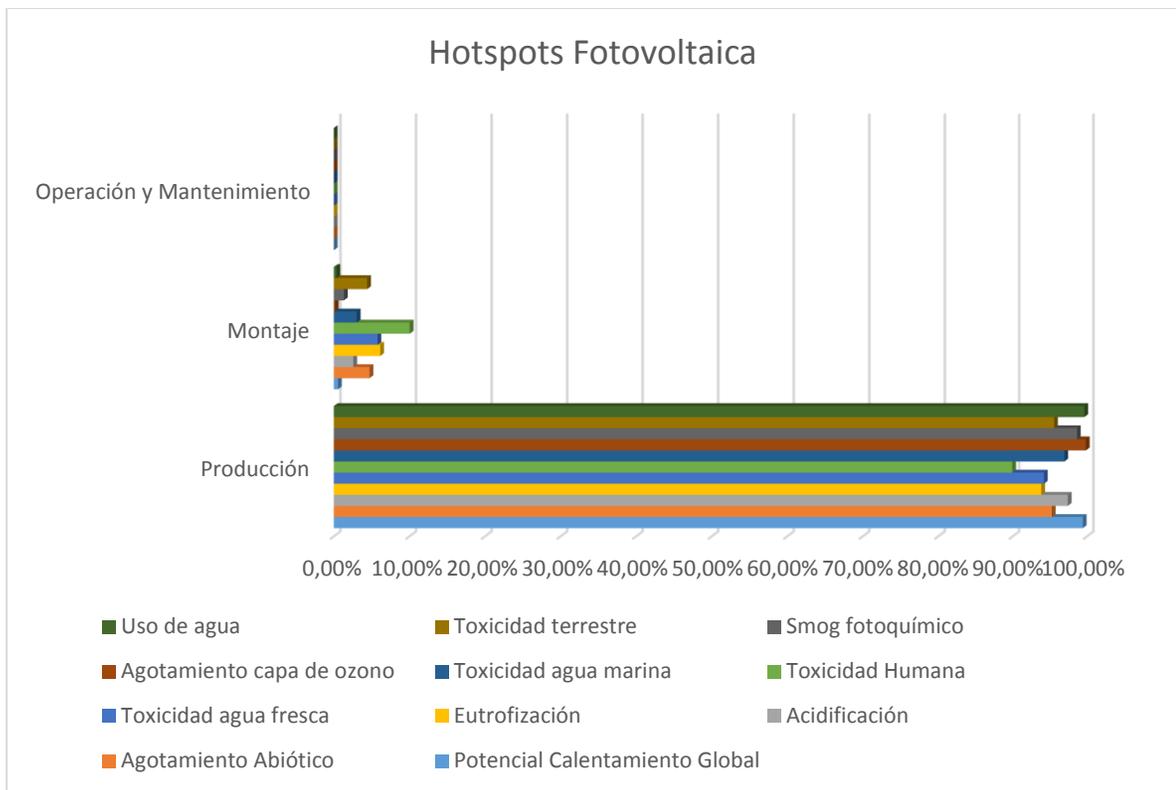
<sup>9</sup> <http://www.seia.org/policy/power-plant-development/utility-scale-solar-power/water-use-management> - SEIA Water Use Management



**Ilustración 10:** Consumo de agua promedio por unidad de electricidad y calor producido para el período entre 2008-2012 mundialmente.

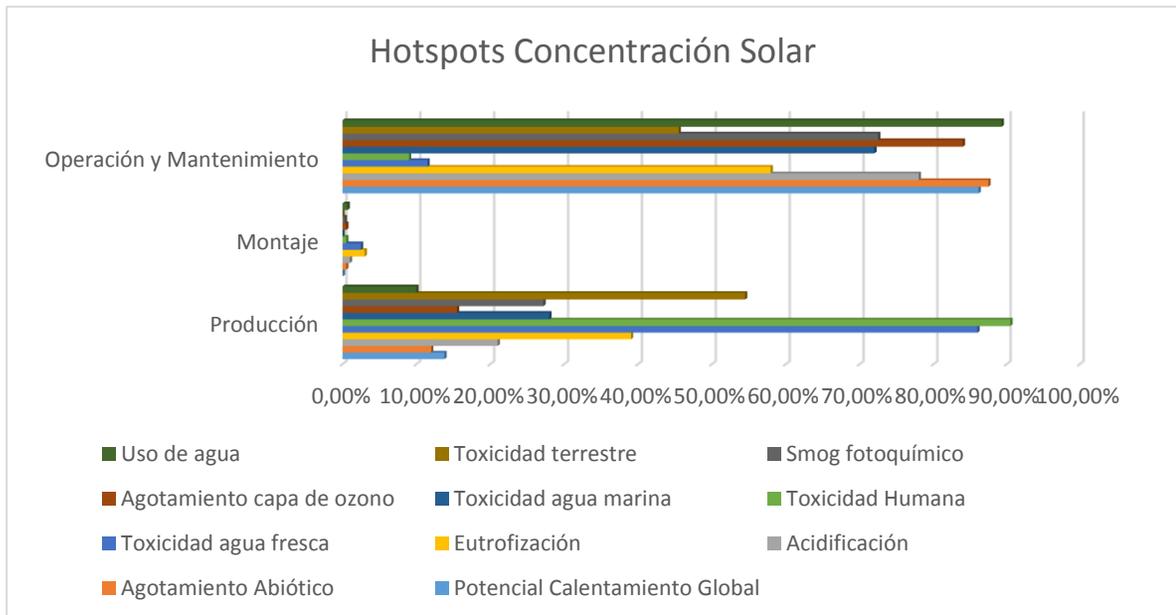
**Fuente:** Mekonnen et al. [33]

Como se había adelantado, el *hotspot* construcción puede ser desglosado en producción y montaje para las ERNC, los gráficos siguientes dan cuenta de esta diferenciación.



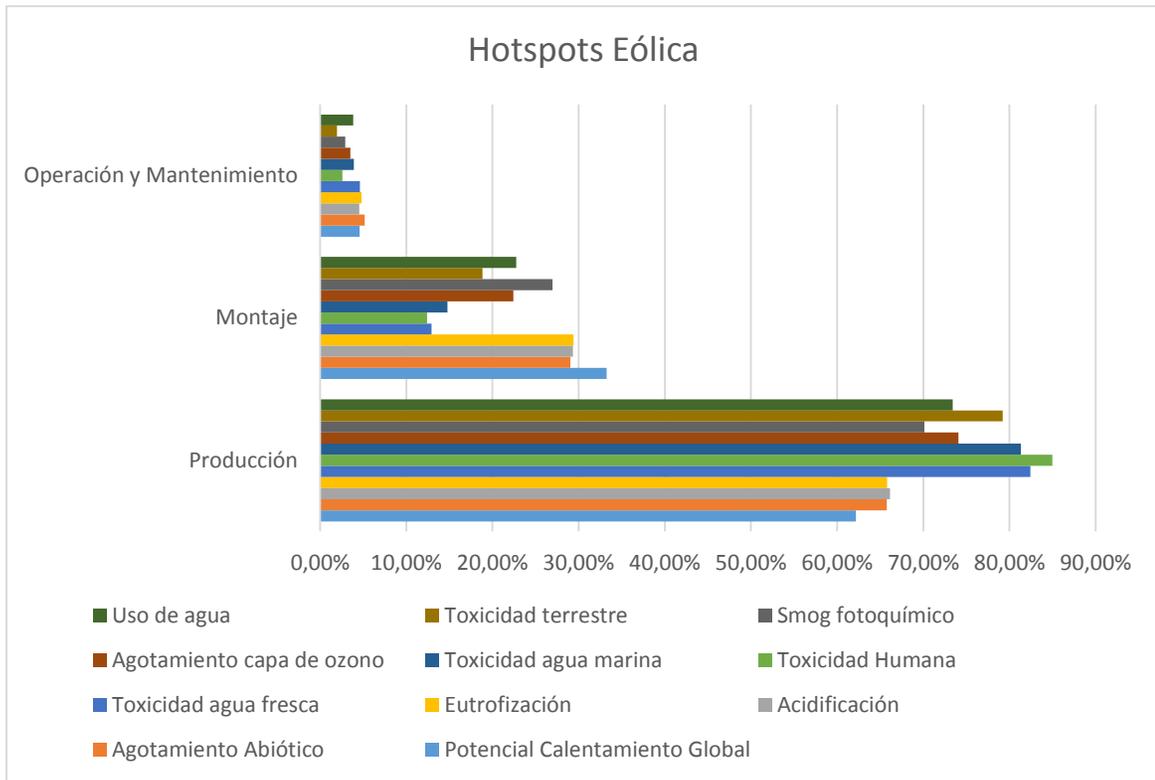
**Gráfico 19:** Hotspots generación fotovoltaica

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 20:** Hotspots generación de concentración solar

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 21:** Hotspots generación eólica

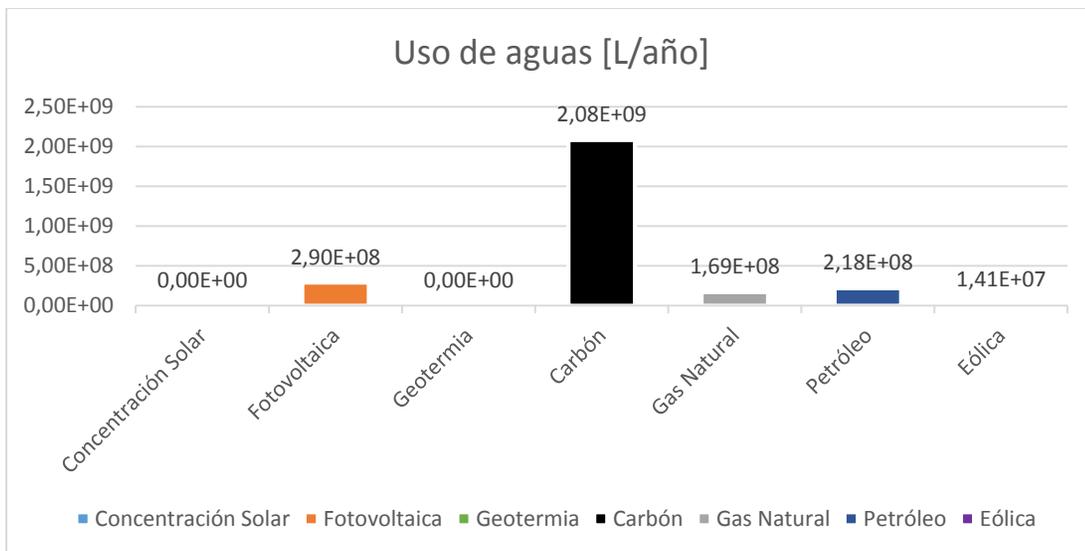
*Fuente:* Confección propia

### 6.3 Impactos ambientales de la generación eléctrica regional

Los impactos ambientales globales vendrán dados de la ponderación entre los impactos unitarios y la generación anual estudiada, ya sea para la actualidad como para los escenarios predictivos obtenidos de los estudios de la Mesa ERNC.

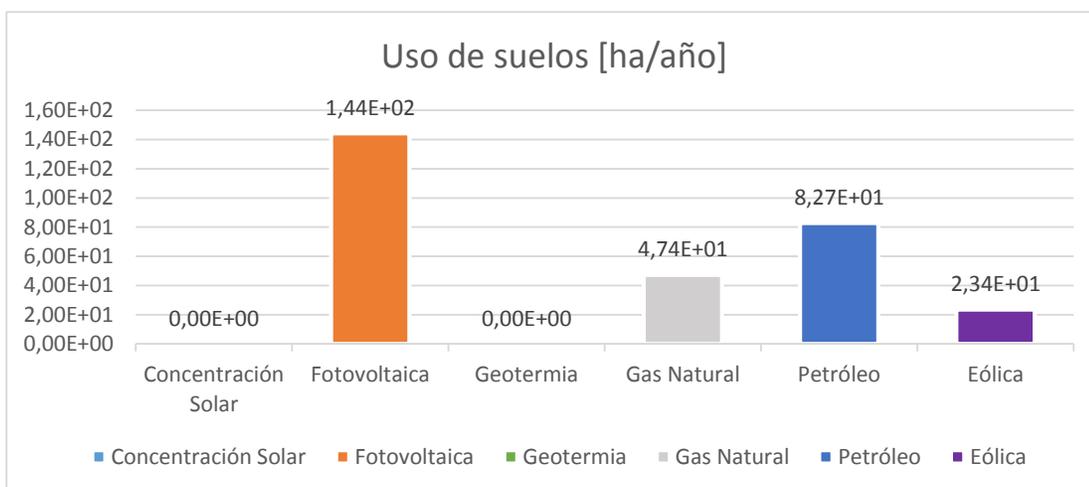
#### 6.3.1 Impactos escenario actual

La tabla con los impactos anuales de la generación eléctrica en Antofagasta se puede encontrar en la sección de Anexos 7; cómo el lector podrá observar en ésta, la alta dependencia de la matriz de generación en la actualidad en combustibles fósiles se ve reflejado en que el carbón sea el principal componente de daño para todas las categorías de impacto muy por sobre el resto. No obstante, a continuación se presentan algunos resultados, aislando el carbón, que podrían ser de interés. Es importante tener en cuenta los porcentajes de generación para la región en el escenario actual (Gráfico 1), dado que estos caracterizan los resultados aquí entregados.



**Gráfico 22:** *Uso de aguas anual, 2016 Antofagasta*

**Fuente:** *Confección propia*



**Gráfico 23:** *Uso de suelos anual, 2016 Antofagasta*

**Fuente:** *Confección propia*

A modo de resumen, en la actualidad en Antofagasta con la matriz altamente dependiente en combustibles fósiles como se ha definido, se están generando los siguientes impactos anuales:

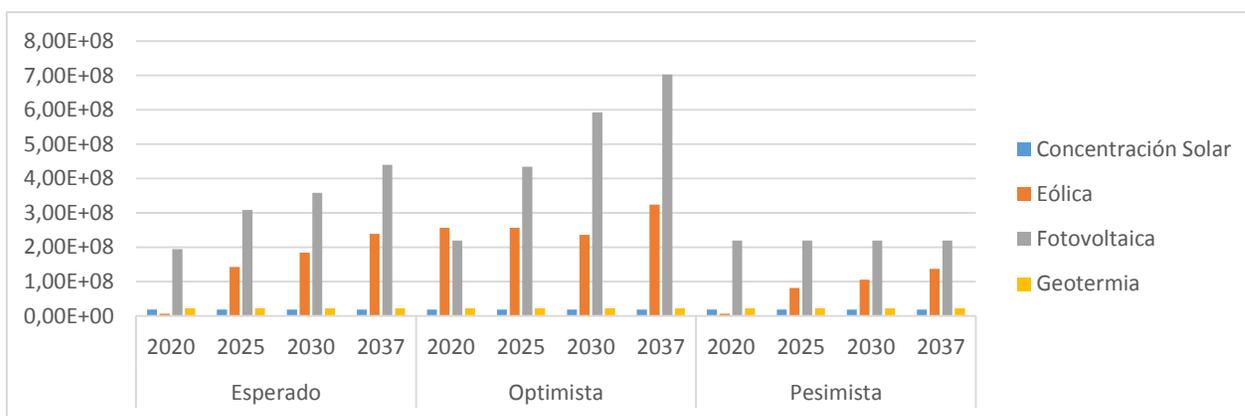
- 1,92 toneladas de Sb equivalente al año [agotamiento abiótico], de las cuales un 32,6% del total corresponden a energías renovables.
- 1,09E05 toneladas de SO<sub>2</sub> equivalente al año [acidificación], de las cuales un 0,15% del total corresponden a energías renovables.
- 4,66E04 toneladas de fosfato equivalente al año [eutrofización], de las cuales un 0,12% del total corresponden a energías renovables.
- 6,10E06 toneladas de diclorobenceno equivalente al año [toxicidad de agua fresca], de las cuales un 0,27% del total corresponden a energías renovables.
- 1,45E07 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año [potencial de calentamiento global], de las cuales un 0,15% del total corresponden a energías renovables.
- 6,90E06 toneladas de diclorobenceno equivalente al año [toxicidad humana], de las cuales un 0,55% del total corresponden a energías renovables.
- 2,86E10 toneladas de diclorobenceno equivalente al año [toxicidad de agua marina], de las cuales un 0,27% del total corresponden a energías renovables.
- 283 kg de R11 equivalente al año [agotamiento de la capa de ozono], de las cuales un 1,18% del total corresponden a energías renovables.
- 5,91E03 toneladas de eteno equivalente al año [smog fotoquímico], de las cuales un 0,31% del total corresponden a energías renovables.
- 3,25E04 toneladas de diclorobenceno equivalente al año [toxicidad terrestre], de las cuales un 1,32% del total corresponden a energías renovables.
- 2,77E06 toneladas de agua utilizadas, de las cuales un 10,97% del total corresponden a energías renovables.
- 4340 ha de suelos utilizados, de los cuales un 3,86% del total corresponden a energías renovables.

### 6.3.2 Impactos escenarios predictivos

En la presente sección de la investigación, se evidenciarán los impactos anuales para el 2020, 2025, 2030 y 2037 dados los 3 escenarios definidos en el marco de la política de Energía 2050 antes declarada.

Nuevamente, dada la gran cantidad de información obtenida de las modelaciones, se presentan únicamente los resultados más interesantes, discutibles y atingentes. El resto pueden encontrarse en la sección de Anexos 9. Los gráficos presentados a continuación presentan resultados globales y su consiguiente análisis posee la misma característica, dejándose de lado el foco regional debido al bajo impacto de las tecnologías analizadas.

Una nueva revisión del Gráfico 2 se hace necesaria para comprender el por qué en determinados escenarios algunas tecnologías pueden aumentar sus impactos. La composición de la matriz energética, para cada año estudiado, determina en gran medida el impacto resultante para cada categoría.



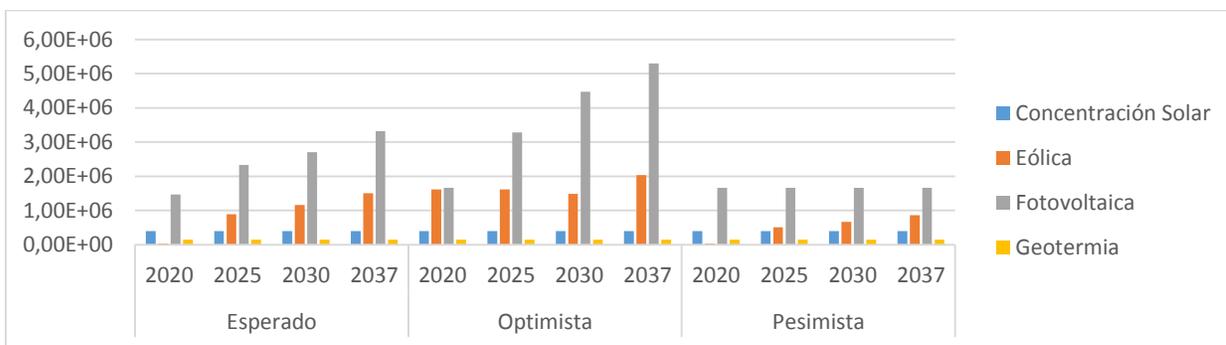
**Gráfico 24:** Potencial de calentamiento global debido a la generación con energías renovables [Kg Co2 eq/ año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia

Como se vio anteriormente en el estudio de los impactos unitarios, la generación a base de quema de combustibles fósiles genera daños considerablemente mayores que las energías renovables. Además, pese a que la tendencia será a la baja, las energías térmicas seguirán dominando los escenarios, sea cual sea el caso; entre 2020 y 2037 para el escenario pesimista se pasará de un 82,86% a un 82,51% de dependencia de generación en base a combustibles fósiles, para el esperado habrá una disminución de 84,15% a un 67,14%, y en el optimista se bajará de un 65,75% a un 55,39%. Es por eso que se ha

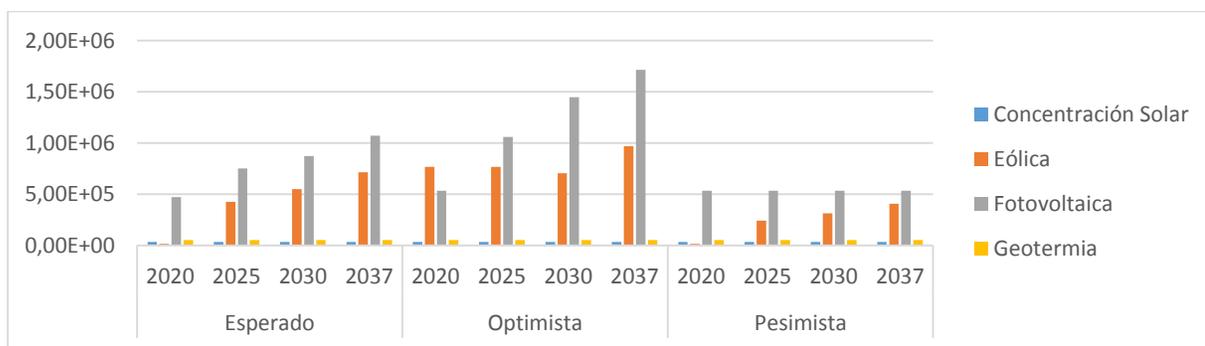
decidido, en los casos que fuese necesario, aislar estas tecnologías a modo de comparar únicamente las ERNC.

Promediando los 4 años estudiados, se observa que la generación fotovoltaica representará un 64,05% de los impactos totales para las ERNC en el escenario esperado, un 61,29% en el optimista y un 64,31% para el pesimista. Ésta es seguida por la generación eólica con una participación promedio en los impactos citados de 28,12%, 33,79% y 24,07% para los escenarios esperado, optimista y pesimista respectivamente. La generación de concentración solar y la geotermia no superarán el 7% del total de los impactos para todos los casos, esto principalmente dado su mínima participación en el total de generación regional.



**Gráfico 25:** Acidificación debido a la producción con energías renovables [kg SO2 eq. /año] impactos globales, para diversos escenarios y años

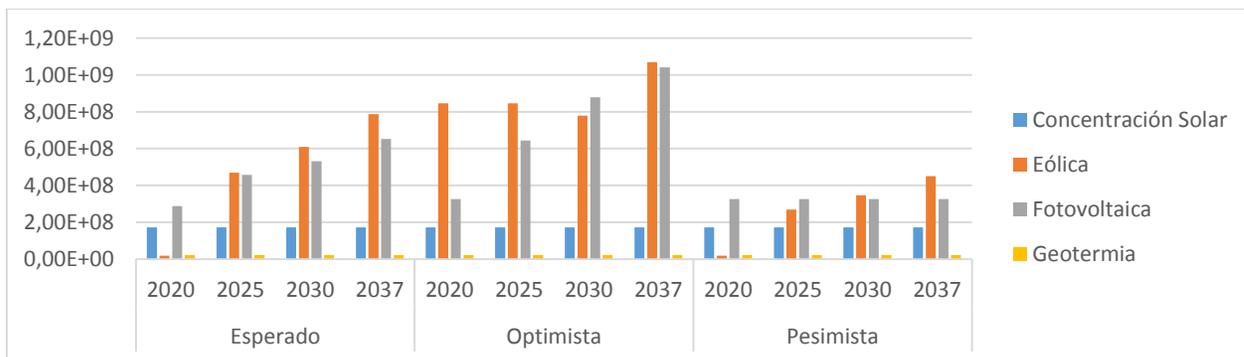
**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 26:** Eutrofización renovables [kg Fosfato eq. /año] impactos globales, para diversos escenarios y años.

**Fuente:** Confección propia

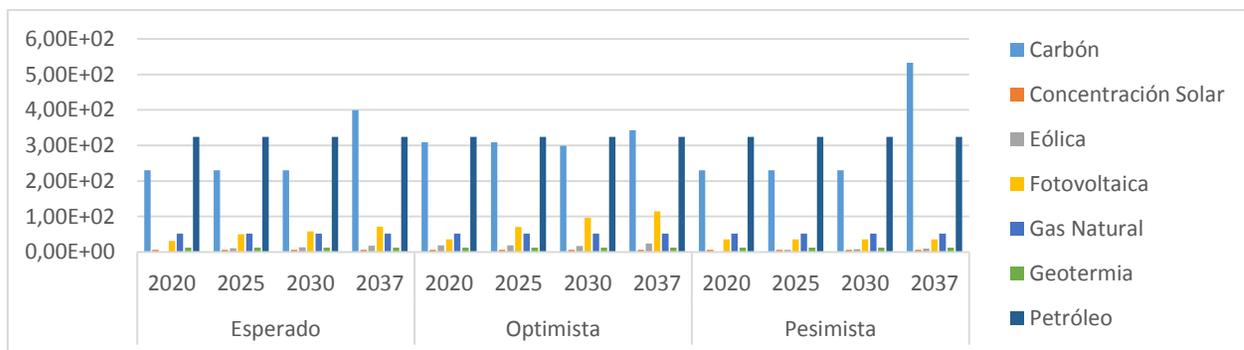
Tanto para la acidificación como para la eutrofización la tendencia es la misma. La generación fotovoltaica y eólica acapararán la mayor cantidad de impactos ambientales provenientes de las ERNC, sea cual sea el escenario. Por ejemplo, para el año 2030 de un total de 3,48E05 ton de SO<sub>2</sub> equivalente dado el escenario optimista, la generación fotovoltaica representará un 1% del total de los impactos (considerando tecnologías en base a carbón), y la eólica comprometerá un 0,43%. Por menores que se vean comparados al carbón, petróleo o gas natural, la generación fotovoltaica y eólica representan entre ambas un 87,86% del total de impactos de las ERNC en acidificación para 2030, dado el escenario optimista.



**Gráfico 27:** Ecotoxicidad humana renovables [kg DCB-Equiv. /año] impactos globales, para diversos escenarios y años

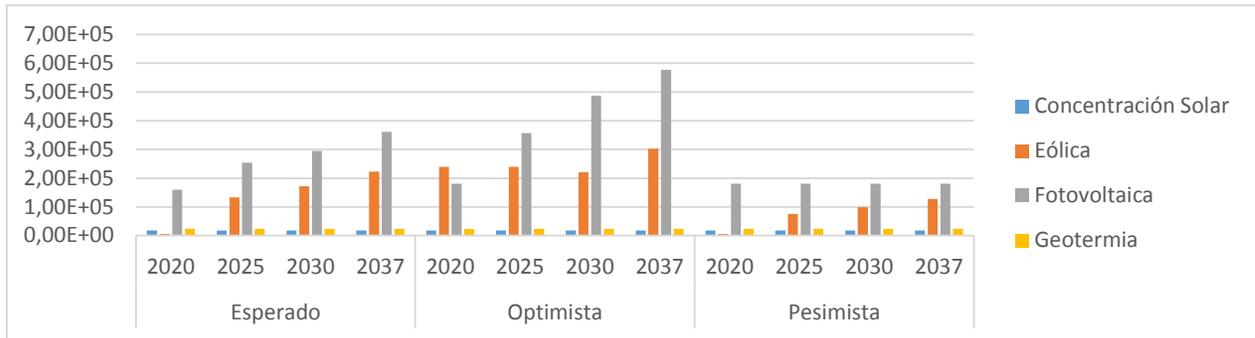
**Fuente:** Confección propia

Se observa que la generación eólica supera los impactos de ecotoxicidad humana de la generación fotovoltaica para cualquier escenario en el año 2037. Los impactos totales de la generación eólica a ese año alcanzarán los 4,51E05 ton de diclorobenceno equivalente para el escenario pesimista, 7,87E05 ton de DCB equiv. en el caso esperado, y 1,07E06 ton de DCB equiv. en el caso optimista.



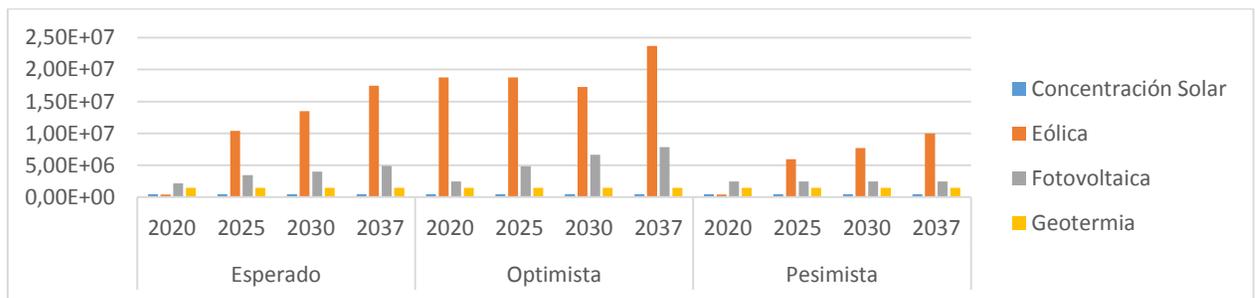
**Gráfico 28:** Agotamiento de la capa de ozono [kg R11-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 29:** Smog fotoquímico renovables [kg Etileno-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

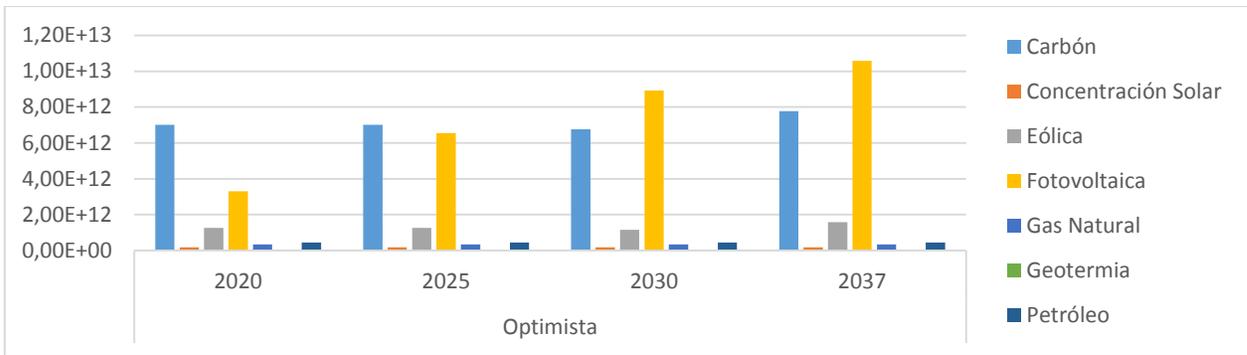
**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 30:** Ecotoxicidad terrestre renovables [kg DCB-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

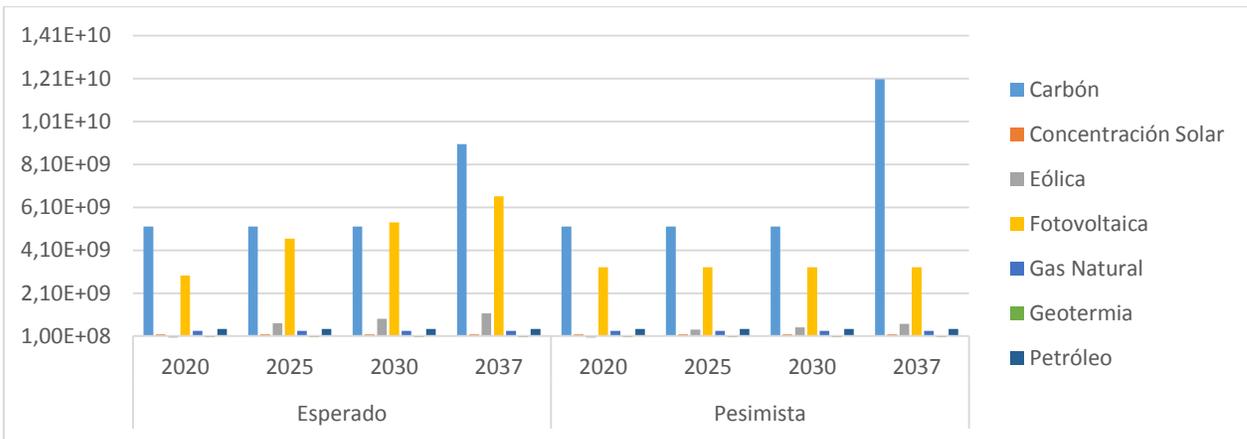
**Fuente:** Confección propia

Pese a ser la tecnología de generación eólica más limpia de las ERNC, de la revisión de los impactos unitarios previamente realizada, en el caso de la toxicidad terrestre los niveles de contaminación podrían ser preocupantes. Incluyendo a carbón, petróleo y gas natural, la generación eólica representará un 5,73%, 10,23% y 15,83% del total de impactos para los escenarios pesimista, esperado y optimista respectivamente, promediando entre los 4 años estudiados.



**Gráfico 31:** Consumo de agua [L/año] impactos globales, para diversos escenarios y años

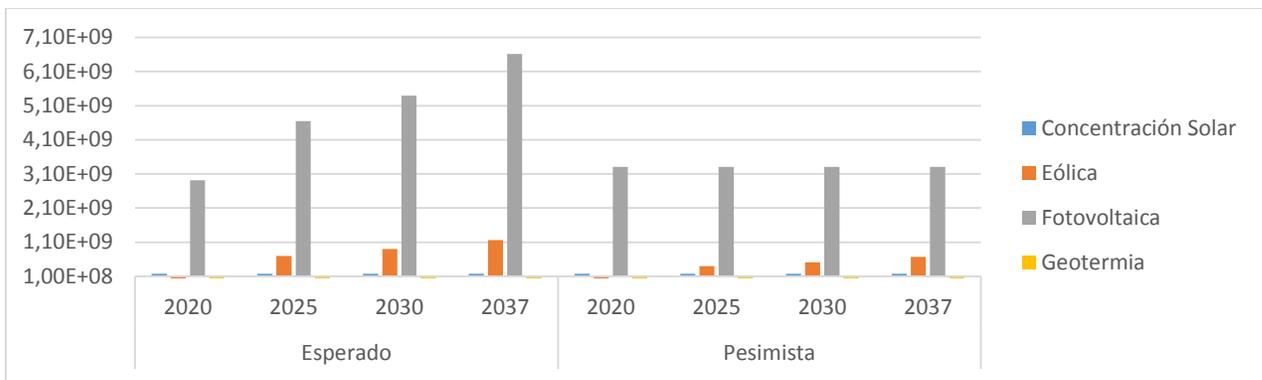
**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 32:** Consumo de agua [L/año] impactos globales, para escenarios esperado y pesimista

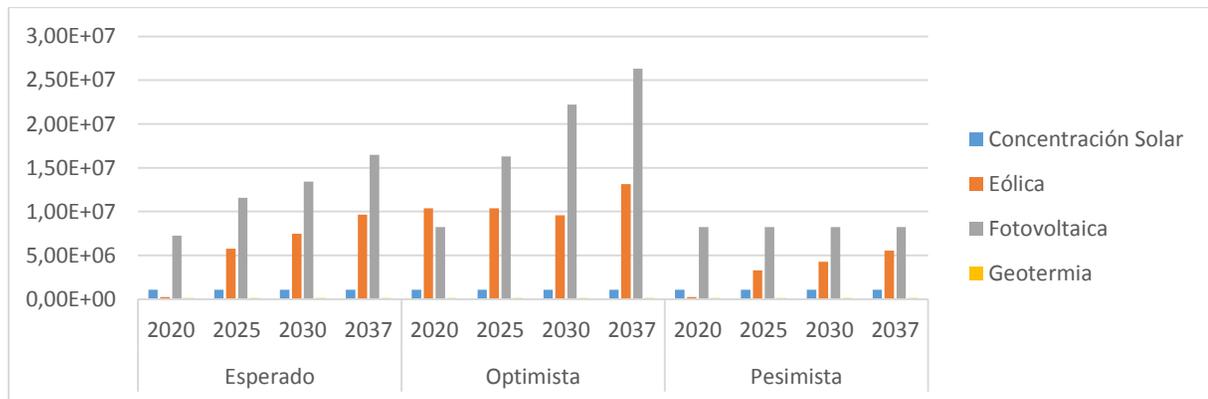
**Fuente:** Confección propia

El escenario optimista ve un ingreso considerable de generación fotovoltaica que ocasiona que las toneladas de uso de agua se disparen, por lo que debieron ser incluidos en un gráfico aparte para no perder las dimensiones de los escenarios esperado y pesimista. La generación fotovoltaica representará casi un 1/5 de la matriz para el 2037 (19,5% de participación), y eso se verá reflejado en que sus impactos superarán incluso al carbón para aquel escenario desde 2030 en adelante.



**Gráfico 33:** Consumo de agua renovables [L/año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



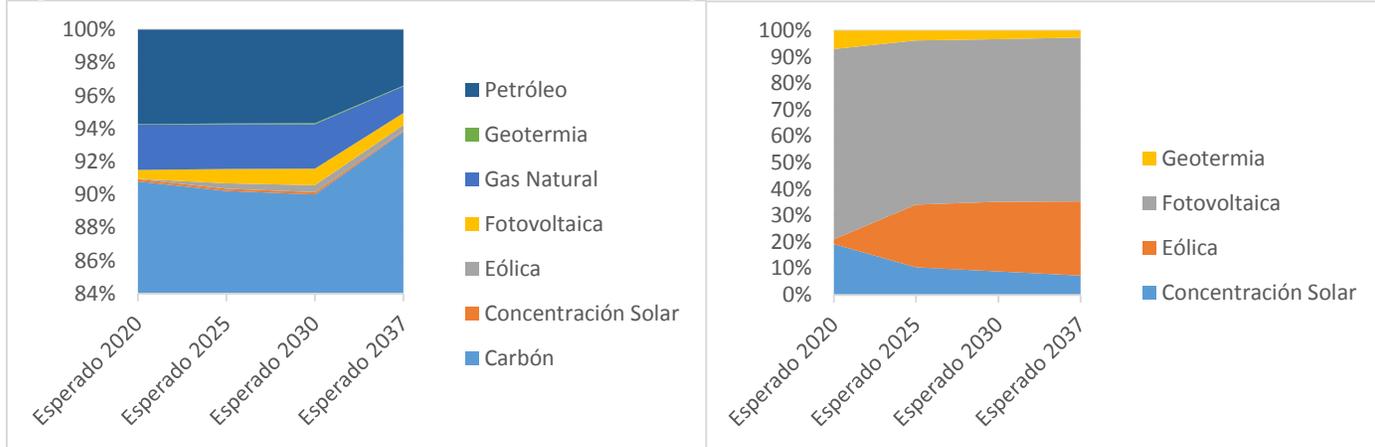
**Gráfico 34:** Uso de suelos renovables [m2/año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia

En el escenario pesimista para 2037 se utilizarán 13358 ha por concepto de uso de suelos, así como 11658 ha para el esperado y 11752 ha en el caso optimista. Si bien, la mayoría de los daños provienen de la generación en base a carbón, de hecho ahí radica el mayor impacto del escenario pesimista (82,71% del total de impactos provenientes del combustible fósil), la generación fotovoltaica es responsable de un 14,12% del total de los impactos al 2037 para el escenario esperado e incluso un 22,39% en el escenario optimista.

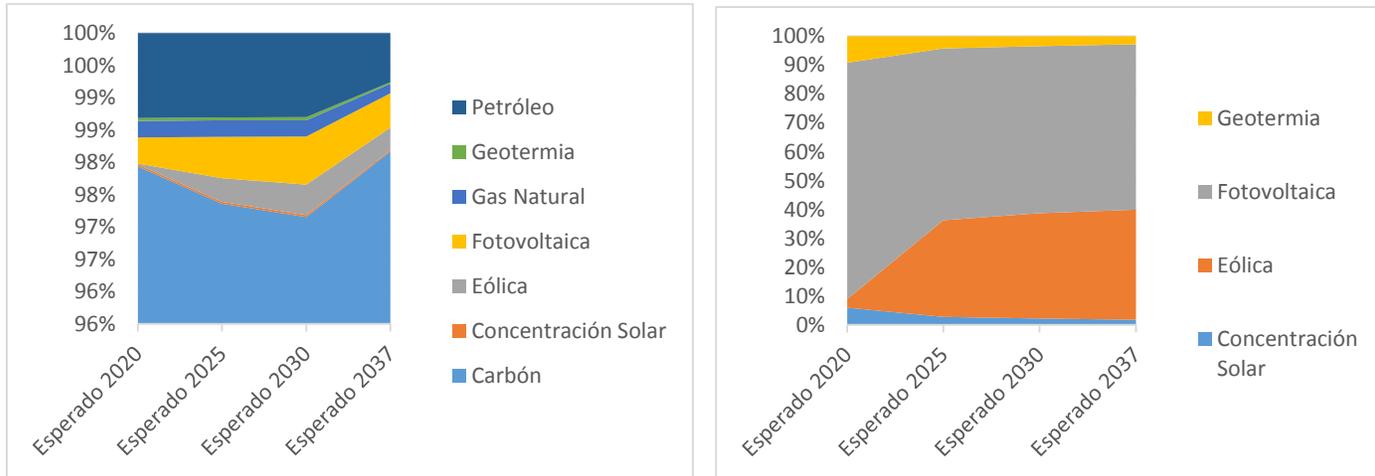
### 6.3.3 Discusión impactos escenario esperado

A modo de desglosar de mejor manera los impactos provenientes de cada tecnología, para cada año estudiado, se presentan a continuación los obtenidos del escenario esperado individualizados. Nuevamente, dada la gran cantidad de información encontrada, se adjunta en la sección de Anexos 12 el resto de impactos obtenidos.



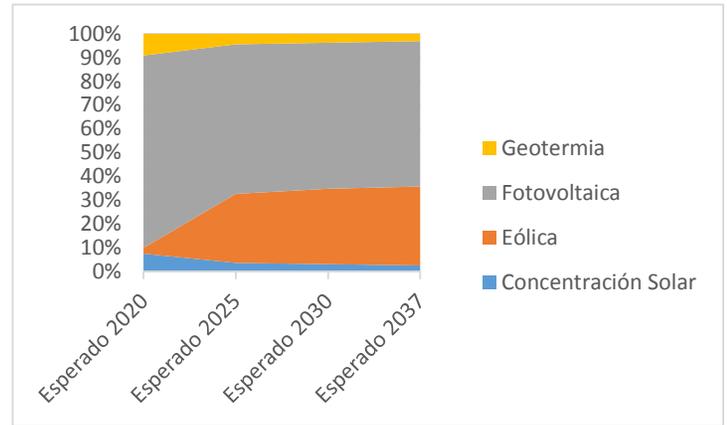
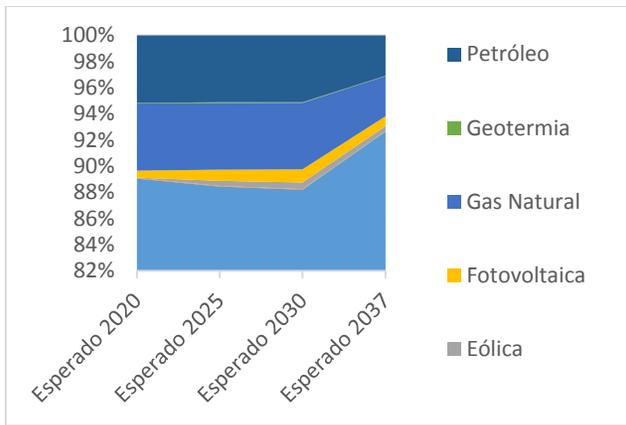
**Gráfico 35:** Impactos anuales acidificación escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



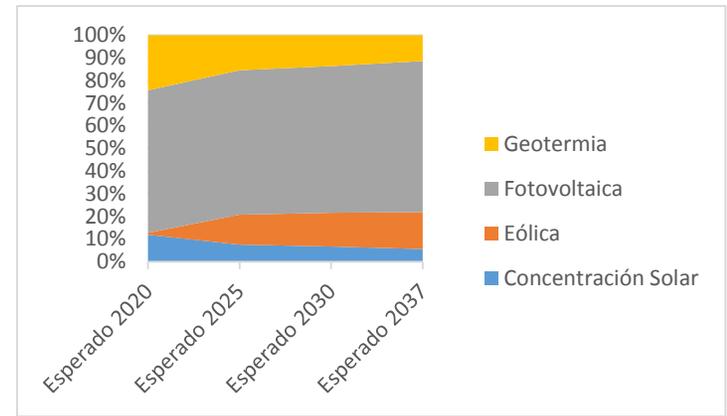
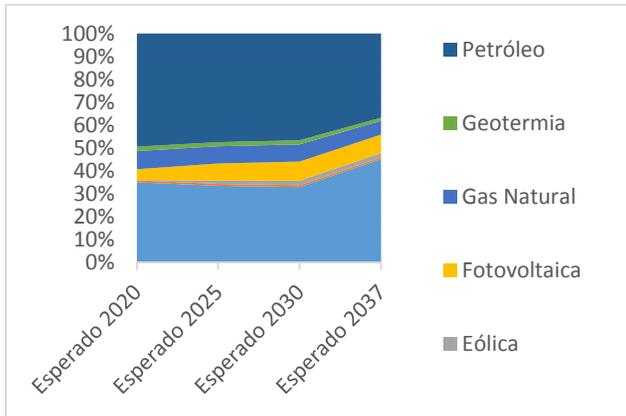
**Gráfico 36:** Impactos anuales eutrofización escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



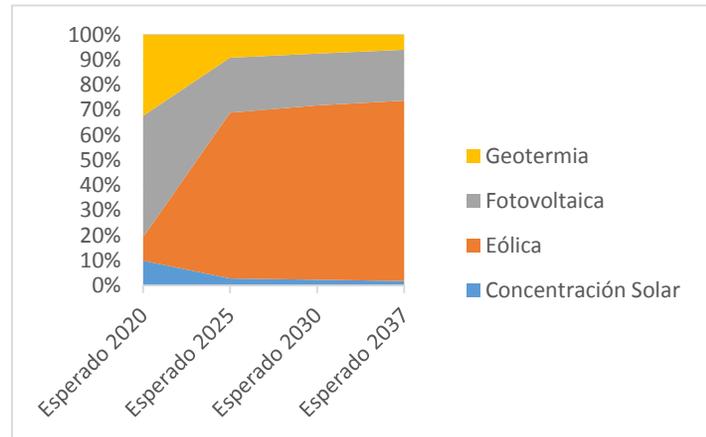
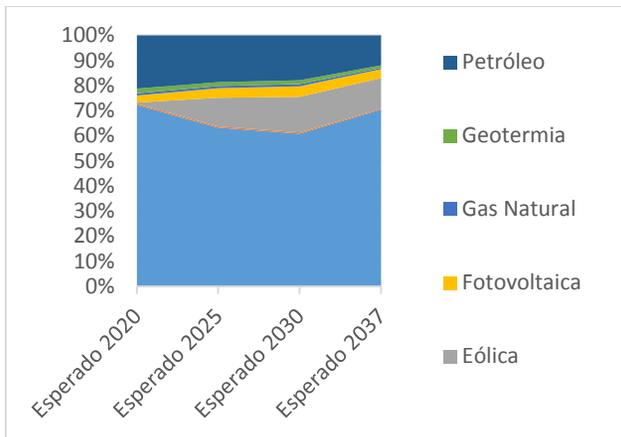
**Gráfico 37:** Impactos anuales potencial de calentamiento global escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



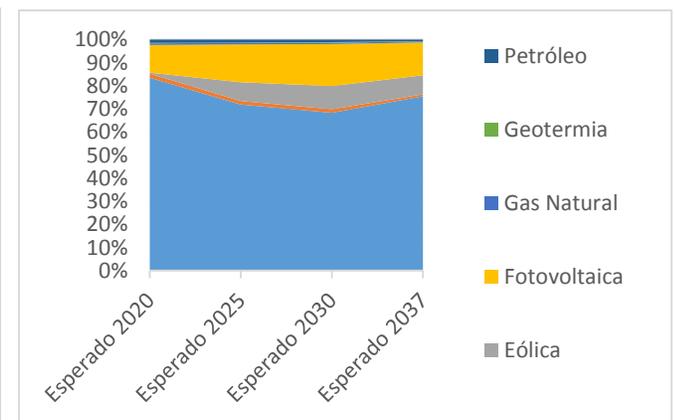
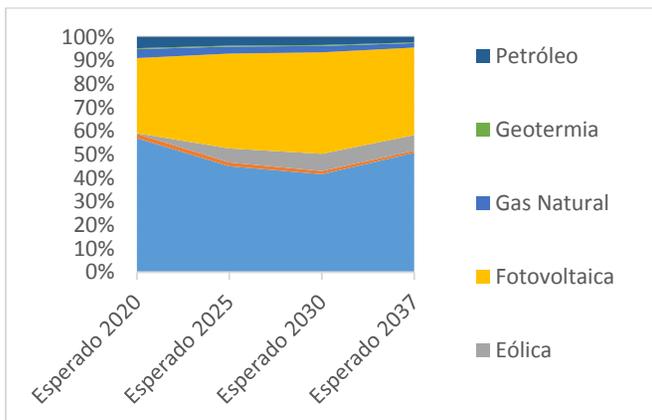
**Gráfico 38:** Impactos anuales agotamiento de la capa de ozono escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 39:** Impactos anuales toxicidad terrestre escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 40:** Impactos anuales escenario esperado uso de aguas (izq.) y uso de suelos (der.)

**Fuente:** Confección propia

Se presenta un resumen y discusión para cada tecnología de los resultados obtenidos:

- **Carbón:** Es con creces la tecnología más invasiva para el medioambiente, y coincidentemente también la con mayor presencia en la matriz de generación, representando un 72,04% del total al 2020, para luego terminar en un 61,22% al 2037. Es la que genera más impactos ambientales para casi todas las categorías de impacto en todos los años estudiados, salvo en el caso del agotamiento de la capa de ozono donde es superado por el petróleo para los años 2020, 20205 y 2030, donde de todas formas representa un 35,01%, 33,55% y 33,01% de los impactos totales respectivamente. Otra categoría en que se ve superada es el agotamiento abiótico, pero como ya se ha aseverado anteriormente, ésta presenta problemas en

sus resultados por lo que no debiese ser considerada como un resultado válido. Para el año 2030 se utilizarán 1,25E07 toneladas de agua para el concepto generación eléctrica en Antofagasta, de los cuales un 41,65% de los impactos totales corresponderán al carbón, siendo levemente superado por la generación fotovoltaica con un 43,17%. El carbón será responsable para el año 2037 de la generación de 4,25E05 ton de SO<sub>2</sub> equivalente (impacto en acidificación), 1,98E05 ton de fosfato eq., 5,49E07 ton de CO<sub>2</sub> eq., 2,2E04 ton de etileno eq., entre otros impactos al medioambiente. Además, el ciclo de vida de la generación eléctrica en base carbón utilizará 8830 ha anuales de suelos al 2037, lo que corresponde a un 75,5% del total de uso de suelos para la generación eléctrica en la región a ese año.

- **Petróleo:** Al igual que el carbón, al ser un combustible fósil que debe quemarse para generar energía, produce fuertes impactos medioambientales, principalmente en su fase operativa. Entre 2020 y 2037, la matriz de generación eléctrica produce entre 0,656 y 0,882 toneladas de R11 equivalente, responsable del agotamiento de la capa de ozono, de las cuales el petróleo es responsable en un 49,41%, 47,35%, 46,59% y 36,73% para los años 2020, 2025, 2030 y 2037 respectivamente. Otra categoría con alto impacto del ciclo de vida de generación eléctrica a base de petróleo para Antofagasta es la toxicidad terrestre. Sin ir más lejos para el 2020 de las 8E04 ton de diclorobenceno equivalente generadas por la generación eléctrica, el 21,19% proviene del petróleo. Para los años 2025, 2030 y 2037 el porcentaje de impacto sobre el total del petróleo para esta categoría de impacto es del 18,58%, 17,86% y 11,9% respectivamente. Como intuirá el lector, la generación eléctrica en base a petróleo irá disminuyendo con el correr de los años (i.e. pasará de un 5,02 en 2020 a un 2,45% en 2037), y por consiguiente sus impactos también, esto en justa armonía con lo establecido en la política Energía 2050. Otras categorías como generación de smog fotoquímico (entre 4,03% y 6,74%), potencial de calentamiento global (entre 3,08% y 5,15%) o acidificación (entre 3,4% y 5,72%) reciben impactos considerables provenientes del petróleo.
- **Gas Natural:** Otra tecnología en base a combustibles fósiles, si bien posee impactos considerables, son menores a sus pares petróleo y carbón, principalmente dado que pasará de un 7,1% de participación en 2020 a un 3,47% en 2037. El gas natural tendrá un impacto estático anual de 1,81E06 ton anuales de CO<sub>2</sub> equivalente entre 2020 y 2037, gases que inciden directamente en el potencial de cambio climático, si bien para el escenario esperado no entran nuevos proyectos de esta tecnología tampoco salen los presentes desde 2020 en adelante. No obstante, la tendencia internacional, posterior a lo pactado en la COP21, dice que el gas natural podría reemplazarse en las plantas por biocombustibles lo que disminuiría ostensiblemente estos impactos, comprendiendo que en su mayoría provienen de la fase operativa. El gas natural generará anualmente 52,1 kg de R11 eq. en el período estudiado, que representan el 7,94%, 7,61%, 7,49% y 5,9% para los años 2020, 2025, 2030 y 2037 respectivamente. En el caso de la generación de smog fotoquímico, se generarán por el concepto de esta tecnología 655 ton de etileno equivalente anuales que representan un 4,52% en 2020 y disminuirán gradualmente a un 2,7% del total de impacto de la matriz de Antofagasta para el 2037. El gas natural producirá también impactos significativos en acidificación (entre un 1,62% y un 2,72%) y en el uso de aguas (3,7% en 2020 disminuyendo hasta un 1,9% para 2037).

- **Eólica:** La generación eólica tendrá un aumento explosivo en su presencia regional, pasando de un ínfimo 0,91% a representar casi 1/5 de la matriz para 2037 (18,35%). Este crecimiento en el uso de la tecnología se verá reflejado también en sus impactos ambientales, donde destaca la toxicidad terrestre. Para el 2020 la tecnología generará 424 ton de diclorobenceno eq. (0,53% del total), pero crecerá a representar un 11,39% para el 2025, 14,22% al 2030, llegando a producir para 2037 un total de 17400 ton de diclorobenceno eq., aproximadamente 41 veces más de lo que producirá en 2020. Su uso de aguas también será intensivo, llegando a un total de 1,16E06 ton anuales para el 2037, un 6,54% del total. En el caso del uso de suelos alcanzará su máxima participación, negativa por cierto, en los impactos producidos por esta categoría para 2030 donde representará un 10,09% del total, con 747 ha utilizadas a lo largo de su ciclo de vida. Las categorías de toxicidad humana y toxicidad de aguas frescas también presentan impactos eólicos considerables.
- **Fotovoltaica:** Para el 2020 su presencia será de un 11,63% del total de la matriz, llegará a un 12,89% al 2037 no sin antes tener un peak de participación el 2030 representando un 15,58% del total. Como ya se ha explicado anteriormente en esta investigación, el proceso de elaboración de los paneles de silicio es muy intensivo en uso de agua. Eso se verá claramente reflejada en las 6,61E06 ton utilizadas en el ciclo de vida de la generación fotovoltaica para el 2037, que representarán un 37,14% del total. Más aún, para el año 2030 el uso de agua alcanza el 43,17% del total de los impactos, superando incluso a la generación en base a carbón, una tecnología que por lo demás representa el 50,2% del total de la región para ese año. Este es particularmente un resultado inesperado antes de comenzar este estudio, y no deja de ser sorprendente, y preocupante a nivel global, comprendiendo que la escasez de agua es un problema futuro latente<sup>10</sup>. No obstante, la generación fotovoltaica también produce importantes daños ecológicos en la categoría de uso de suelos, utilizando entre 726 ha en 2020 y 1650 ha en 2037. Este impacto a lo largo del ciclo de vida de la tecnología representa un 11,98% al 2020, 16,41% al 2025, 18,13% al 2030 y 14,12% en 2037. En el caso de la toxicidad terrestre, toxicidad humana y agotamiento de la capa de ozono la generación fotovoltaica también genera impactos significativos.
- **Concentración solar:** La concentración solar es una tecnología entrante en la región, que tendrá a lo largo de los años estudiados una participación cercana al 1%, llegando a su máximo para el 2020 con un 1,55% del total. El resultado que llama inmediatamente la atención es el considerable impacto en la categoría de agotamiento abiótico donde incide en el 98,9% de las 873 ton de Sb equivalente emitidas para 2020. Su participación a lo largo de los años venideros disminuirá levemente siendo un 98,24%, 97,98% y 97,38% para 2025, 2030 y 2037. Sin embargo este resultado genera dudas respecto a lo observado en la bibliografía asociada, que lamentablemente tampoco es capaz de esclarecer al respecto (i.e agotamiento abiótico es una categoría aún poco utilizada en ACV para generación eléctrica). Es preferible dejar esta categoría de impacto bajo observación,

---

<sup>10</sup> <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

entendiendo que el resultado está sobredimensionado. Los impactos de la concentración solar para las otras categorías representan menos del 1% para todos los años estudiados a excepción de uso de aguas y uso de suelos donde se obtienen resultados en el rango de 1-2%.

- **Geotermia:** En el presente estudio, y para todos los escenarios proyectados, sólo se ha sumado un nuevo proyecto de geotermia, el ya antes nombrado Cerro Pabellón. La generación de este proyecto le permite representar un 1,76% del total de generación para 2020, disminuyendo a un 0,86% para 2037. En la categoría de agotamiento de la capa de ozono, la geotermia generará 12,2 kg de R11 equivalente al año, que representarán un 1,86% del total emitido al 2020 disminuyendo a un 1,39% para 2037. Por su parte, el ciclo de vida de Cerro Pabellón generará 1460 ton de diclorobenceno equivalente anualmente en el período 2020-2037.

## 7 CONSOLIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En la presente investigación se ha hecho, en el marco de la herramienta de análisis de ciclo de vida, una adaptación de aquella metodología a modo de poder comparar los impactos regionales de la generación eléctrica en Antofagasta. Esta adaptación al modo convencional de un ACV se debe principalmente a la inexistencia de un inventario local que permita precisar con datos regionales los impactos estudiados. No obstante, la metodología es consistente y como se ha mostrado en secciones anteriores, permite obtener resultados decisivos respecto a qué tecnologías pueden ser preferidas ante otras si se quieren mitigar determinados impactos ambientales. A continuación se presenta paso por paso la metodología seguida, a modo de poder replicarla a otras regiones del país:

1. Definición del escenario actual de la región estudiada, comprensión de la matriz de generación eléctrica presente.

Tanto para el SING como para el SIC existe información en línea, actualizada mensualmente, respecto a la potencia y energía generada tanto a nivel regional como país. Es de esperar, que la interconexión del sistema de transmisión sólo aporte y nutra estos esfuerzos de información. Definir el escenario presente del estudio que se quiera llevar a cabo dependerá fuertemente del acceso a información entregado, ya sea por entidades públicas como por los propios generadores, de los que se esperaría comiencen a facilitar el acceso a información.

2. Generación de escenarios prospectivos para la región estudiada.

Como se había declarado en secciones anteriores, la información recaba de la Mesa ERNC son prospectos a nivel nacional hasta el 2037, no obstante, las bases pueden ser filtradas teniendo claridad de cuáles son las características de los proyectos entrantes a la región a estudiar, sus capacidades de generación y tecnología. Particularmente útil podría ser el portal del SEIA, que en esta investigación fue contrastado inicialmente únicamente para contrastar la información recabada de las bases de datos del CDEC-SING, donde el usuario puede encontrar tanto los proyectos ya aprobados como los que están a la espera de su confirmación por parte del servicio evaluador.

De información privada podrían generarse también series de tiempo para la disminución esperada en los costos de producción energética (curvas de abatimiento de costos) o bien análisis Input/Output que podrían enriquecer los escenarios a futuro.

3. Inventario de ciclo de vida para las tecnologías estudiadas mediante bases de datos consolidadas, como la aquí utilizada Ecoinvent.

El inventario del análisis de ciclo de vida es la actividad más intensiva en tiempo para un estudio de éste tipo. Tal como en éste estudio puede simplificarse la tarea usando bases de datos consolidadas como Ecoinvent, no obstante, el estudio pierde

en precisión dado que las modelaciones serán aproximaciones internacionales y no basadas en información local. Modelar la producción de electricidad con una perspectiva de análisis de ciclo de vida requiere, a lo menos, un registro de las proporciones de energía generadas por cada tecnología, su infraestructura, su producción energética, tiempo de vida, distancia de transporte de los recursos naturales y la extracción de recursos.

Dado la cantidad de generadores y tecnologías comparadas, la obtención de información precisa de cada proveedor se torna una tarea compleja. Se debe avanzar hacia tener bases de datos nacionales que faciliten los cálculos de flujos de entradas y salidas.

4. Modelación de la matriz en software de ACV (aquí se ha utilizado GaBi, pero podría ser también SimaPro, OpenLCA, entre otros).

Es de particular importancia corroborar la compatibilidad entre la base de datos requerida y el software de ACV a utilizarse. El software GaBi posee buena usabilidad y es bastante intuitivo, no obstante requiere de una adaptación que el software simplifica al entregar manuales y videos explicativos de cómo utilizar la herramienta.

Si bien OpenLCA cumple su promesa de ser abierto, gratuito y de bases de datos colaborativas, para un estudio general con muchos procesos y flujos como el aquí presentado se torna difícil preferirlo por sobre los otros softwares.

5. Cálculo de impactos unitarios.

Los resultados obtenidos de la herramienta de ACV para las tecnologías presentes en la generación permitirán obtener impactos unitarios. Éstos al ponderarse por la generación anual para el escenario actual y los predictivos caracterizados según la información de la Mesa ERNC permitirán obtener impactos globales, vale decir indiferenciables entre la región estudiada y otras.

6. Caracterización de *hotspots*

El proceso se realiza mediante la *clusterización* de flujos de entrada y salida por procesos.

No obstante, podría no existir esa información para la base de datos utilizada, en ese caso se recomienda la generación de *hotspots* a partir de bibliografía consistente con unidad funcional, alcances y objetivos del estudio, como se realizó en la investigación aquí presentada.

7. Diferenciación espacial, a través de la revisión de *hotspots* que permita caracterizar los impactos como globales y locales.
8. Ponderación de generación anual con impactos unitarios, obtención de impactos anuales para cada categoría de impacto.

9. Cálculo de impactos anuales para escenarios prospectivos.
10. Comparación de escenarios y recomendaciones.

## 8 CONCLUSIONES

### 8.1 Conclusiones del trabajo realizado

De una revisión de los objetivos específicos planteados al comienzo de la investigación se puede concluir lo siguiente:

En la actualidad, el parque de generación eléctrica de Antofagasta está alejado de las metas impuestas por el país según la política Energía 2050. La alta dependencia en combustibles fósiles, que asciende en la actualidad al 95,6% del total de la matriz de la región está generando importantes impactos medioambientales como se estudió en la sección “9.3.1 Impactos Escenario Actual”. En ese sentido surgen oportunidades para reemplazar los proyectos que estén prontos a finalizar su vida útil por generación de menos impacto a través de tecnologías renovables. Otra oportunidad que surge de esta matriz altamente dependiente en la quema de combustibles fósiles es la de reemplazar éstos por biocombustibles, pellets orgánicos, entre otros.

Generar el inventario de un análisis de ciclo de vida es una tarea complicada, que puede ser muy intensiva en tiempo y esfuerzos y en general, requiere del trabajo de un equipo o bien para ACV de productos o servicios más acotados la disponibilidad de una base de datos de las entradas y salidas de flujos para todos los procesos estudiados. Comprendiendo que la generación eléctrica es un marco de estudio muy amplio, en el presente estudio se utilizó la base de datos Ecoinvent que si bien no posee las modelaciones más actualizadas y precisas a la región estudiada si permite dar un buen acercamiento de los impactos ambientales en los que se está incurriendo. En ese sentido, una tarea importante a nivel país sería el generar un inventario nacional de impactos, que permita medir con precisión los impactos locales al tener información asociada a los proyectos específicos presentes en la región estudiada. Para ello, tanto privados como el sector público y todos los *stakeholders* involucrados debiesen aunar esfuerzos comprendiendo que un análisis detallado de las entradas y salidas de flujos beneficiaría a todos. Sin ir más lejos, algunos desechos industriales pueden ser flujos de entrada para otras industrias, de existir el antes citado inventario nacional sería más fácil generar el *matching* que permitiese avanzar hacia una colaboración simbiótica.

De la inspección y comparación de los escenarios prospectivos se observa que en la mayoría de las categorías de impacto la tendencia sigue siendo la misma, el uso de combustibles fósiles acapara la mayor parte de los daños ambientales. No obstante, el crecimiento de la producción energética fotovoltaica y eólica traen consigo un aumento en ciertos impactos que previo al estudio no eran del todo esperados. Por ejemplo, para la energía solar se observan impactos de la cuna a la puerta considerables en el uso de aguas, incluso mayores que la generación en base a carbón. Según los escenarios estudiados, la generación fotovoltaica representará un 28,46% para el escenario pesimista, un 38,39% en el esperado y un 43,73% para el caso optimista. Esto podría ser preocupante a nivel global, no local como hemos

visto ya que los impactos fotovoltaicos vienen dados casi en su totalidad en la fabricación de las piezas que componen la central, especialmente dado el agotamiento de recursos hídricos a nivel mundial. La toxicidad terrestre aumenta ostensiblemente con el aumento de la participación de generación eólica, y eso debe ser comprendido por los *stakeholders* involucrados, en particular si hay comunidades cercanas que podrían verse afectadas (hasta un 15,83% para el escenario optimista). También el uso de suelos es una categoría donde las energías renovables aumentan sus impactos progresivamente, especialmente por el ingreso de generación fotovoltaica y eólica.

Empresas privadas y la gran minería del cobre, ante la escasez presente de agua en la región, está llevando adelante proyectos de desalinización y traslado de agua marina hacia el interior de Antofagasta<sup>11</sup>. Esto podría modificar el carácter de los impactos aquí citados, no obstante, no se debe perder la noción de que el dato aquí entregado corresponde al consumo global del recurso, el cual está concentrado en su mayoría fuera de la región.

Es erróneo que el lector tienda a pensar que la generación en base a concentración solar o geotermia tengan un mejor rendimiento ambiental ya que sus porcentajes de impactos en los escenarios prospectivos sean menores. Esto está directamente relacionado con la baja participación de aquellas tecnologías, ambas con no más de 1 proyecto funcionando de aquí a 2037. No obstante, es relevante para comparar la matriz de generación con otras regiones o territorios. Particular interés debiese generar en los *stakeholders* involucrados la revisión de impactos unitarios de donde se observa que la geotermia tiene el peor rendimiento de las ERNC en las categorías de eutrofización, potencial de calentamiento global, toxicidad terrestre, agotamiento de la capa de ozono y generación de smog fotoquímico. Por el lado de la concentración solar, si bien el modelo ha entregado resultados un tanto sobredimensionados, se deben analizar las categorías de toxicidad humana, uso de suelos y acidificación, dado que estas se han alzado como posibles impactos asociados a la tecnología.

Una de las grandes ventajas de la metodología aquí realizada en desmedro de otros estudios de ACV para generación eléctrica es la diferenciación espacial, que permite identificar respecto a qué impactos quedan en la región de Antofagasta y cuales fuera. De por sí ya existen categorías globales como el potencial de calentamiento global o el agotamiento de la capa de ozono, no obstante, con esta diferenciación se puede saber desde donde se están originando estos impactos mundiales, si desde dentro o fuera de la región. Esta diferenciación ha sido recomendada en estudios internacionales de la materia anteriormente [29].

---

<sup>11</sup> <http://www.revistagua.cl/2016/10/25/comenzo-puesta-marcha-ampliacion-planta-desaladora-norte-aguas-antofagasta/> - Proyecto desalinización de agua

Otras conclusiones obtenidas respecto a la metodología llevada a cabo:

La unidad funcional, para el caso 1 kwh, juega un rol esencial a la hora de relacionar y/o comparar estudios de ACV. De la revisión bibliográfica realizada, esencial para generar los *hotspots*, se encontraron diversos proyectos incompatibles entre ellos principalmente dado que utilizaban otra unidad funcional.

Como sabemos, el mundo es multidimensional, y estudiar una amplia variedad de impactos en una determinada región supone una tarea a nivel de sistemas complejos. En ese sentido, debe existir una herramienta que permita pesar y valorar los impactos y compararlos. Para ello se podrían usar herramientas locales, como los Ecopuntos. Sin embargo, en la presente investigación si bien se intentó utilizar la herramienta propuesta por Fundación Chile, se observó que al ser las categorías de impacto tan dispares en cuanto a las dimensiones de sus impactos, sumado esto a las diferencias entre las unidades de medida utilizadas para cada una de ellas, la herramienta de pesaje, o *weighting* en inglés, de impactos no era efectiva, y por tanto se desistió de su uso en la presente investigación. El *weighting* requiere de la incorporación de valores sociales, políticos y éticos que vienen de una perspectiva local. Esto sería un buen complemento al inventario nacional antes recomendado.

## 8.2 Recomendaciones

Tanto el inventario (LCIA) como el ACV en sí mismo pueden ser utilizados de forma indebida y/o malinterpretados. Para prevenirlo se recomienda:

- Decisiones metodológicas deben ser descritas de forma transparente y el foco del ACV debe estar definido claramente.
- Toma de decisiones coherentes respecto a los límites del sistema y la elección de los inventarios del ACV a modo de reducir la brecha entre lo modelado y la realidad. Se debe avanzar a inventarios de ciclo de vida que reflejen las condiciones locales y el foco temporal del estudio.
- La herramienta de ACV se debiese de rigidizar a modo de contener la libertad de interpretación de decisiones metodológicas claves que pueden llevar a decisiones subjetivas. Esta es una de las principales fuentes de incompatibilidad de resultados con estudios de idénticas unidades funcionales, alcances y metas.

Las consideraciones ambientales deben ser integradas en todo tipo de decisiones. El conocimiento de estos impactos debe estar disponible, y una perspectiva de análisis de ciclo de vida siempre será útil para impedir el desplazamiento de problemas de un proceso a otro (entre *hotspots*), o bien de un área geográfica a otra.

De la revisión bibliográfica surgen algunos complementos interesantes al ACV que podrían mejorar la precisión con la que se definen los impactos ambientales locales:

### **8.2.1.1 Herramienta Input/Output**

Una recomendación a futuro sería combinar la herramienta de ACV con nuevas técnicas como el AIO o análisis de inputs y outputs, que permitiría complementar lo obtenido a modo de apoyo de la gestión de políticas públicas con información macroeconómica.

En los últimos años se ha hablado de la utilización de un modelo híbrido de ACV. Éste combina la metodología aquí utilizada con el IOA, o *Input-Output Analysis*. El IOA es un campo de la macroeconomía que mediante la conexión de sectores industriales y vivienda en la economía nacional en la forma de oferta y consumo de bienes y servicios, formación de capital e intercambio de ingresos y trabajo permite establecer en términos monetarios y para cada sector económico, cuánto compra éste de otros sectores, para cada unidad producida en la economía.

En conjunto con ACV, el IOA se transforma en una herramienta poderosa que permite estimar la intervención ambiental “aguas arriba” generada a través de la cadena de suministros que permite entregar una cierta cantidad de bienes o servicios [1][4][29].

### **8.2.1.2 Medición de incertezas**

Al igual que en muchas otras herramientas de toma de decisiones, el cálculo de incertezas es usualmente no considerado en los estudios de ACV. Esto permitiría validar y apoyar la sección de interpretación del análisis de ciclo de vida. Una sugerencia cualitativa es la de discutir estas incertezas con un panel de expertos, o bien con *stakeholders* de interés a modo de encontrar un consenso en los datos y sus opciones.

Por otro lado a través de la estadística podría darse una solución cuantitativa a este asunto, esto no extirparía la incerteza sino que la incorporaría al modelo. Algunos métodos aplicables son:

- Variación de parámetros y análisis de escenarios, como el realizado en la presente investigación.
- Teoría clásica de estadística, utilizando probabilidades de distribución, test de hipótesis, entre otros.

- Simulación de Monte Carlo
- *Bootstrapping*
- Análisis bayesiano

## 9 GLOSARIO

ACV: Análisis de ciclo de vida

LCIA: *Life Cycle Inventory Analysis* o análisis del inventario del análisis de ciclo de vida

Hotspot: Punto crítico del ciclo de vida estudiado

IOA: *Input Output Analysis* o Análisis de entradas y salidas de flujos

ERNC: Energías renovables no convencionales

REP: Responsabilidad extendida al consumidor

DCB: Diclorobenceno

NOX: Óxido nitroso

CFC: Clorofluorocarbonos

R11: Triclorofluormetano o CFC-11

GWP: *Global warming potential* o potencial de calentamiento global

POCP: *Photochemical ozone creation potencial* o generación de smog fotoquímico

SING: Sistema Interconectado Norte Grande

CDEC: Centro de despacho de carga

GNL: Gas Natural Licuado

SEIA: Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental

IKI: *International Climate Initiative* – Iniciativa Internacional para la protección del clima

BMUB: *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit* – Ministerio del Medio Ambiente de Alemania

ODEPA: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias

COP21: 21° Conferencia de las Partes de la Convención del Cambio Climático

FCFM: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] HAO LIU, C., SUE, J.L. y LEWIS, C. Environmental Impacts of Electricity Sector in Taiwan by Using Input-Output Life Cycle Assessment: The Role of Carbon Dioxide Emissions. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 733–744, 2012
- [2] EVANS, A., STREZOV, V. y EVANS, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1082–1088
- [3] ASDRUBALI, F., BALDINELLI, G., D’ALESSANDRO, F., SCRUCICA, F. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42(2015)1113–1122
- [4] TURCONI, R., BOLDRIN, A., ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28(2013)555–565
- [5] CENTRO DE ENERGÍA, FCFM. Propuesta para el desarrollo de un cluster de energía solar en la región de Antofagasta. Enero 2015
- [6] WEISSER, D. A guide to life-cycle greenhouse gas(GHG) emissions from electric supply technologies, *Science Direct Energy* 32 (2007) 1543-1559
- [7] ISO 14040:2006, Environmental management systems – Life cycle assessment-Principles and framework
- [8] ISO14044:2006, Environmental management systems – Life cycle assessment-Requirements and guidelines
- [9] SEIFFERT, N. Análisis de ciclo de vida de la industria de detergente de lavado textil con estudio de caso empresa Envater. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial. Departamento de Ingeniería Industrial Universidad de Chile, Santiago de Chile 2014
- [10] BLANC, I., BELOIN-SAINT-PIERRE, D. Challenges of Electricity Production Scenarios Modelling for Life Cycle Assesment of Environmental Impacts, 27th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Sep 2013, Hamburg, Germany, pp.443
- [11] SANTOYO-CASTELAZO, E., GUJBA, H., AZAPAGIC, A., Life cycle assesment of electricity generation in Mexico
- [12] NATIONAL RISK MANAGEMENT RESEARCH LABORATORY, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Life Cycle Assesment: Principles and Practice, May 2006

- [13] CHERTOW, M., Uncovering Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1):11-30
- [14] CDEC-SING, 2016, Detalle Mensual de Generación de Energía. [en línea] [http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck\\_web\\_cdec\\_sing.sp\\_pagina?p\\_id=5169](http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck_web_cdec_sing.sp_pagina?p_id=5169) [consulta: 03 octubre 2016]
- [15] CDEC-SING, 2016, Información Técnica Centrales SING [en línea] [http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck\\_inf\\_tec\\_nt\\_gene\\_pub.dsp\\_centrales](http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck_inf_tec_nt_gene_pub.dsp_centrales) [consulta: 08 agosto 2016]
- [16] MESA ERNC Energía 2050, “Escenarios de Expansión 0”. 2015
- [17] MESA ERNC Energía 2050, “Escenarios de Expansión 50”. 2015
- [18] MESA ERNC Energía 2050, “Escenarios de Expansión 100”. 2015
- [19] MESA ERNC Energía 2050, “Escenarios de Expansión 150”. 2015
- [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial, Introduction to LCA and modelling using GaBi
- [21] LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C., SÁEZ, R., Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal technology in Spain, 2006.
- [22] TREMEAC, B., MEUNIER, F., Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines, 2009.
- [23] BURKHARDT, J., III, HEATH, G., A., TURCHI, C., Life Cycle Assesment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and the Impacts of Key Design Alternatives
- [24] GAMESA 2013, Análisis de ciclo de vida de 1kwh generado por un parque eólico onshore Gamesa G90 2.0Mw
- [25] DÍAZ, G., TELSNIG, T., Solar Mining Technology Options-techno-economic-ecological datasheet- Concentrated Solar Power, June 2016
- [26] DÍAZ, G., TELSNIG, T., Solar Mining Technology Options-techno-economic-ecological datasheet, Photovoltaics, June 2016
- [27] FINNVENDEN, G., HAUSCHILD, M., EKVALL T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., KOEHLER, A., PENNINGTON, D., SUH, S., Recent development in Life cycle assessment, June 2009
- [28] SHERWANI, A., F., USMANI, J., A., VARUN, Life cycle assesment of solar PV based electricity generation systems: a review, Elsevier 2009

- [29] JESWANI, H., AZAPAGIC, A., SCHEPELMANN, P., RITTHOFF, M., Options for broadening and deepening the LCA approaches, Elsevier 2009
- [30] MINISTERIO DE ENERGÍA, Política energética de Chile, Energía 2050
- [31] Vargas, L., Haas, J., Barría, F., Reyes, L., Generación de energía eléctrica con fuentes renovables, apunte EL6000
- [32] Acero, A., Rodríguez, C., Citroth, A., Impact Assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Greendelta
- [33] Mekonnen, M., Gerbens-Leenes, P., Hoekstra, A., The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment, Royal Society of Chemistry

## 11 ANEXOS Y APÉNDICES

### 11.1 Anexo 1: Comparación de métodos de interpretación de resultados (LCIA)

METHODS	Acidification	Blue/ Green Water Use	Climate change	Cumulative Energy Demand	Depletion of abiotic resources	Ecotoxicity	Eutrophication	Human toxicity	Ionising Radiation	Land use	Odour	Ozone layer depletion	Particulate matter/ Respiratory inorganics	Photochemical oxidation
CML 2001 (baseline)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓
CML 2001 (non)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
eco- indicator 99	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
eco- indicator 99	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
eco- indicator 99	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
Eco-Scarcity 2006	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EDIP 2003	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓
EPA-default methods	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓
ILCD 2011, endpoint	✓	-	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ILCD 2011, midpoint	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (E)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (H)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Endpoint (I)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint (E)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
ReCiPe Midpoint (I)	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Traci 2.0	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓
USEtox	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-

*Ilustración 11: Métodos de interpretación de resultados (LCIA) comparados*

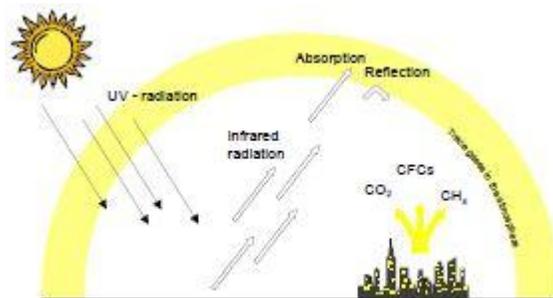
*Fuente: [32] Green Delta*

### 11.2 Anexo 2: Categorías de impacto

Potencial de calentamiento global: En inglés Global Warming Potential (GWP). Los mecanismos del efecto invernadero pueden observarse como su nombre lo dice, en un invernadero. Los mismos efectos ocurren también en gran escala en nuestra atmósfera. Las ondas cortas de radiación solar entran en contacto con la superficie terrestre y son, en parte absorbidos (calentamiento directo) y parcialmente reflejados como radiación infrarroja (dependiendo del albedo de la superficie de contacto). Lo reflejado es absorbido por gases de efecto invernadero en la tropósfera y vuelven a ser irradiados en todas

direcciones, muchos de ellos de vuelta a la Tierra. Esto resulta en un efecto de calentamiento de la superficie terrestre.

Además de los mecanismos naturales, el efecto invernadero se ve amplificado por la actividad humana. Gases como el dióxido de carbono, el metano y los clorofluorocarbonos son considerados gases de efecto invernadero. Por tanto, el potencial de calentamiento global es calculado en CO<sub>2</sub>-eq. (todos los gases son normalizados a una escala de dióxido de carbono equivalente). Dado que la residencia en el tiempo de los gases en la atmósfera es incorporada en el cálculo, se debe asignar también un rango de tiempo a la categoría de impacto, siendo un período de 100 años el utilizado mayoritariamente, al igual que en el caso de este trabajo de memoria.

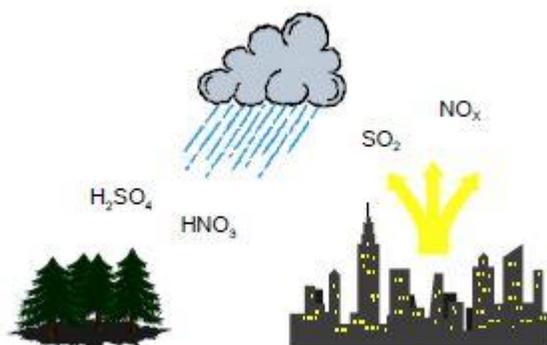


**Ilustración 12:** Potencial de calentamiento Global

**Fuente:** [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

Potencial de acidificación: En inglés acidification potential (AP). La acidificación del suelo y el agua ocurre predominantemente a través de la transformación de contaminantes en ácidos. Esto conlleva la disminución en el valor del pH del agua de lluvia y niebla desde 5.6 a 4 y menos. El dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno y sus respectivos ácidos producen contribuciones relevantes a esta situación. Esto daña los ecosistemas, siendo la desaparición de los bosques su impacto más conocido y relevante. La acidificación tiene daños directos e indirectos: nutrientes desapareciendo de los suelos, incremento en la solubilidad de metales en los suelos o incluso corrosión en construcciones y materiales de obra.

Pese a que la acidificación es un problema global se debe comprender que los impactos locales pueden variar del general. Para esta investigación, los acidificantes se entregarán en cantidades de SO<sub>2</sub>-eq (equivalentes a dióxido de azufre).



**Ilustración 13:** Potencial de Acidificación

**Fuente:** [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

**Potencial de Eutrofización:** En inglés Eutrophication Potential (EP). Enriquecimiento de nutrientes en ciertos lugares que puede ser tanto acuática como terrestre. Contaminantes, aguas de deshecho y fertilizantes en agricultura son los principales contribuyentes a la eutrofización.

En el agua se obtiene como resultado un acelerado crecimiento de algas, lo que previene el paso de los rayos de sol a zonas de mayor profundidad. Esto conlleva a una disminución en la generación de fotosíntesis y por tanto en la producción de oxígeno. Además, el oxígeno es requerido para los procesos de descomposición de algas; se provoca entonces, una retroalimentación negativa que disminuye la cantidad de oxígeno en el agua que puede conllevar la asfixia de peces y el aumento de descomposición anaeróbica. Aumenta entonces la producción de sulfuro de hidrógeno y metano, que pueden desencadenar entre otros efectos en la destrucción de ecosistemas.

En suelos eutrofizados se puede ver un enriquecimiento en nitratos, que desde un punto de vista toxicológico no son dañinos. Sin embargo, los nitritos, productos de la reacción del nitrato son tóxicos para la salud humana. La eutrofización es calculada en PO<sub>4</sub>-eq (fosfato equivalente). Al igual que la acidificación, sus resultados varían en impactos regionales y globales.



**Ilustración 14:** Proceso de eutrofización de suelos y aguas

**Fuente:** [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

En suelos eutrofizados se puede ver un enriquecimiento en nitratos, que desde un punto de vista toxicológico no son dañinos. Sin embargo, los nitritos, productos de la reacción del nitrato son tóxicos para la salud humana. La eutrofización es calculada en PO<sub>4</sub>-eq (fosfato equivalente). Al igual que la acidificación, sus resultados varían en impactos regionales y globales.

Potencial de creación de ozono fotoquímico: En inglés Photochemical Ozone Creation Potential (POCP). Pese a que el ozono cumple un rol protector en la estratósfera, a nivel del suelo el ozono puede ser muy dañino. El smog fotoquímico puede dañar la vegetación y los materiales, incluso en altos niveles de concentración el ozono puede ser tóxico para los humanos. La radiación del sol y la presencia de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos incurre en complejas reacciones químicas produciendo entre sus resultantes al ozono.

En los análisis de ACV el ozono fotoquímico es referenciado como C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq (etileno equivalentes).

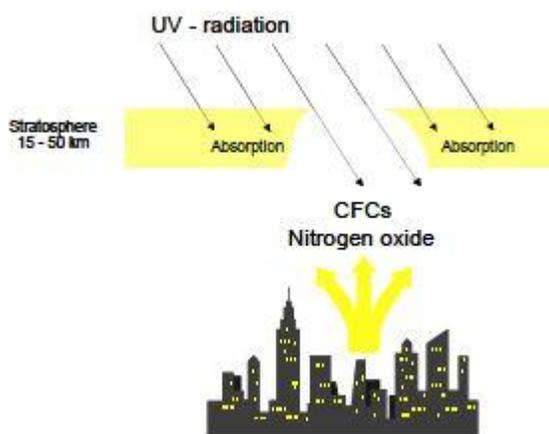


**Ilustración 15:** Generación de smog fotoquímico

**Fuente:** [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

Potencial de agotamiento de la capa de ozono: En inglés Ozone Depletion Potential (ODP). El ozono es creado en la estratósfera por la disociación de átomos de oxígeno expuestos a ondas cortas de radiación ultravioleta. Esto lleva a la formación de la capa de ozono, tan esencial para la formación de vida en nuestro planeta. Sin embargo, las emisiones antropogénicas destruyen el ozono estratosférico. Las sustancias causantes de este problema son los clorofluorocarbonos (CFC's) y los óxidos nitrosos (NOX). El agujero en la capa de ozono ocasiona el calentamiento de la superficie terrestre (y dada su locación, el derretimiento de los polos). Efectos dañinos de la radiación UV también afectan a humanos, animales y plantas, éstas últimas ven sus ciclos de fotosíntesis discontinuados lo que provoca cambios en las cosechas, además existe una considerable disminución de plankton marino. Estos efectos sumados provocan un gran impacto en las cadenas alimenticias.

El cálculo del ODP resulta de la ponderación de distintas sustancias relevantes para el ozono. Se calcula así inicialmente un escenario para una cantidad fija de emisiones de CFC de referencia (conocida como CFC11). Esto decanta en un estado de equilibrio de reducción total de ozono. El mismo escenario es considerado para cada sustancia bajo estudio, utilizando el CFC11 como equivalente. Una evaluación del agotamiento del ozono debe tomar en consideración efectos a largo plazo, globales y en muchos casos, irreversibles.



**Ilustración 16:** Destrucción de la capa de ozono

**Fuente:** [20] GaBi Software Paper Clip Tutorial

Toxicidad humana y ecológica: En inglés Human and eco-toxicity. El método para el cálculo de impacto de la toxicidad sigue en revisión para la comunidad científica ligada al estudio de análisis de ciclo de vida. El potencial de toxicidad humana (HTP) busca estimar el impacto negativo de un proceso en la salud humana. La toxicidad ecológica busca medir impactos en el ecosistema, separándolos en terrestres (TETP) y acuáticos (AETP).

Los factores de caracterización entregados por el LCIA son entregados según un cálculo propuesto por el Centre of Environmental Science (CML) de la Universidad de Leiden.

Potencial de Agotamiento Abiótico: En inglés Abiotic Potential Depletion. Mide el grado de agotamiento de recursos naturales como minerales, materias primas, petróleo, entre otros.

### **11.3 Anexo 3: Alcances de BD Ecoinvent 3**

#### **Carbón**

This dataset includes:

- all operation and maintenance activities and materials of the power plants.
- Use of fuel oil for startup
- Particle removal (dedusting of the flue gas)
- Desulfurisation and denitrification. These processes are described in separate modules; it can be decided by changing the values of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> retained whether and how much DeNO<sub>x</sub> and DeSO<sub>x</sub> are installed.
- Cooling: It is assumed that all plants use wet cooling with a cooling tower. No cooling tower is included in this dataset (will be implemented in future versions)
- Loss of feed water
- Transport of the hard coal from the delivering country to Chile, but not the transports within Chile.

This dataset doesn't include:

- raw materials extraction, decommissioning and waste treatment as these activities are already included in the infrastructure datasets
- transformation of the electricity produced
- The disposal of non-recycled ashes is modelled separately.

Data from 1993 have been updated for the years 2000 (v1.0), and 2004-2005 (v2.0). Uncertainty was adjusted accordingly. Most of the exchanges were extrapolated through

production-weighted averages of the datasets of the following 14 countries: AT, BE, ES, FR, IT, NL, PT, DE, CZ, HR, PL, SK, CN, US. The original data were valid for the burning of 1MJ of hard coal. In this dataset, the values are scaled to the net output of 1kWh of electricity, based on the electrical efficiency.

## **Gas Natural**

Data from 1993 have been updated for the years 2000 (v1.0), and 2004-2005 (v2.0). Uncertainty was adjusted accordingly. Most of the exchanges were extrapolated through production-weighted averages of the datasets of the following 14 countries: AT, BE, ES, FR, IT, NL, PT, DE, CZ, HR, PL, SK, CN, US.

The original data were valid for the burning of 1MJ of hard coal. In this dataset, the values are scaled to the net output of 1kWh of electricity, based on the electrical efficiency.

Data have been taken over from a dataset valid for the time period 2000-2005, relying on sources of the 90th. No changes were made for the 2008 dataset, but uncertainty was adjusted.

All exchange data were extrapolated from datasets of the following 11 countries: AT, BE, DE, ES, FR, GB, IT, JP, LU, NL, US. The data of those countries basically rely on data of the former UCTE (see general comment). The efficiency is based on IEA/OECD statistics and calculated with own assumptions. The cooling and feed water use has been overtaken from datasets for electricity production with hard coal or lignite.

## **Petróleo**

This dataset includes all energy use, use of chemicals, emissions to air and water including treatment of flue gasses and effluents. In an oil power plant, water is needed for cooling, feed water for the steam circuit, for the flue gas treatment, or other cleaning. This dataset only considers water use (evaporation) for cooling and steam circuit.

The exchanges in this datasets are a weighted average of the following country oil datasets in the ecoinvent database (weighting with electricity production): AT, BE, BR, GR, CN, CS, CZ, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IT, JP, MK, NL, NO, PT, PL, SE, SI, SK.

For details see comment for parameter 'average efficiency of oil power plants, global'

Child exchanges are put into relation to the parent exchanges by means of average efficiency of oil power plants in the country and global average efficiency of oil power plants.

## **Eólico**

This dataset includes

- the operation and maintenance of the wind power plant
- change of lubricating oil every year

This dataset doesn't include

- raw materials extraction, decommissioning and waste treatment as these activities are already included in infrastructure datasets
- transformation of the electricity produced in order to deliver in to the grid as this is already included in the infrastructure datasets.

The class 1-3 MW is represented by a wind turbine with a capacity of 2 MW.

## **PV**

The geographic reference is Calama/Antofagasta Region in Chile and the time reference is 2015. The lifetime of the power plant is defined at 25 years. The data quality requirements were met by using actual solar measurement data at a high temporal resolution. This was based on the estimation of the energy yield of the plant and through the use of a detailed life cycle inventory lists of the power plant based on ecoinvent datasets, which are adjusted to Chilean conditions.

The life cycle inventory (LCI) analysis involves the data collection and estimation of all inputs and outputs of the investigated product system. We used the life cycle inventory data of the ecoinvent dataset and adjusted it to Chilean conditions, taking into account changes of the sizing of the different power plant components. Moreover, all energy-related processes during the construction of the PV plant were modelled using the Chilean electricity mix. LCI data of the subcomponents (e.g. PV panels, inverters) are modelled based on global average inventories. For this purpose data of the LCA database ECOINVENT V3.1 was used to consider emissions of pre-processes and raw material extraction.

## CSP

The geographic reference is Calama/Antofagasta Region in Chile and the time reference is 2015. The lifetime of the power plant is defined at 30 years. The data quality requirements were met by using actual solar measurement data in a high temporal resolution. This was based on the estimation of the energy yield of the plant and through the use of a detailed life cycle inventory lists of the different system components of previous LCA studies.

The life cycle inventory (LCI) analysis involves the data collection and estimation of all inputs and outputs of the investigated product system. We used the life cycle inventory data and parameterised LCA model reported in Telsnig (2015) and adjusted it to Chilean conditions, taking into account changes of the sizing of the different power plant components and transport distances. Transport distances for the construction phase of the power plant were assumed as 220 km which represents the road distance between the harbour of Antofagasta and Calama. Transport distances of the materials to a disposal or recycling facility were assumed to be 100 km. Data of the LCA database ECOINVENT V2.2 was used to consider emissions of pre-processes and raw material extraction [16][21]. The emissions resulting from co-firing of diesel in the co-firing system of the power plant were calculated by the assumption that 2% of the plant's electricity production is delivered by co-firing, which is reported as the minimum co-firing rate in current CSP plants [22]. The emission factor for diesel was obtained from IPCC (2006) and accounts for 72.6 gCO<sub>2</sub>eq/MJdiesel [23]. Auxiliary electricity is generated within the CSP plant.

### 11.4 Anexo 4: Generación bruta anual escenario actual para Antofagasta

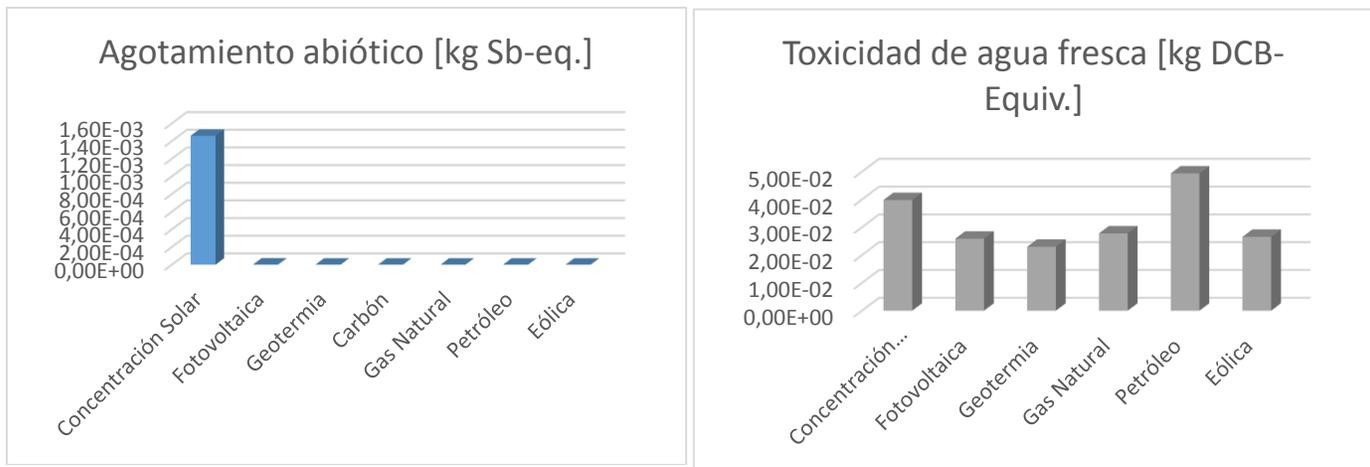
Categoría	Unidad	Concentrac ión Solar	Fotovolta ica	Geoter mia	Gas Carbón	Gas Natural	Petróle o	Eólica	Total
Agotamient o Abiótico	kg Sb- Equiv.	1,46E-03	1,25E-06	5,82E- 07	8,72E- 08	1,39E- 07	1,42E- 07	3,92E- 07	1,46E- 03
Acidificació n	kg SO <sub>2</sub> - Equiv. kg	6,54E-04	3,26E-04	4,19E- 04	8,80E- 03	2,68E- 03	7,96E- 03	1,04E- 04	2,09E- 02
Eutrofizació n	Phospha te-Equiv.	5,77E-05	1,05E-04	1,55E- 04	4,11E- 03	1,10E- 04	7,92E- 04	4,93E- 05	5,38E- 03
Toxicidad de agua fresca	kg DCB- Equiv.	3,98E-02	2,59E-02	2,30E- 02	5,41E- 01	2,78E- 02	4,94E- 02	2,66E- 02	7,33E- 01
Potencial de calentamie nto global	kg CO <sub>2</sub> - Equiv.	3,00E-02	4,32E-02	6,40E- 02	1,14E+ 00	6,63E- 01	9,45E- 01	1,65E- 02	2,90E+ 00
Toxicidad humana	kg DCB- Equiv.	2,89E-01	6,41E-02	6,34E- 02	5,79E- 01	9,85E- 02	3,08E- 01	5,44E- 02	1,46E+ 00

Toxicidad de agua marina	kg DCB-Equiv.	1,39E+02	1,56E+02	6,12E+01	2,54E+03	1,04E+02	2,40E+02	4,33E+01	3,28E+03
Agotamiento de capa de ozono Smog fotoquímico	kg R11-Equiv.	1,00E-08	7,02E-09	3,60E-08	8,27E-09	1,90E-08	1,68E-07	1,20E-09	2,49E-07
Toxicidad terrestre	kg DCB-Equiv.	7,45E-04	4,83E-04	4,27E-03	2,08E-03	2,89E-04	8,76E-03	1,21E-03	1,78E-02
Uso de agua	Litros	2,94E-01	6,51E-01	1,29E-01	1,87E-01	1,24E-01	2,26E-01	8,05E-02	1,69E+00
Uso de suelos	ha/kwh	3,56E-07	3,24E-07	4,04E-08	3,64E-07	3,46E-08	8,55E-08	1,34E-07	1,34E-06

**Tabla 2:** Impactos unitarios

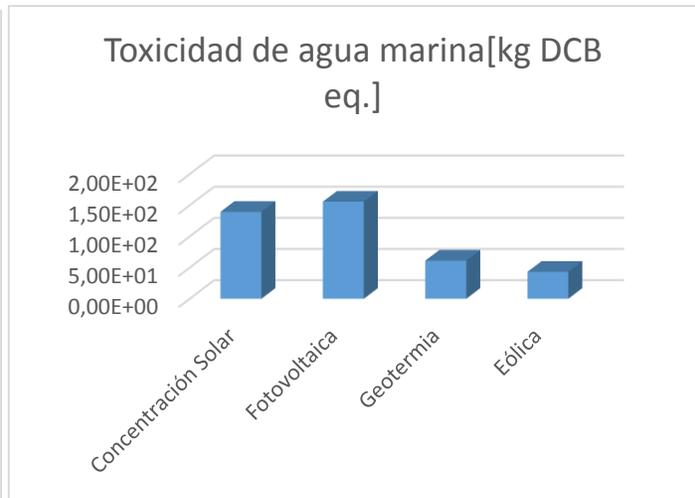
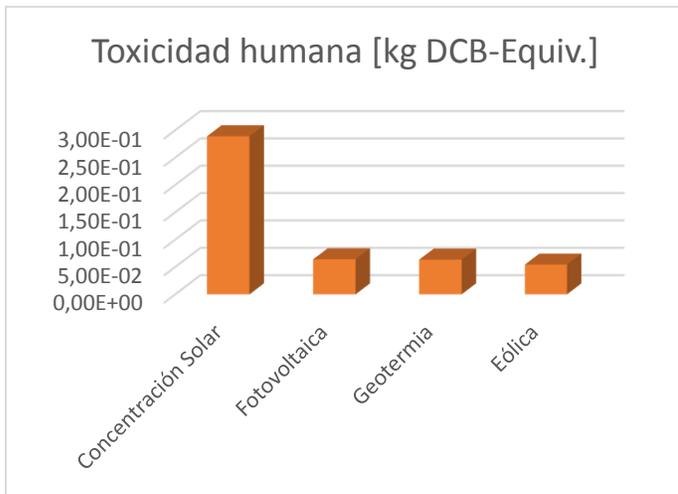
**Fuente:** Confección propia

## 11.5 Anexo 6: Gráficos impactos unitarios



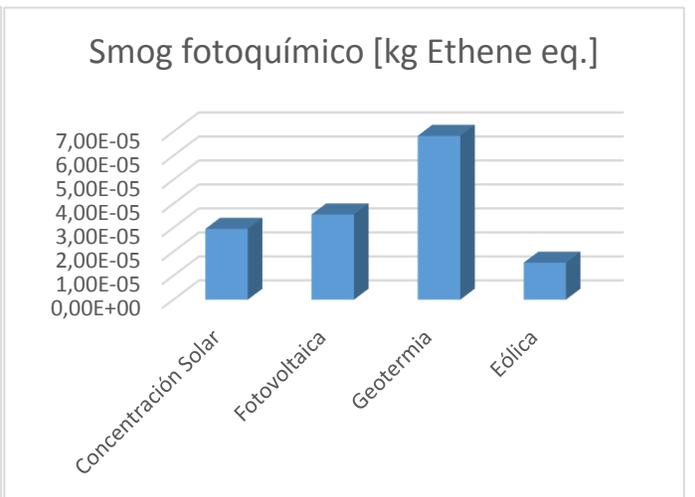
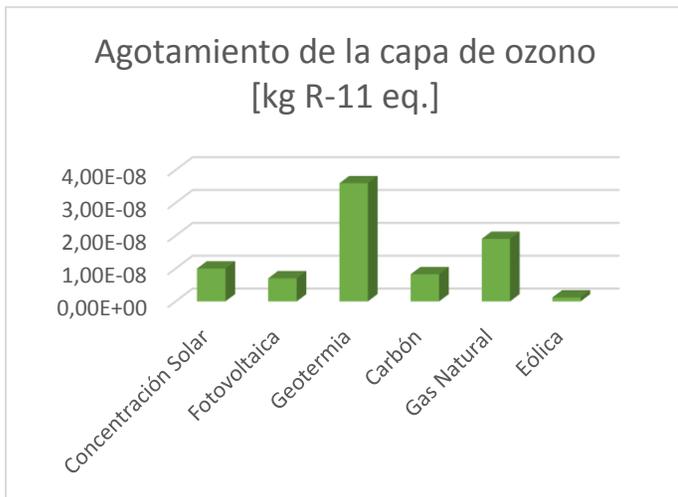
**Gráfico 41:** Impactos unitarios, agotamiento abiótico (izq.) y toxicidad de agua fresca (der.)

**Fuente:** Confección propia



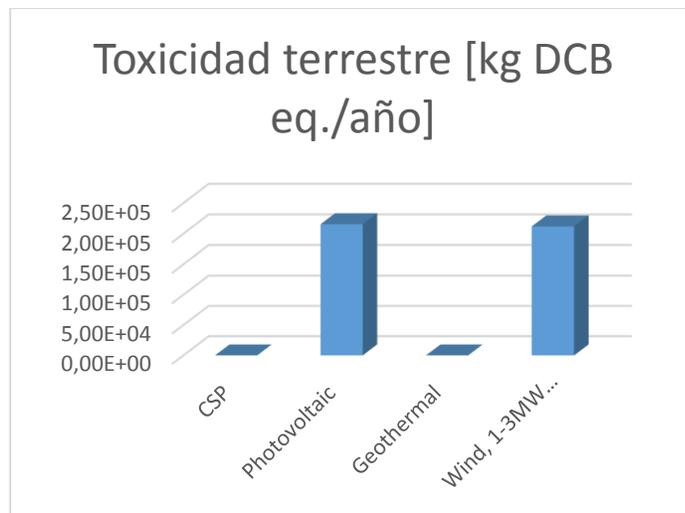
**Gráfico 42:** Impactos unitarios, toxicidad humana (izq.) y toxicidad de agua marina (der.)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 43:** Impactos unitarios, agotamiento de la capa de ozono (izq.) y smog fotoquímico (der.)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 44:** Impactos unitarios, toxicidad terrestre

**Fuente:** Confección propia

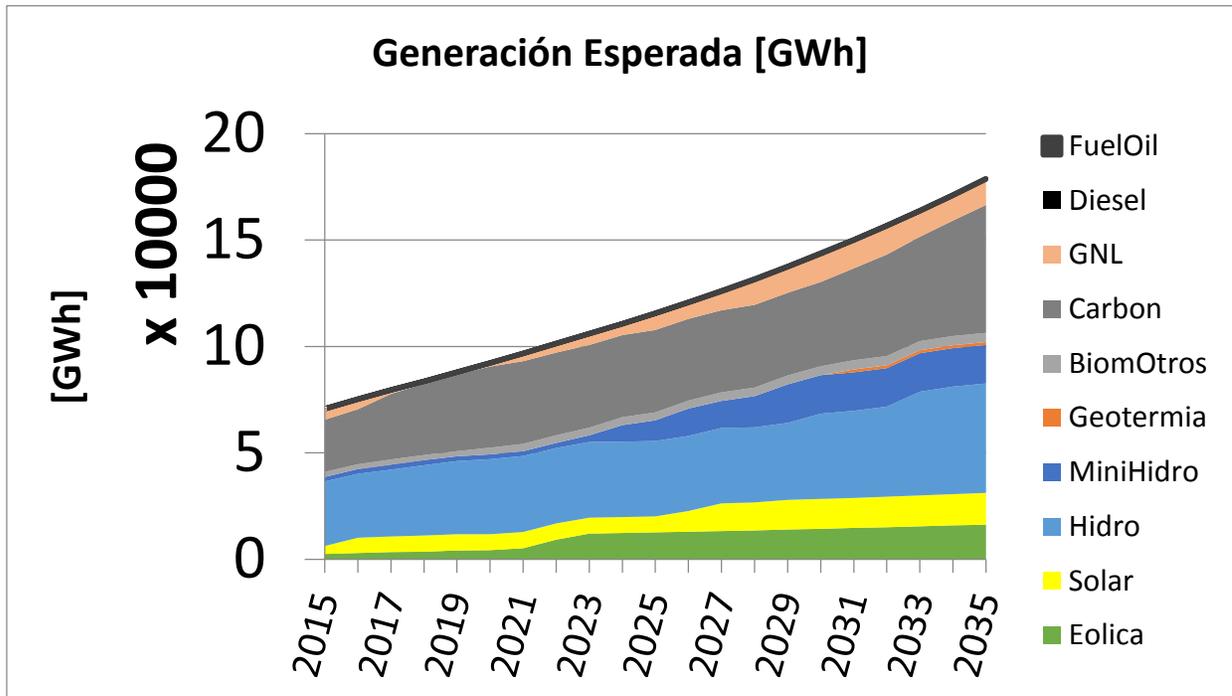
## 11.6 Anexo 7: Tabla impactos anuales 2016

Categoría	Unidad	Concentración			Gas			
		Solar	Fotovoltaica	Geotermia	Carbón	Natural	Petróleo	Eólica
Agotamiento Abiótico	kg Sb- Equiv./año	0,00E+00	5,58E+02	0,00E+00	9,68E+02	1,91E+02	1,37E+02	6,88E+01
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> - Equiv.	0,00E+00	1,45E+05	0,00E+00	9,77E+07	3,67E+06	7,70E+06	1,82E+04
Eutrofización	kg fosfato- Equiv./año	0,00E+00	4,69E+04	0,00E+00	4,56E+07	1,50E+05	7,66E+05	8,65E+03
Toxicidad de agua fresca	kg DCB- Equiv./año	0,00E+00	1,15E+07	0,00E+00	6,00E+09	3,81E+07	4,78E+07	4,67E+06
Potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> - Equiv./año	0,00E+00	1,92E+07	0,00E+00	1,26E+10	9,08E+08	9,14E+08	2,89E+06
Toxicidad humana	kg DCB- Equiv./año	0,00E+00	2,85E+07	0,00E+00	6,43E+09	1,35E+08	2,98E+08	9,55E+06
Toxicidad de agua marina	kg DCB- Equiv./año	0,00E+00	6,94E+10	0,00E+00	2,82E+13	1,42E+11	2,33E+11	7,60E+09
Agotamiento de capa de ozono	kg R11- Equiv./año	0,00E+00	3,13E+00	0,00E+00	9,18E+01	2,60E+01	1,62E+02	2,11E-01
Smog fotoquímico	kg Ethene- Equiv./año	0,00E+00	1,58E+04	0,00E+00	5,08E+06	3,29E+05	4,90E+05	2,70E+03
Toxicidad terrestre	kg DCB- Equiv./año	0,00E+00	2,15E+05	0,00E+00	2,31E+07	3,95E+05	8,47E+06	2,12E+05
Uso de agua	Litros/año	0,00E+00	2,90E+08	0,00E+00	2,08E+09	1,69E+08	2,18E+08	1,41E+07
Uso de suelos	ha/año	0,00E+00	1,44E+02	0,00E+00	4,04E+03	4,74E+01	8,27E+01	2,34E+01

**Tabla 3:** Impactos anuales escenario actual

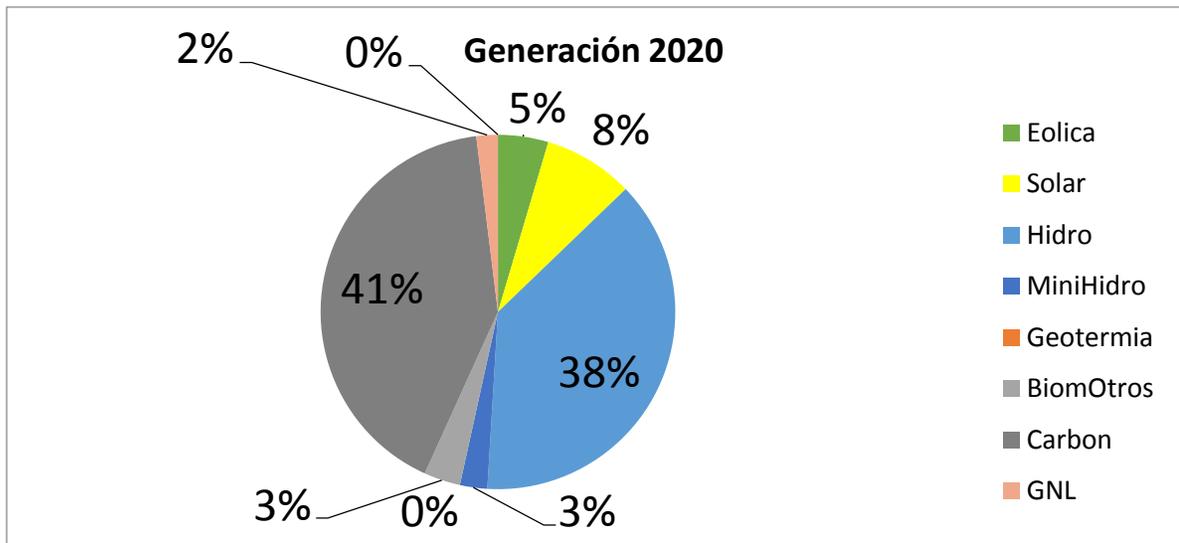
**Fuente:** Confección propia

## 11.7 Anexo 8: Caracterización de Escenarios



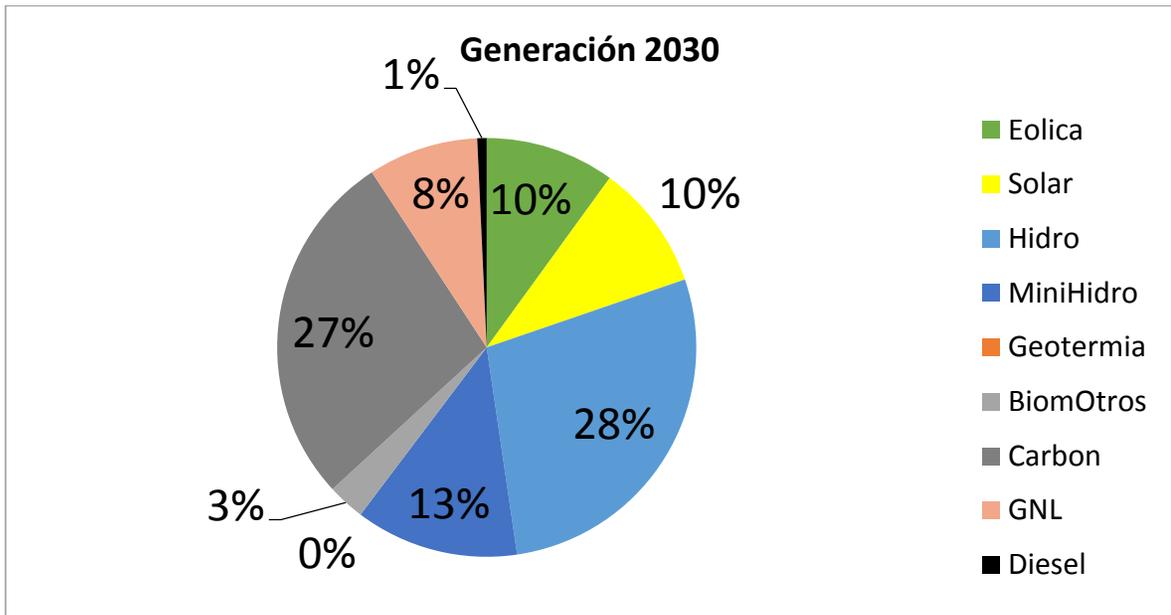
**Gráfico 45:** Proyección escenario pesimista

**Fuente:** Confección propia



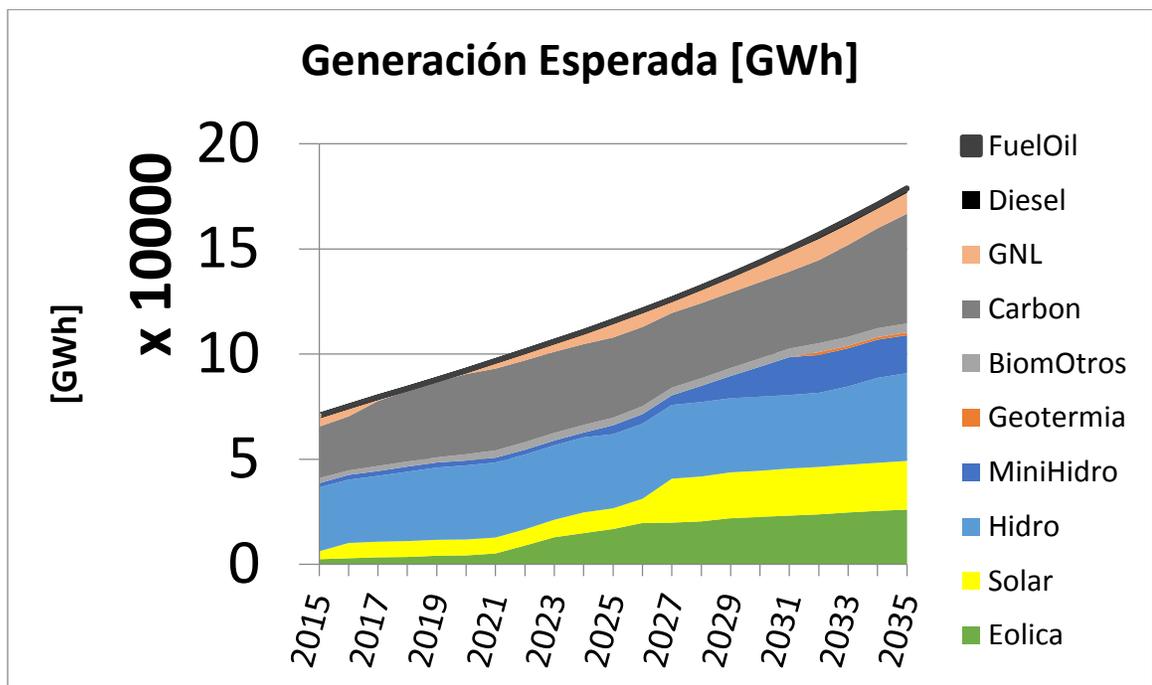
**Gráfico 46:** Proyección escenario pesimista, año 2020

**Fuente:** Confección propia



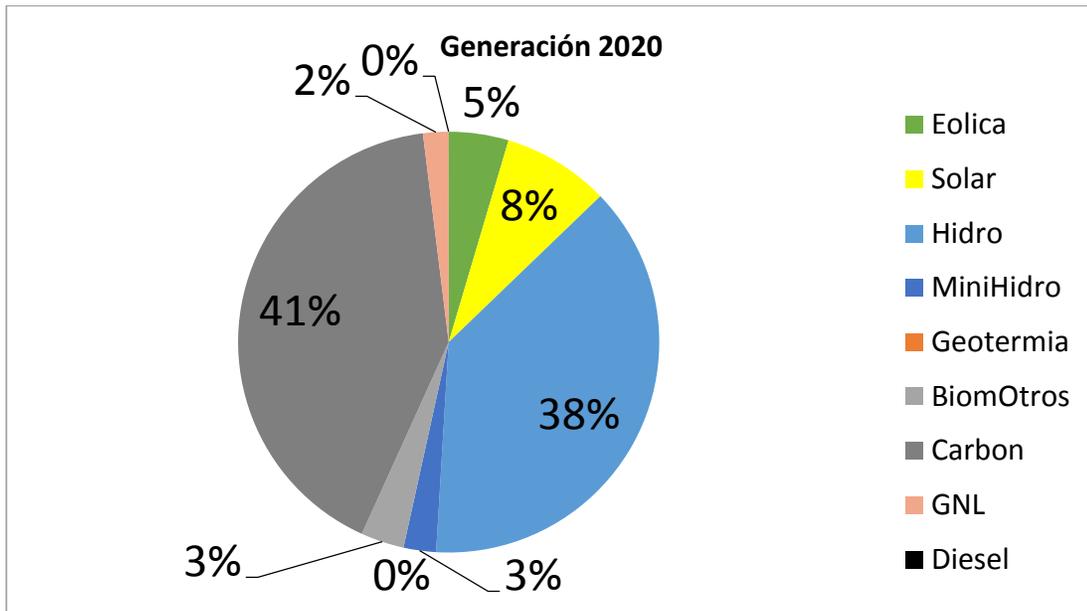
**Gráfico 47:** Proyección escenario pesimista, año 2020

*Fuente:* Confección propia



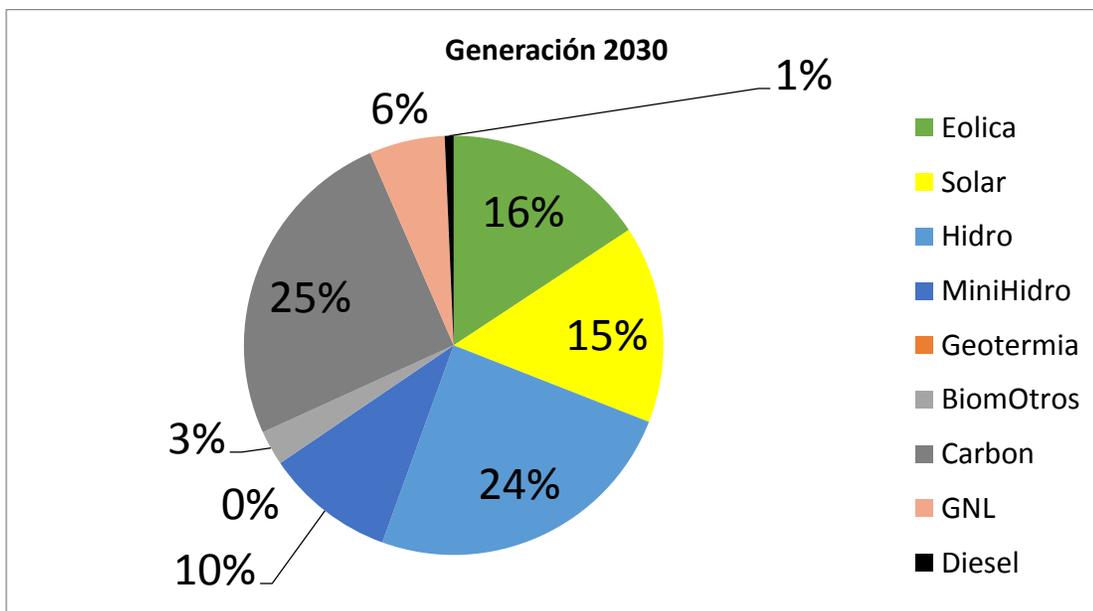
**Gráfico 48:** Proyección escenario esperado

*Fuente:* Confección propia



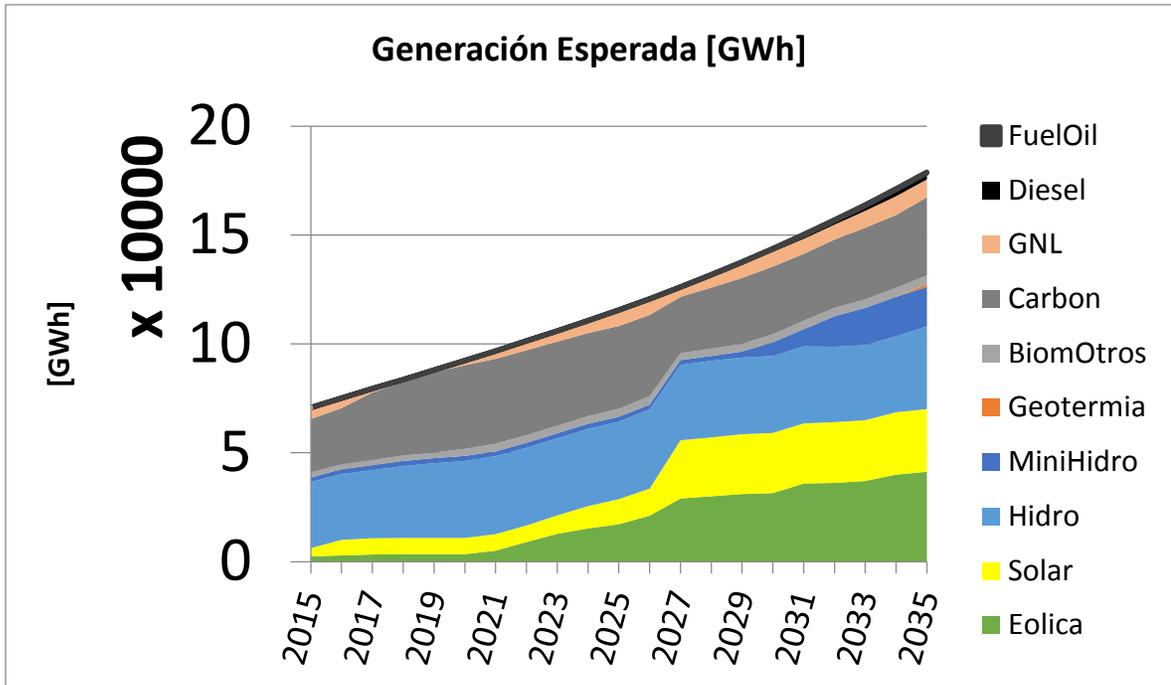
**Gráfico 49:** Proyección escenario esperado 2020

**Fuente:** Confección propia



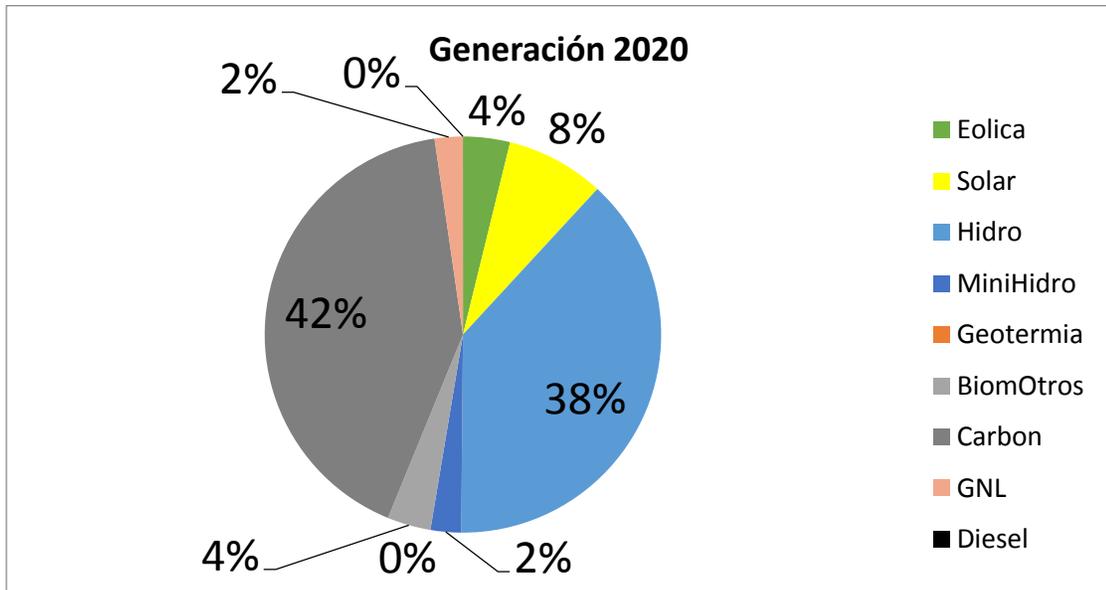
**Gráfico 50:** Proyección escenario esperado 2030

**Fuente:** Confección propia



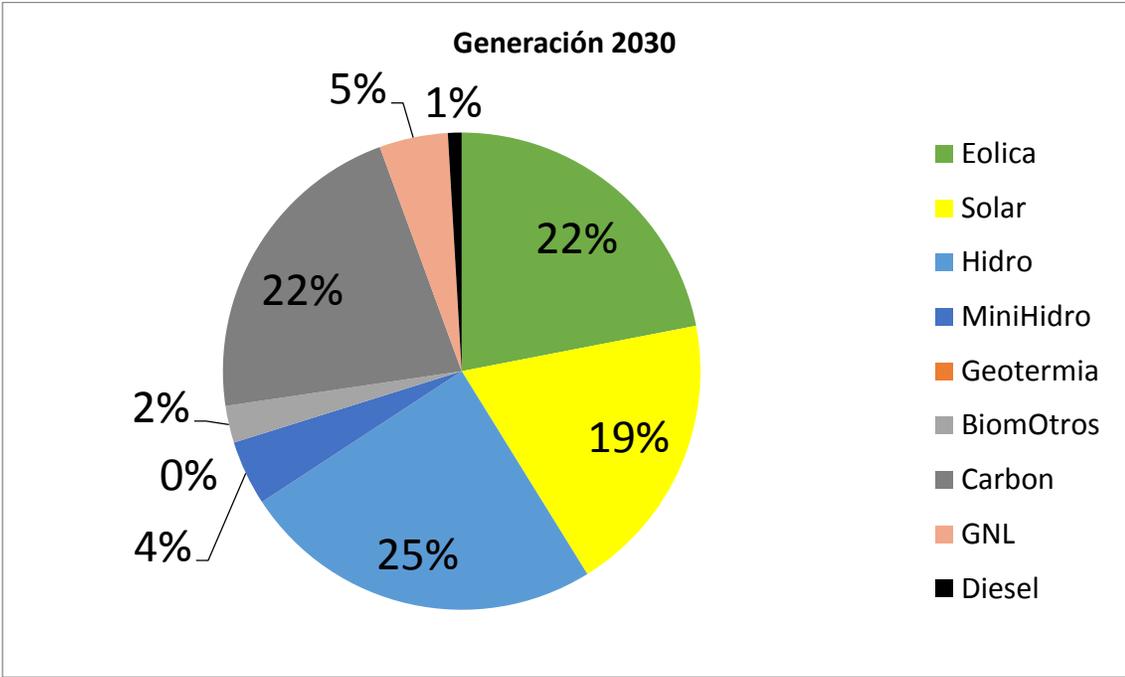
**Gráfico 51:** Proyección escenario optimista

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 52:** Proyección escenario optimista, año 2020

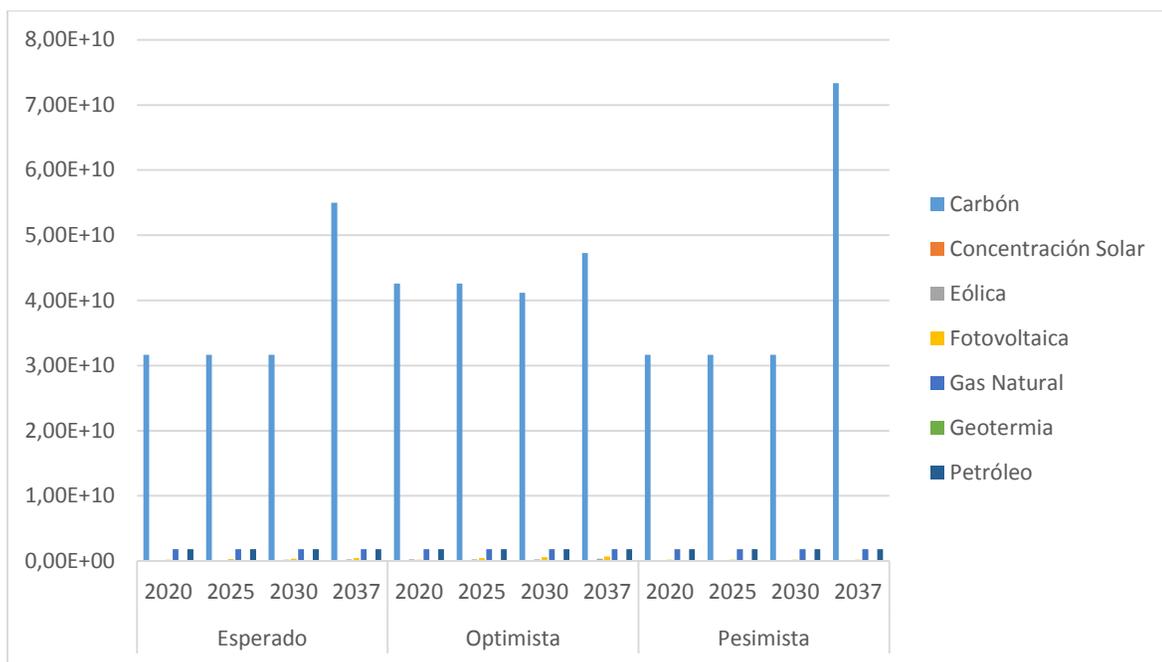
**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 53:** Proyección escenario optimista, año 2030

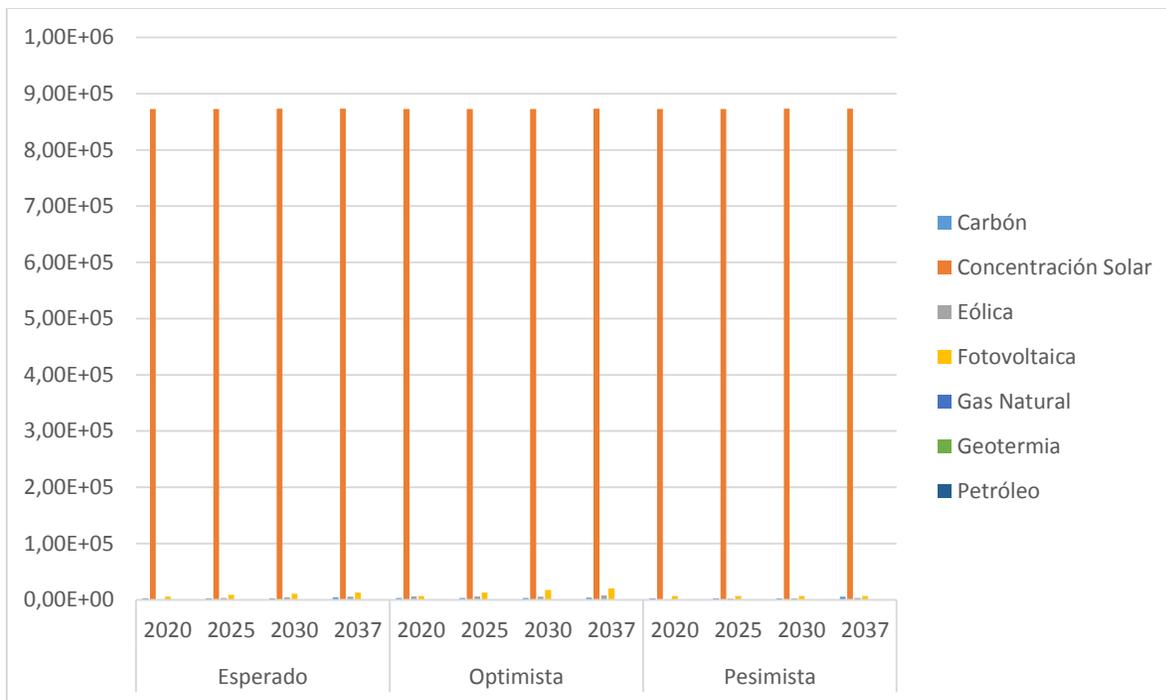
**Fuente:** Confección propia

## 11.8 Anexo 9: Gráficos impactos globales comparación de escenarios



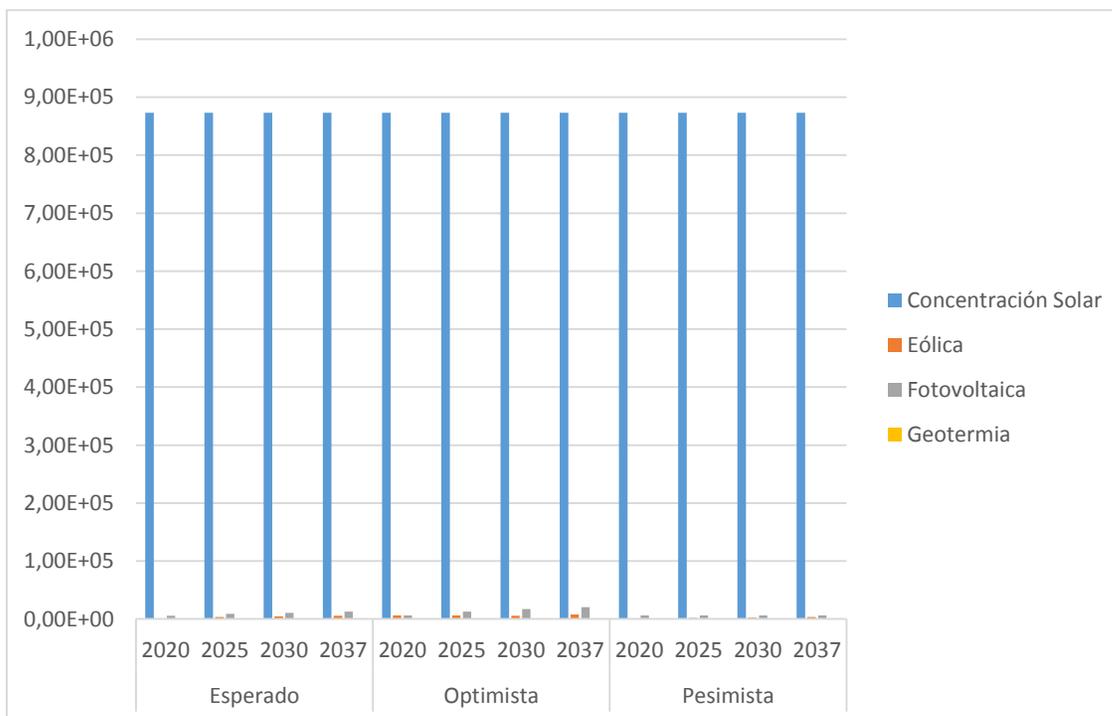
**Gráfico 54:** Potencial de calentamiento global [Kg Co2 eq/ año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



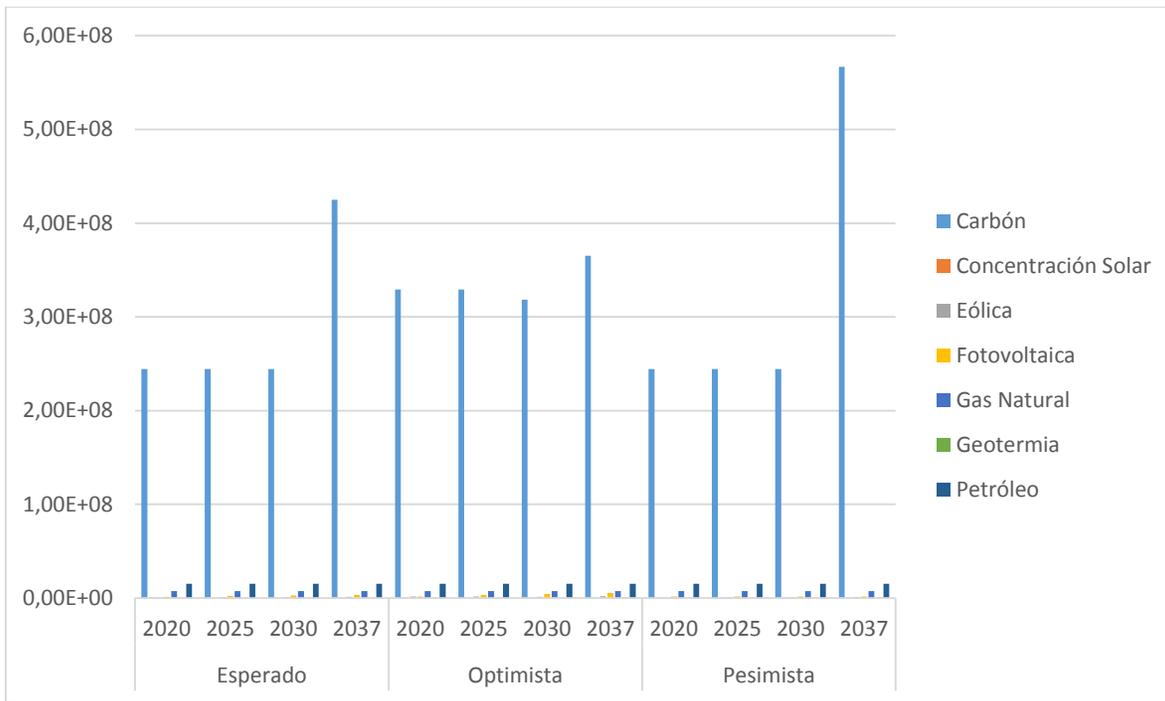
**Gráfico 55:** Agotamiento Abiótico [Kg Sb eq/ año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



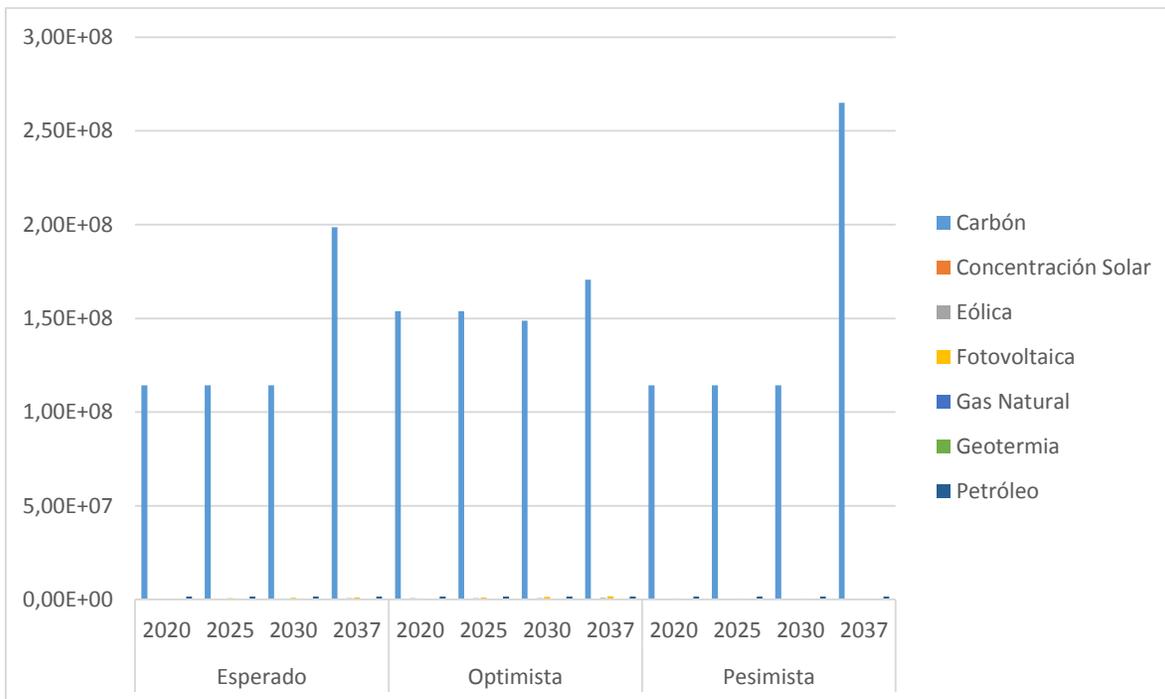
**Gráfico 56:** Agotamiento Abiótico renovables [Kg Sb eq/ año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



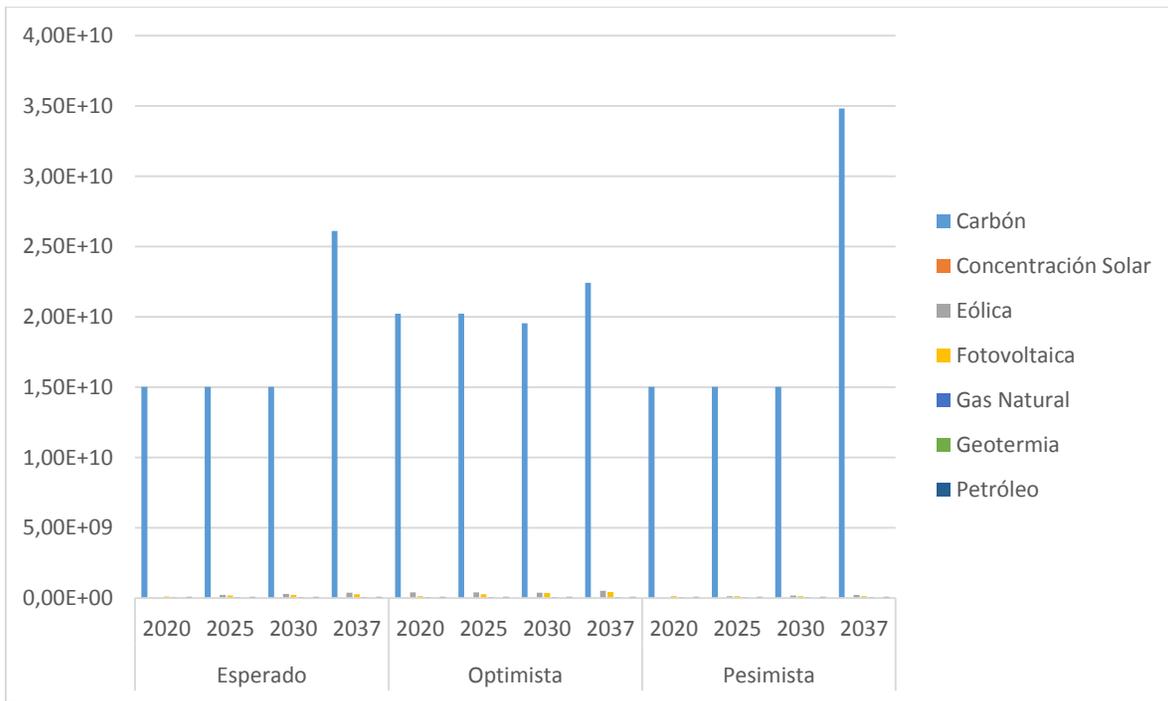
**Gráfico 57:** Acidificación [kg SO<sub>2</sub> eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



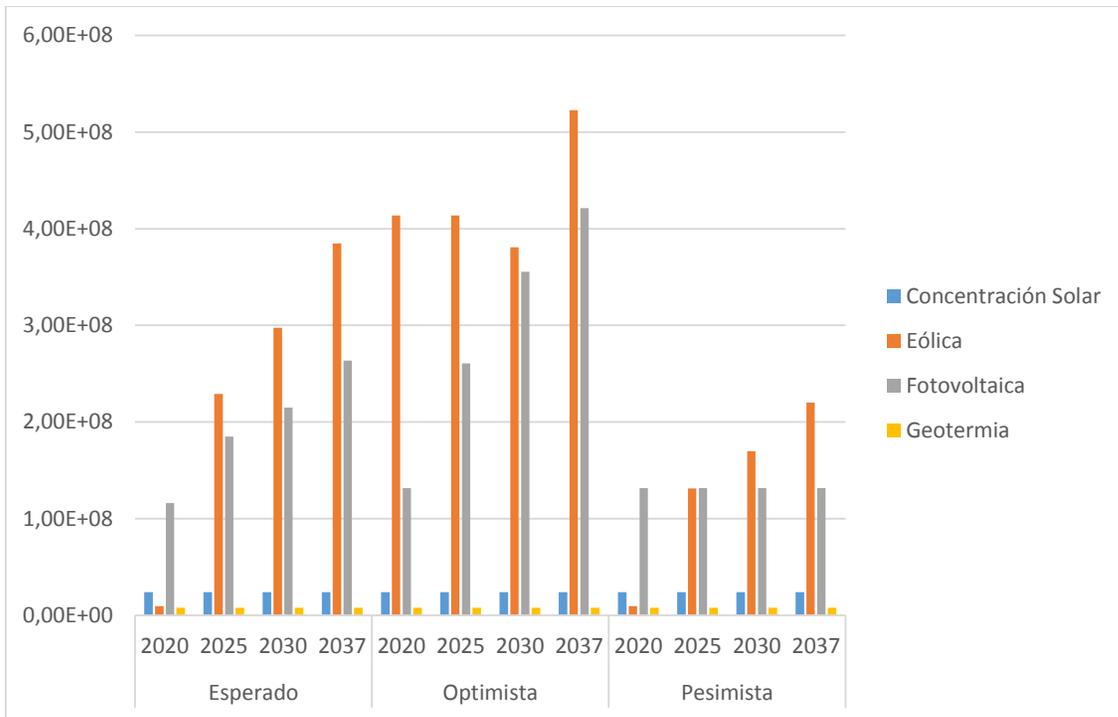
**Gráfico 58:** Eutrofización [kg fosfato-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



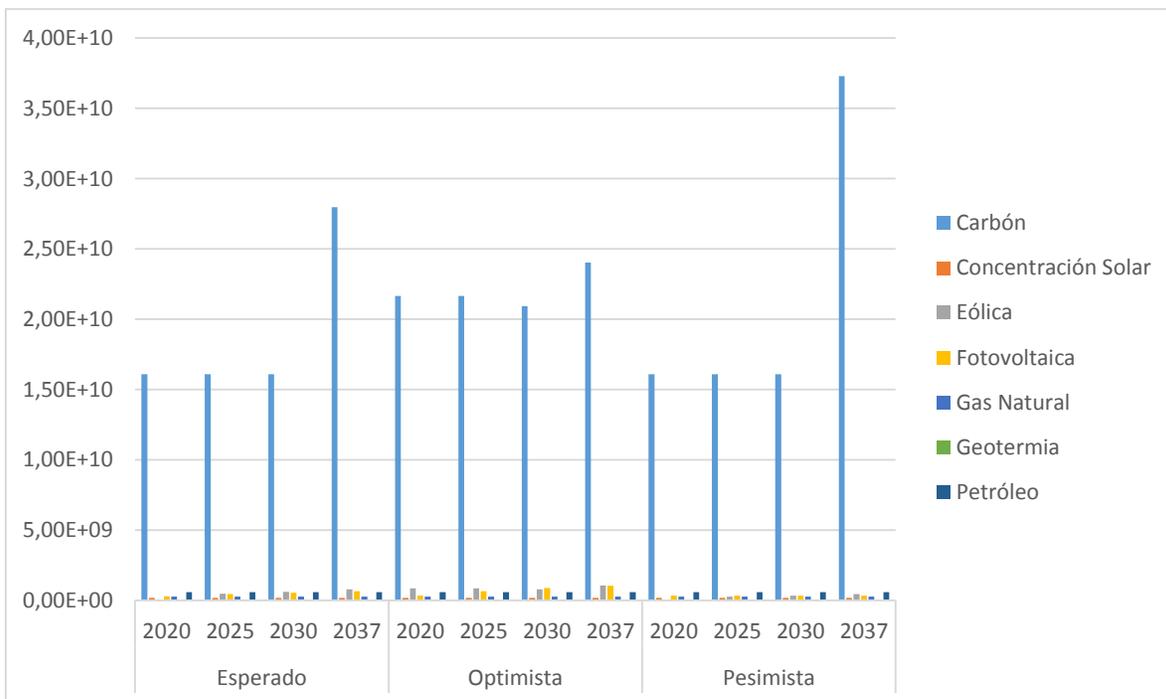
**Gráfico 59:** Ecotoxicidad de agua fresca [kg DCB-Equiv. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



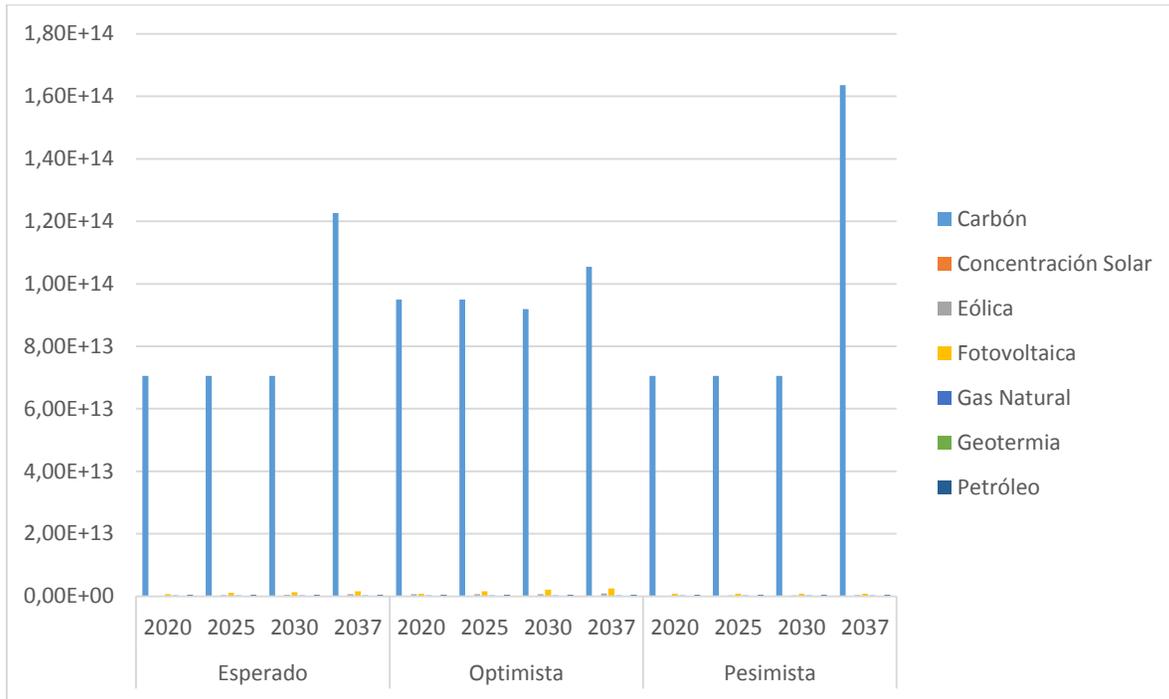
**Gráfico 60:** Ecotoxicidad de agua fresca renovables [kg DCB-Equiv. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



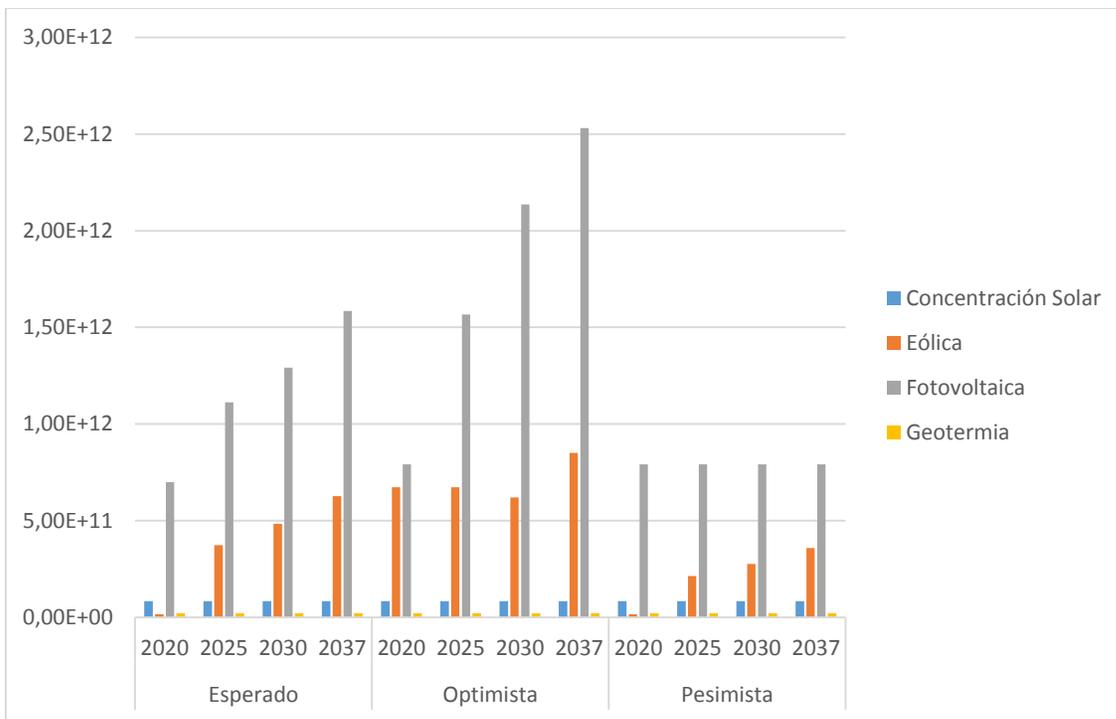
**Gráfico 61:** Ecotoxicidad humana [kg DCB-Equiv. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



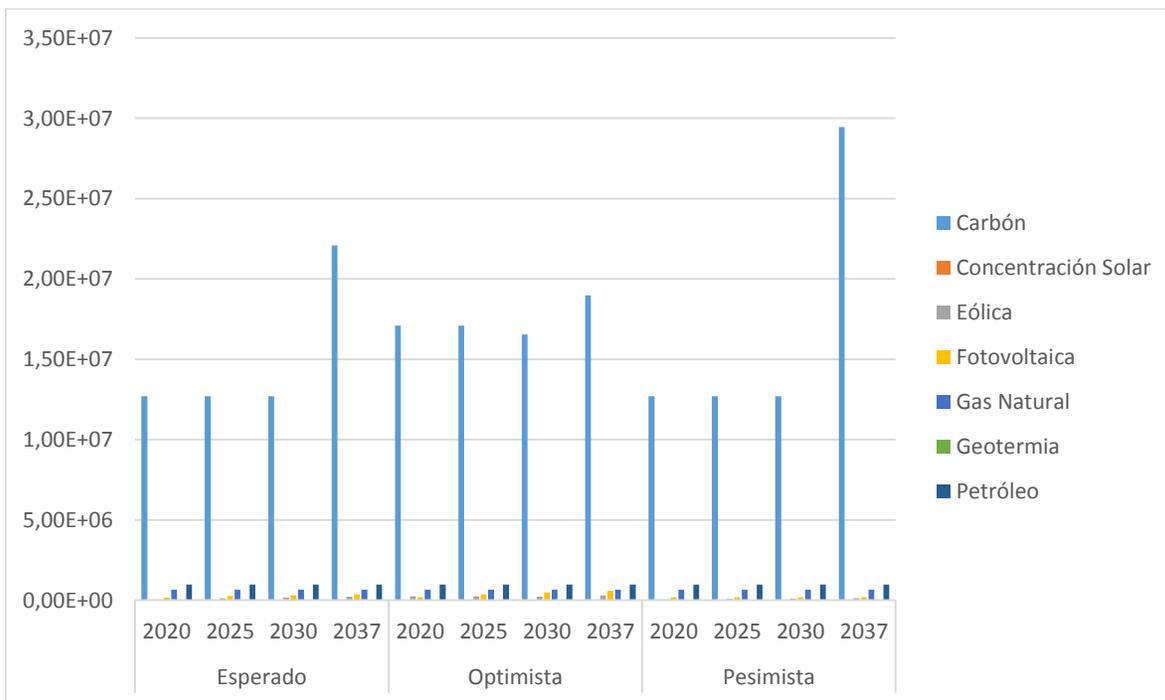
**Gráfico 62:** Ecotoxicidad de agua marina [kg DCB-Equiv. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



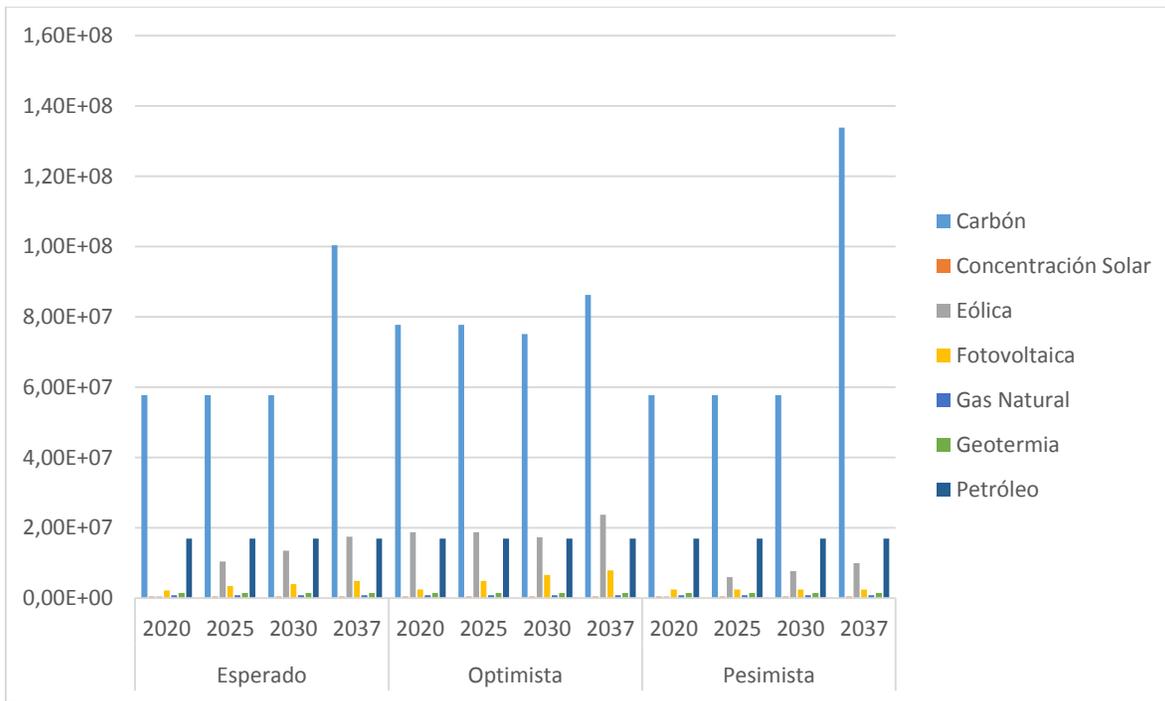
**Gráfico 63:** Ecotoxicidad de agua marina renovables [kg DCB-Equiv. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



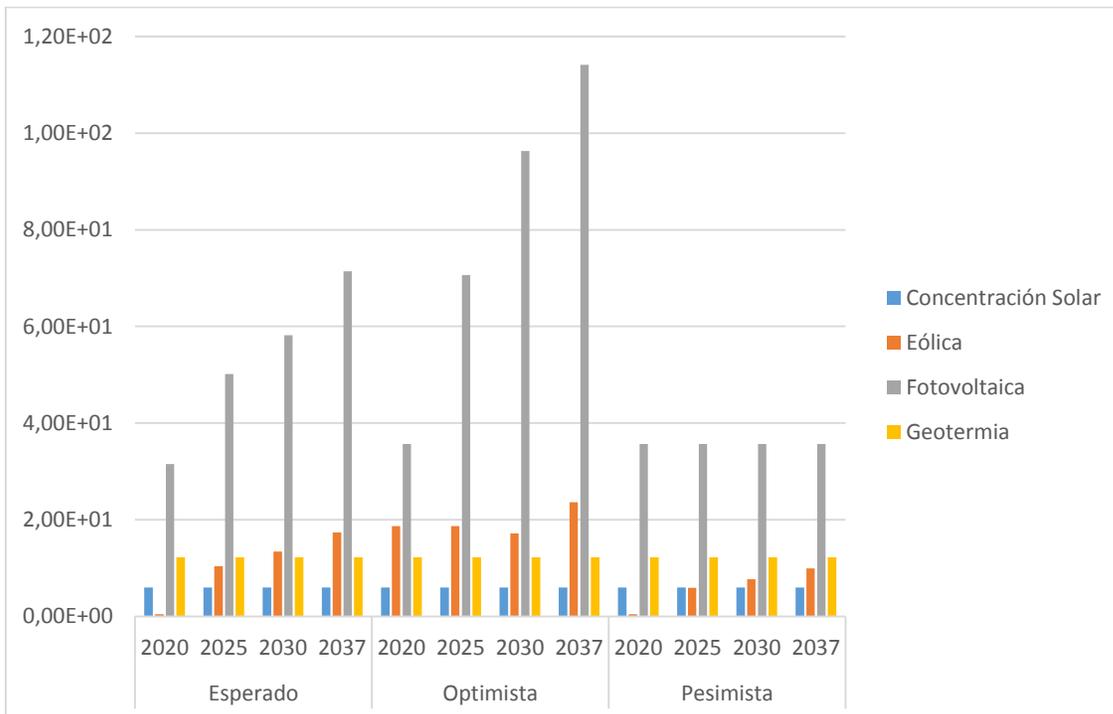
**Gráfico 64:** Smog fotoquímico [kg Etileno-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



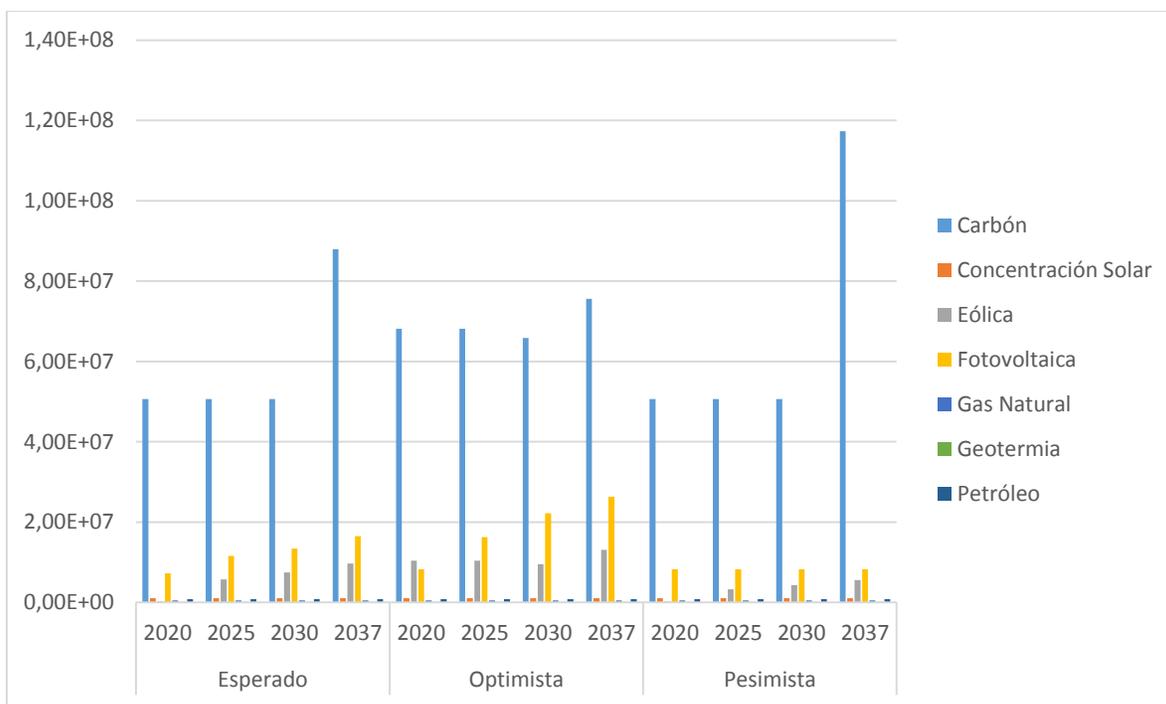
**Gráfico 65:** Ecotoxicidad terrestre [kg DCB-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 66:** Agotamiento de la capa de ozono renovables [kg R11-eq. / año] impactos globales, para diversos escenarios y años

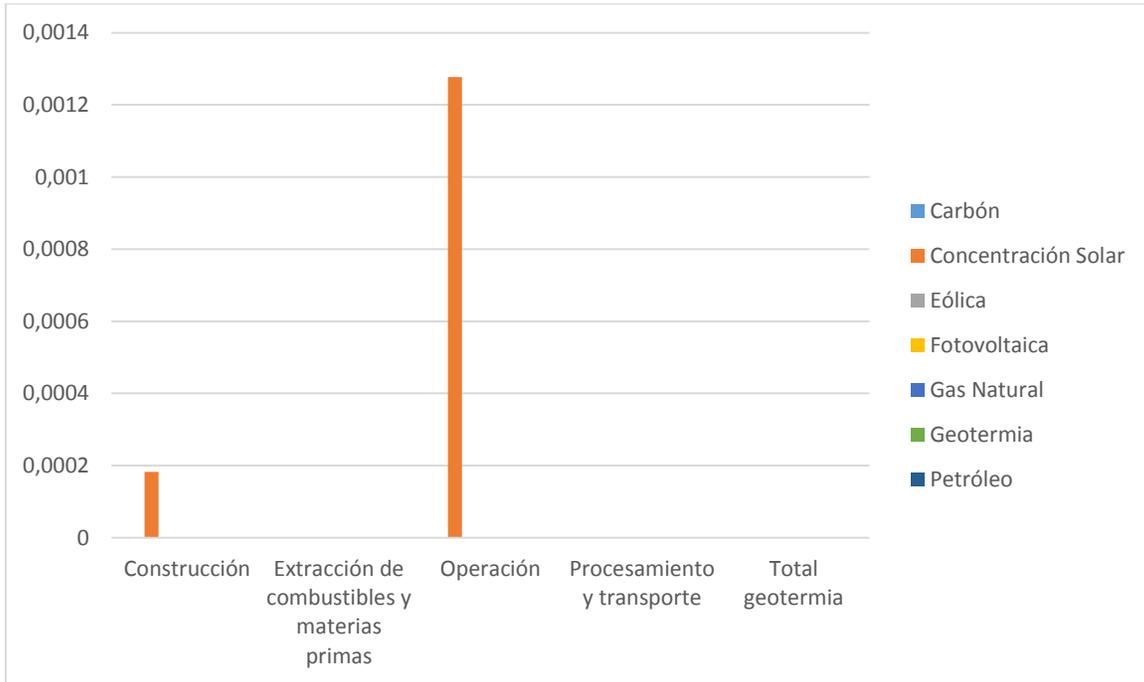
**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 67:** Uso de suelos [m2/año] impactos globales, para diversos escenarios y años.

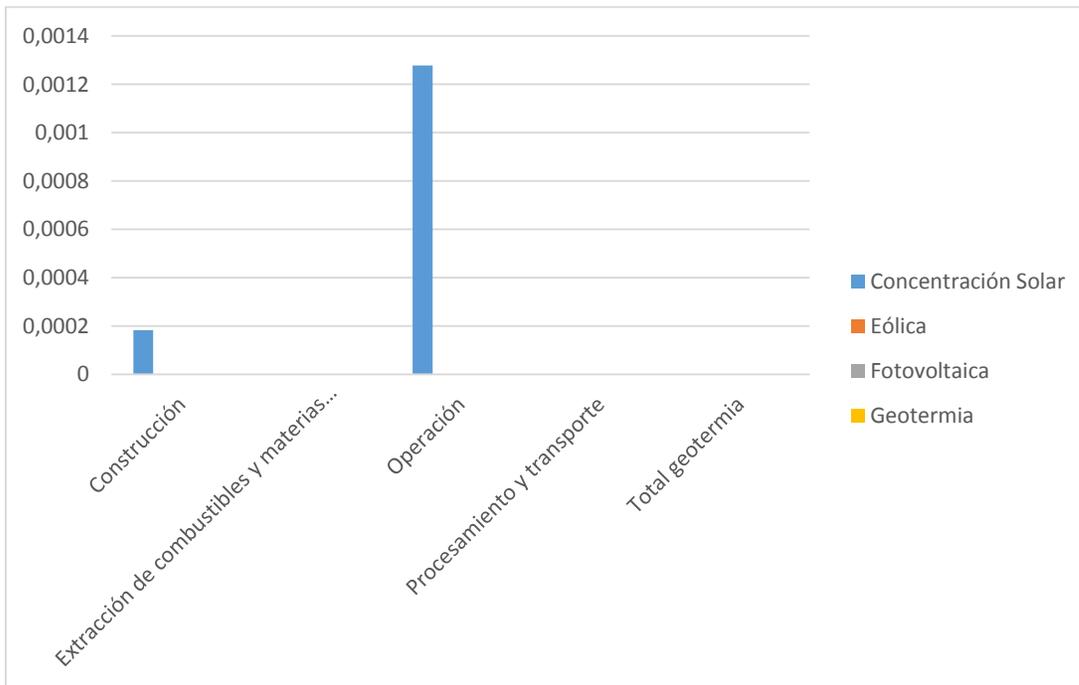
**Fuente:** Confección propia

## 11.9 Anexo 10: Gráficos impactos locales



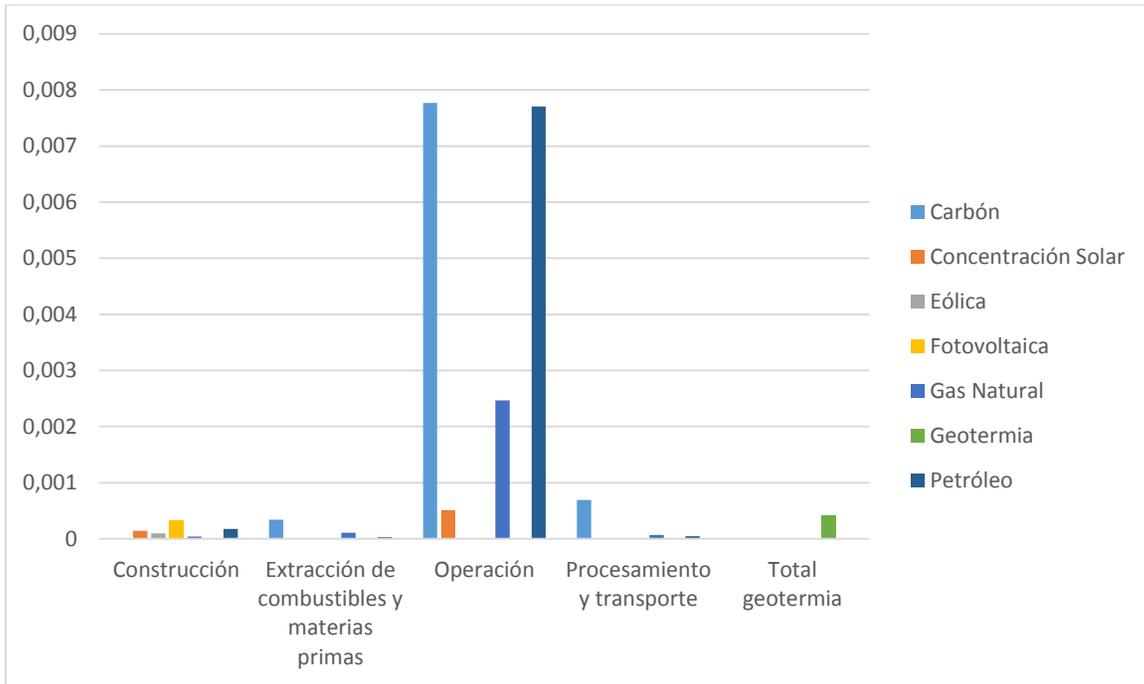
**Gráfico 68:** Agotamiento Abiótico [Kg Sb eq/kwh]

**Fuente:** Confección propia



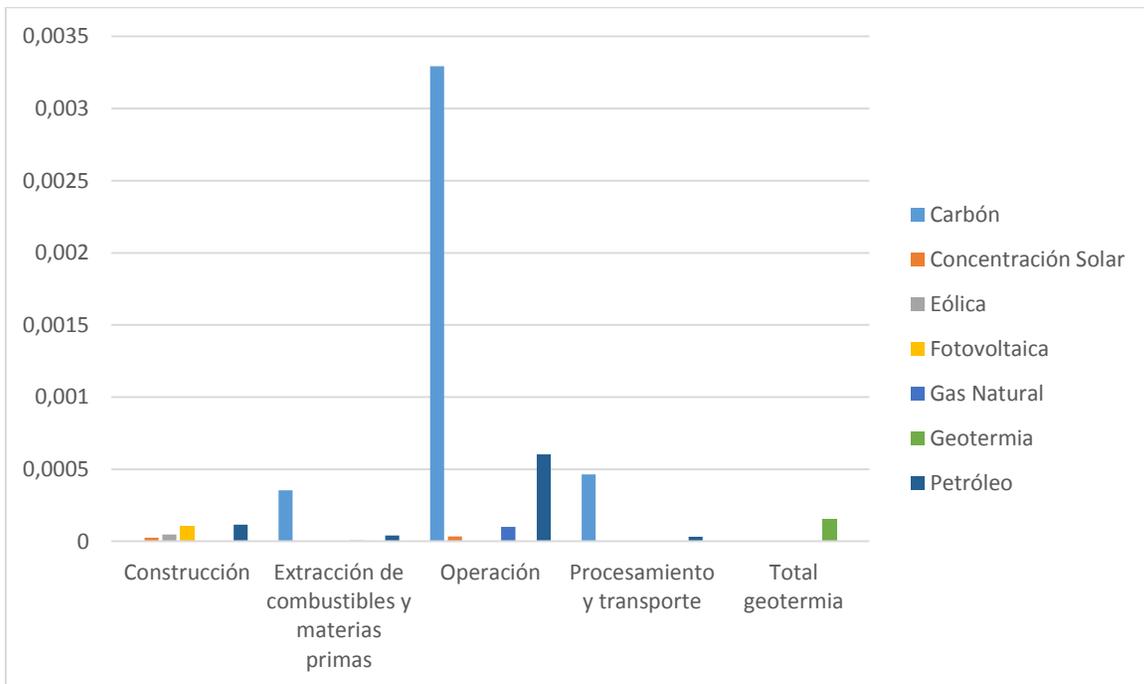
**Gráfico 69:** Agotamiento Abiótico renovables [Kg Sb eq/kwh]

**Fuente:** Confección propia



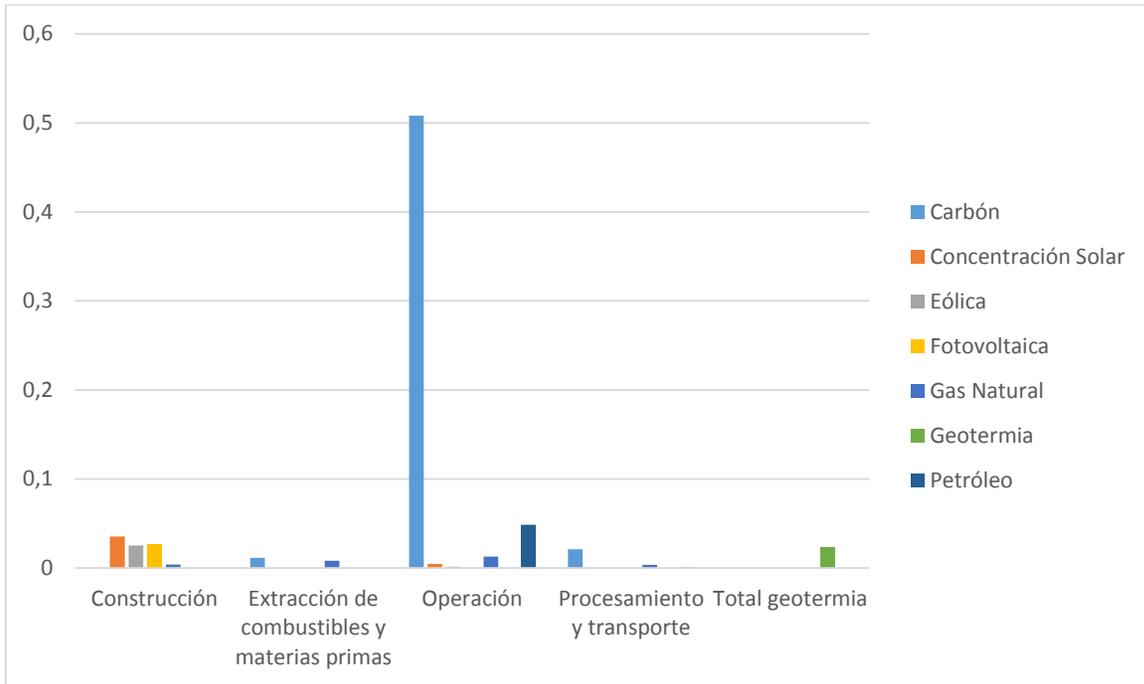
**Gráfico 70:** Acidificación [kg SO<sub>2</sub> eq. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



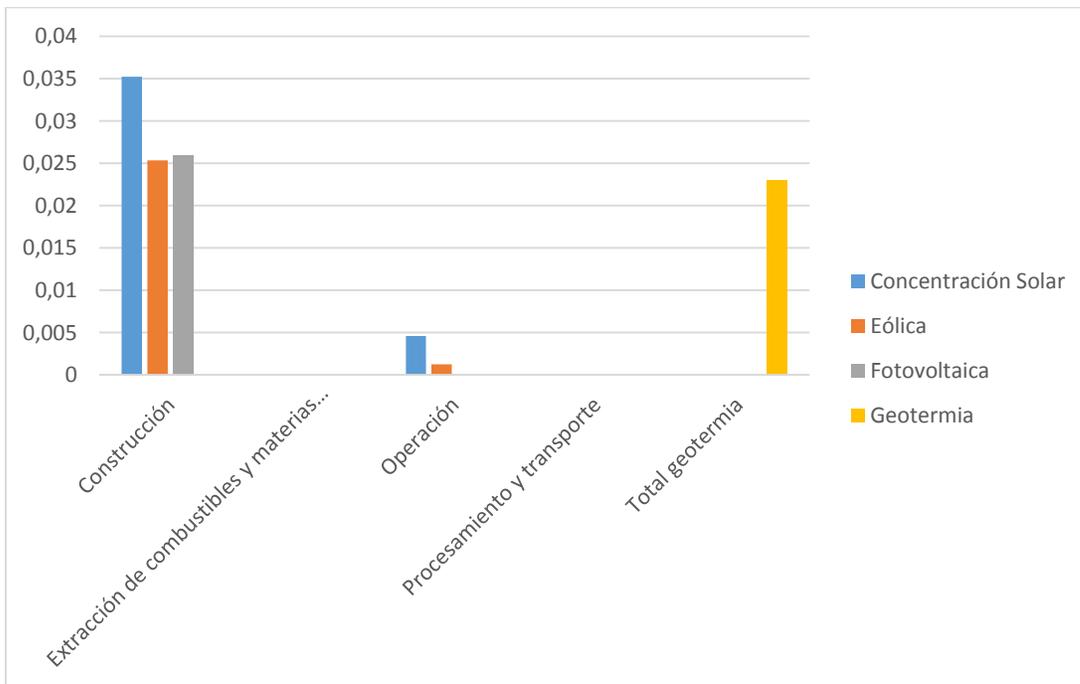
**Gráfico 71:** Eutrofización [kg fosfato-eq. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



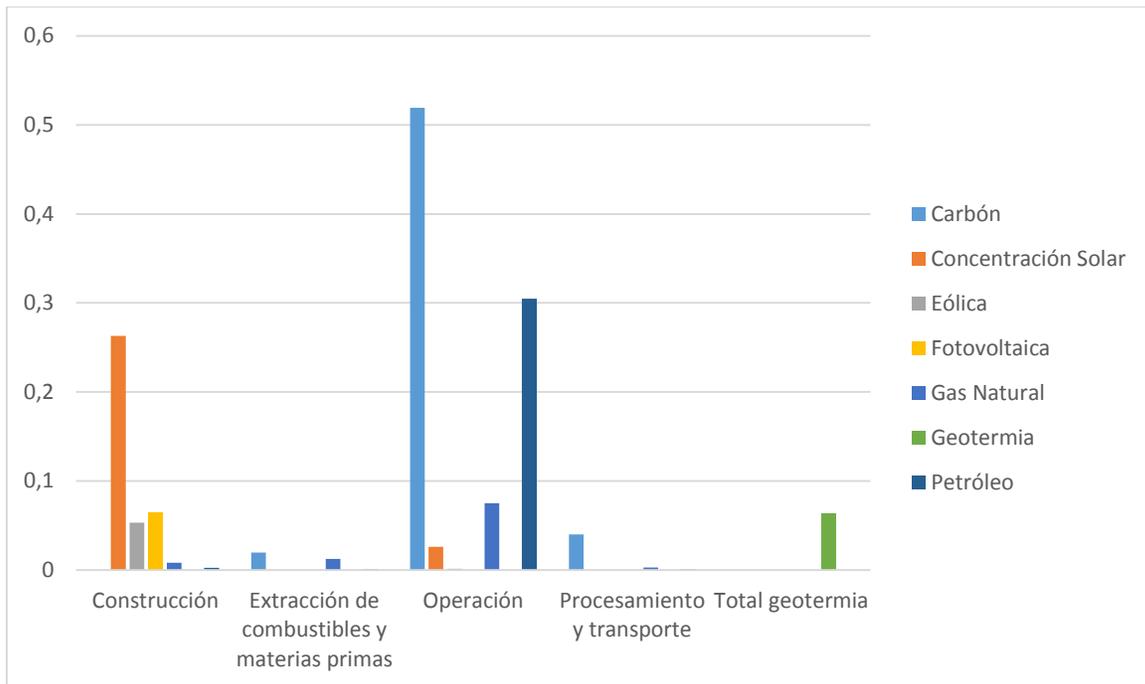
**Gráfico 72:** Ecotoxicidad de agua fresca [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



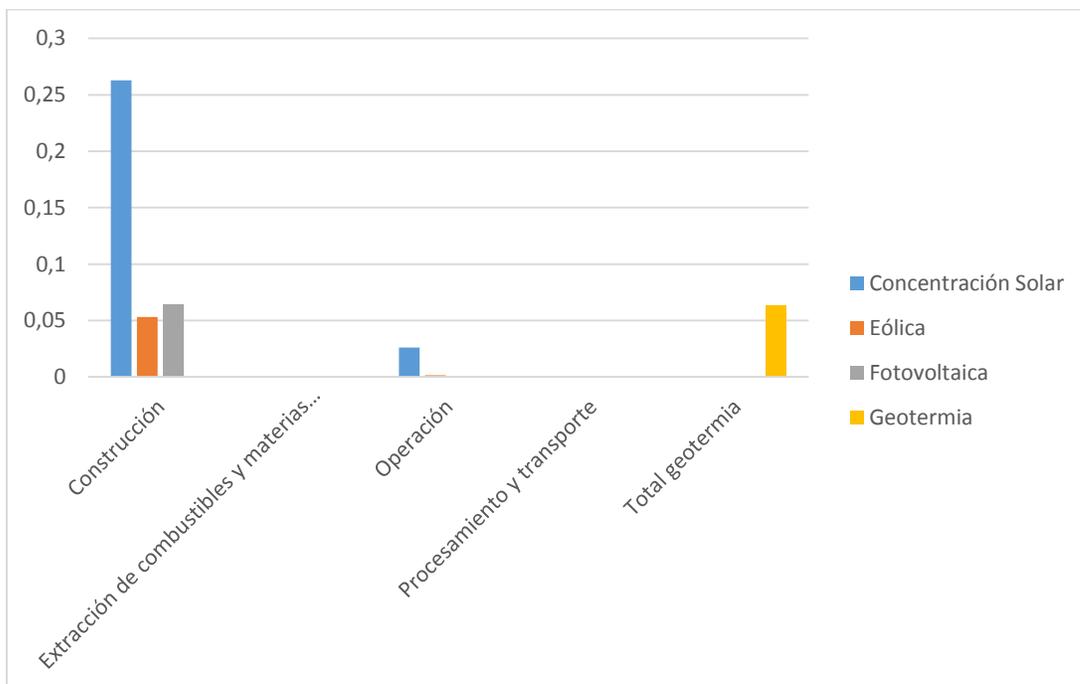
**Gráfico 73:** Ecotoxicidad de agua fresca renovables [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



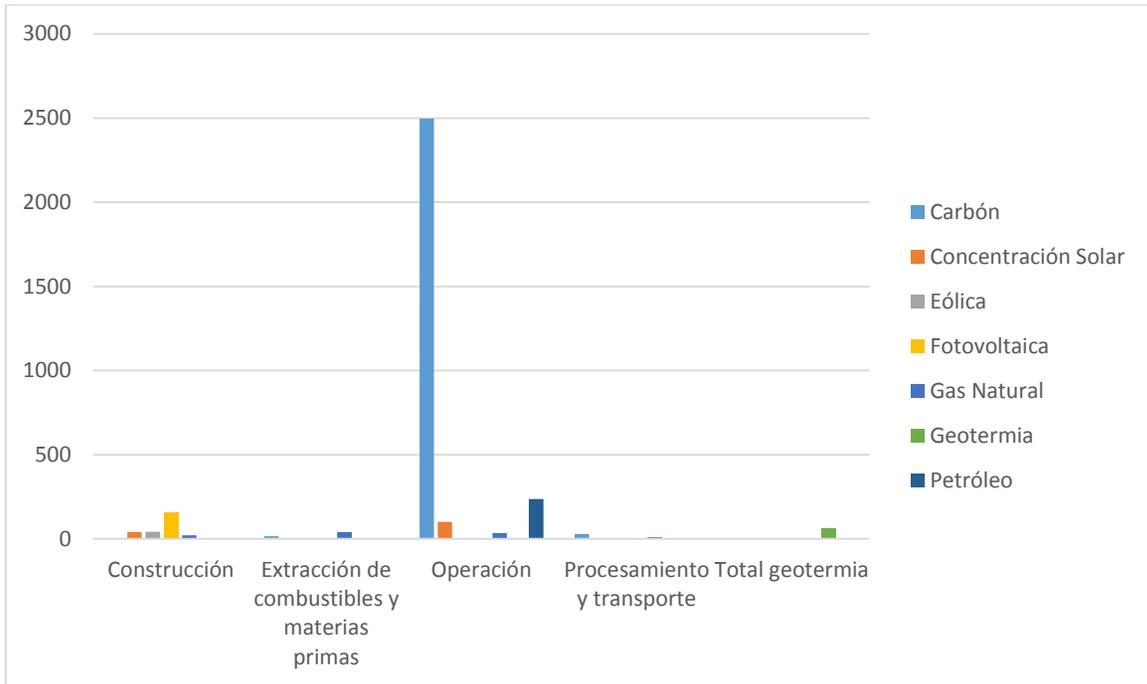
**Gráfico 74:** Ecotoxicidad humana [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



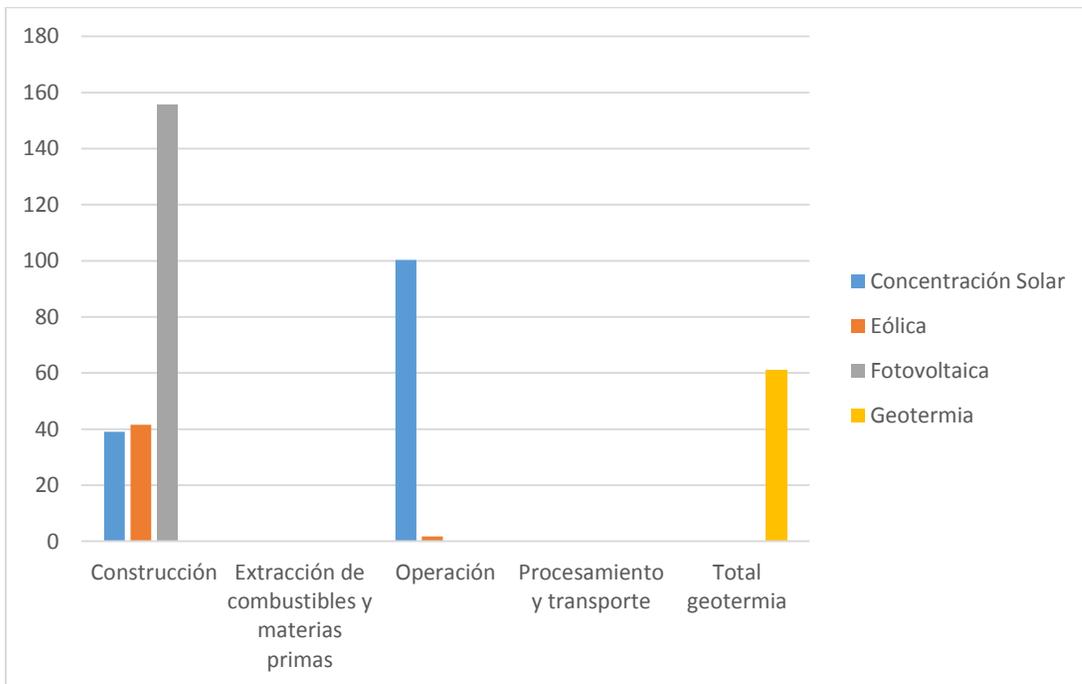
**Gráfico 75:** Ecotoxicidad humana renovables [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



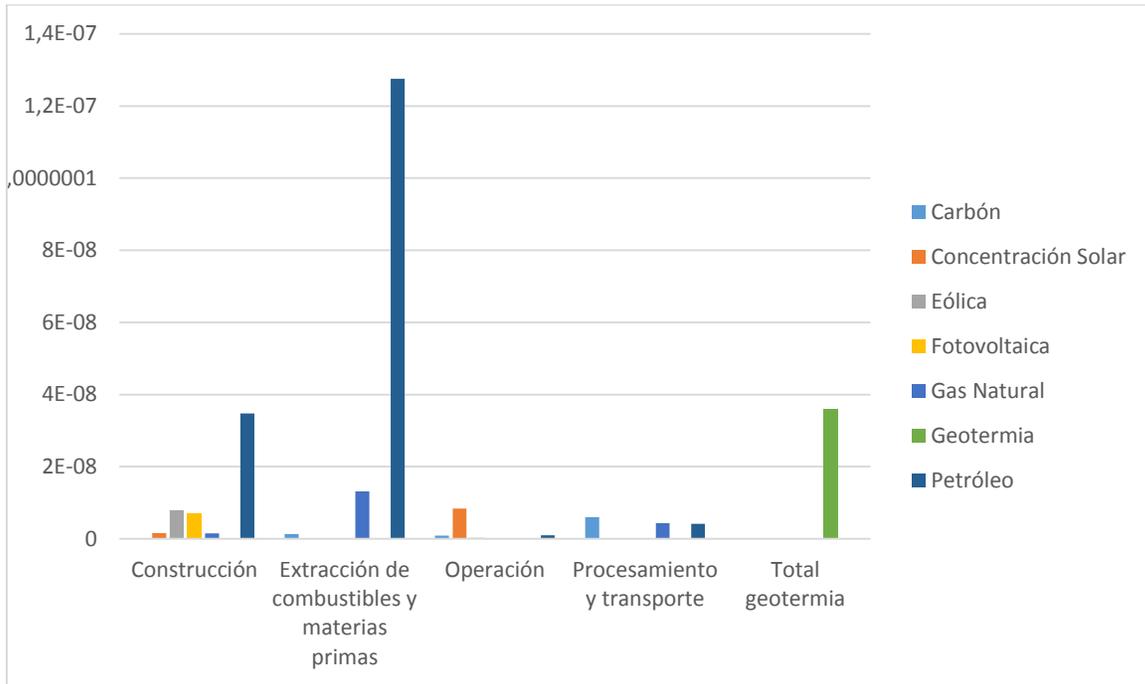
**Gráfico 76:** Ecotoxicidad de agua marina [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



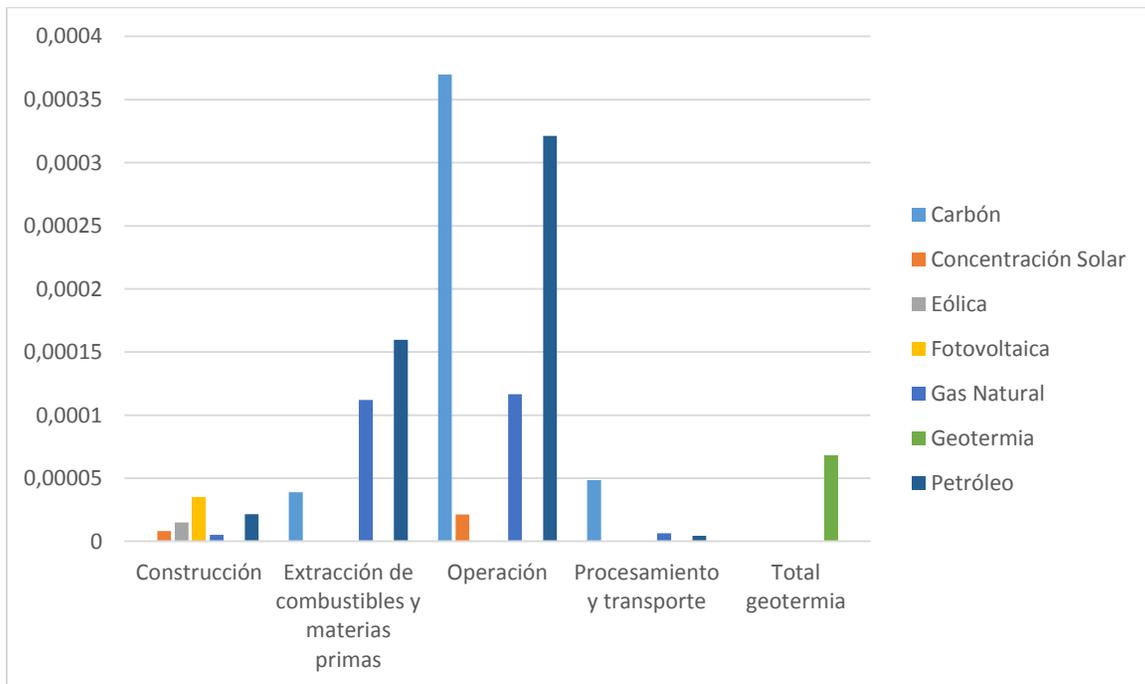
**Gráfico 77:** Ecotoxicidad de agua marina renovables [kg DCB-Equiv. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



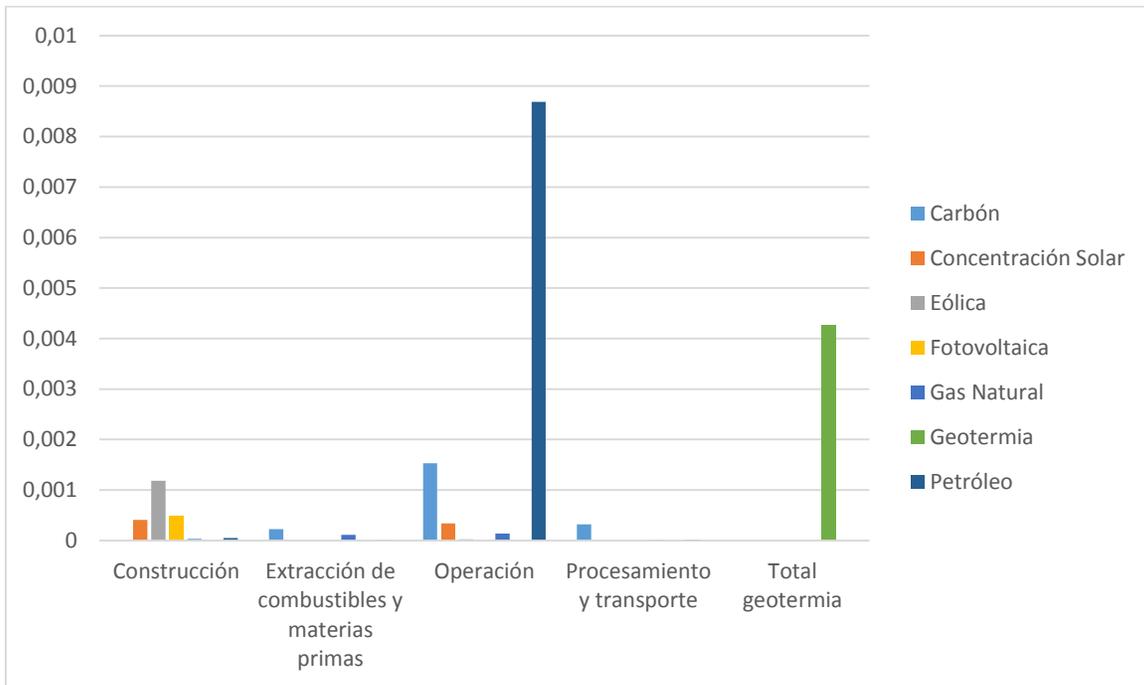
**Gráfico 78:** Agotamiento de la capa de ozono [kg R11-eq. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



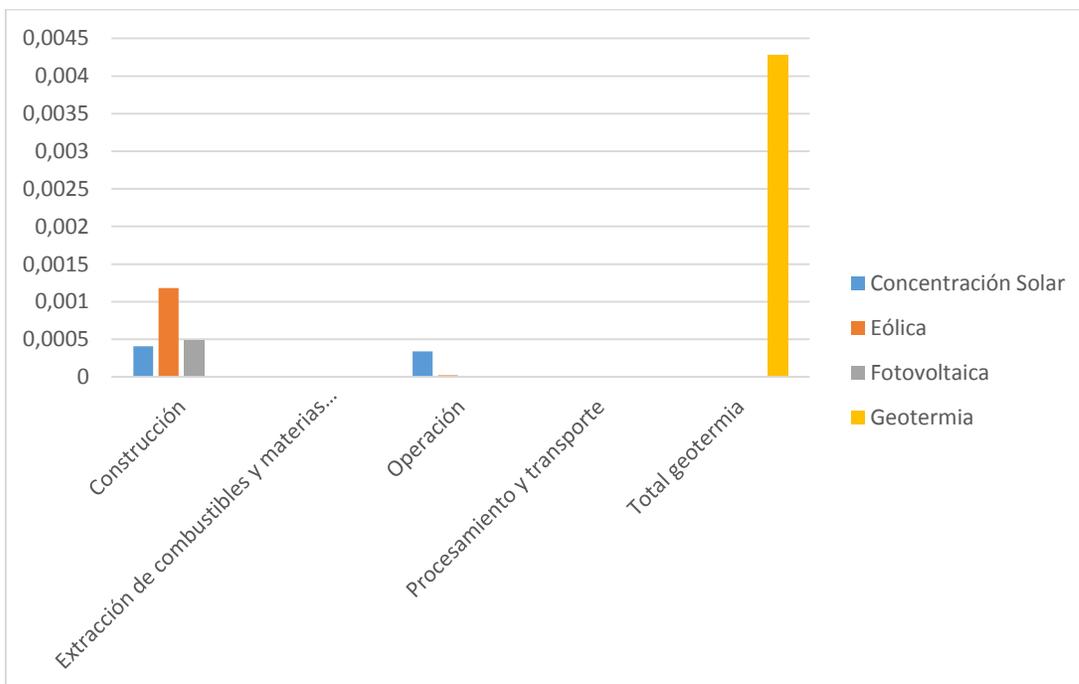
**Gráfico 79:** Smog fotoquímico [kg Etileno-eq. /kwh]

**Fuente:** Confección propia



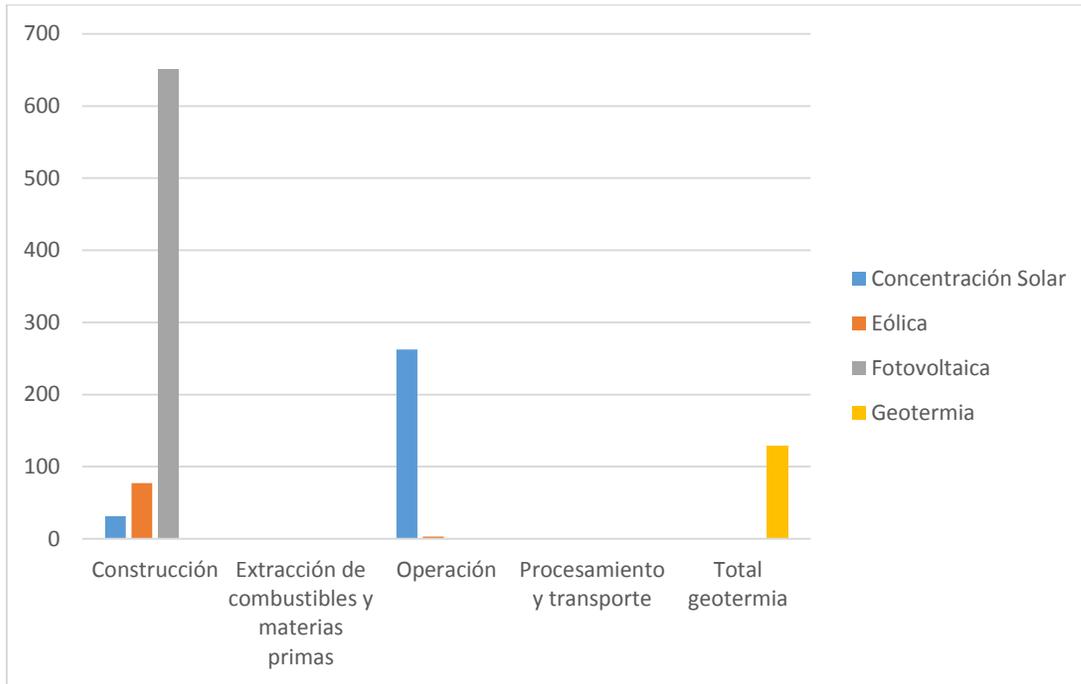
**Gráfico 80:** Ecotoxicidad terrestre [kg DCB-eq./kwh]

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 81:** Ecotoxicidad terrestre renovables [kg DCB-eq./kwh]

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 82:** *Uso de agua [L/kWh]*

**Fuente:** *Confección propia*

## **11.10 Anexo 11: Descripción partes involucradas montaje ERNC, Bibliografía de Hotspots**

[28] Fotovoltaica:

Los módulos de energía solar fotovoltaica convierten la radiación solar directamente en energía y entregan beneficios al medioambiente al compararse con energías convencionales como por ejemplo la reducción en la generación de gases de efecto invernadero y polución. No obstante, este tipo de generación eléctrica también tiene impactos ambientales que pueden ser evidenciados con un análisis de ciclo de vida.

Pasos para fabricar un módulo fotovoltaico:

Las celdas solares de silicio son quizás la configuración más tradicional de una central de generación fotovoltaica. El proceso para la fabricación de celdas monocristalinas de silicio se discute a continuación en breve:

**Purificación del silicio:** El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es reducido químicamente en un horno a silicio (Si) y carbón (C). Luego el silicio es purificado en hornos vertiéndolo y soprándolo con una mezcla de oxígeno y cloro, lo que conlleva a su solidificación. Luego se vuelve a purificar hasta llevarlo a la forma de un semiconductor, pasando por procesos como la preparación de la superficie, la difusión de dopantes y el revestimiento.

**Diseño del módulo:** Las celdas de silicio individuales son interconectadas en serie y paralelo para la fabricación del módulo. Un módulo contiene entre 20-40 celdas y cada módulo puede tener entre 3-5 columnas de celdas conectadas en serie de forma de obtener la generación eléctrica óptima.

[22] Eólica:

“Es bien reconocido por la comunidad internacional sobre la energía eólica el hecho de que, si bien no utiliza combustibles fósiles, no se puede aseverar que sea una solución definitivamente buena para el medioambiente.”

Descripción de una turbina de 4.5MW

La torre de concreto es de 124m de alto y el diámetro del rotor es de 113m con tres aspas. El generador es sincrónico con una caja de cambios y conexión directa a la red. Las componentes de la turbina son:

Torre: hecha de concreto y elementos metálicos galvanizados. Las piezas de metal son pintadas.

Góndola: incluye el eje, acero, cobre, hierro y resina de poliéster insaturado como sus componentes principales.

Aspas: hechas de fibra de vidrio y resina epoxi principalmente.

### [23] Concentración Solar

Manufactura: extracción de materias primas, transporte a centro de manufactura, procesos de manufactura, transporte del producto final al almacenaje regional.

Construcción: actividades asociadas a mejoras del sitio, transporte de componentes al sitio, ensamblaje de la planta.

O&M: manufactura de componentes de reemplazo y su transporte al sitio, consumo de agua en el bloque de generación y para la limpieza de los espejos, consumo de combustibles en limpieza y mantención de vehículos, combustión de gas natural en el campamento, consumo eléctrico.

Sistema de fluido de transferencia de calor: Incluye la tubería de cabecera, sistema de drenaje de nitrógeno, bombas de circulación y el fluido de transferencia de calor.

Sistema de campo solar: marcos, espejos, elementos colectores de calor (HCE's), controles de seguimiento, sistemas de accionamiento y cimientos.

Almacenamiento de energía térmica: medio de almacenamiento, tanques, cimientos, aislamiento, tuberías, intercambiadores de calor y bombas.

Sistema de planta de energía: componentes asociados típicamente al bloque de alimentación, como otros componentes de la planta (edificios, carreteras y estacionamientos).

## 11.11 Anexo 12: Impactos anuales escenario esperado

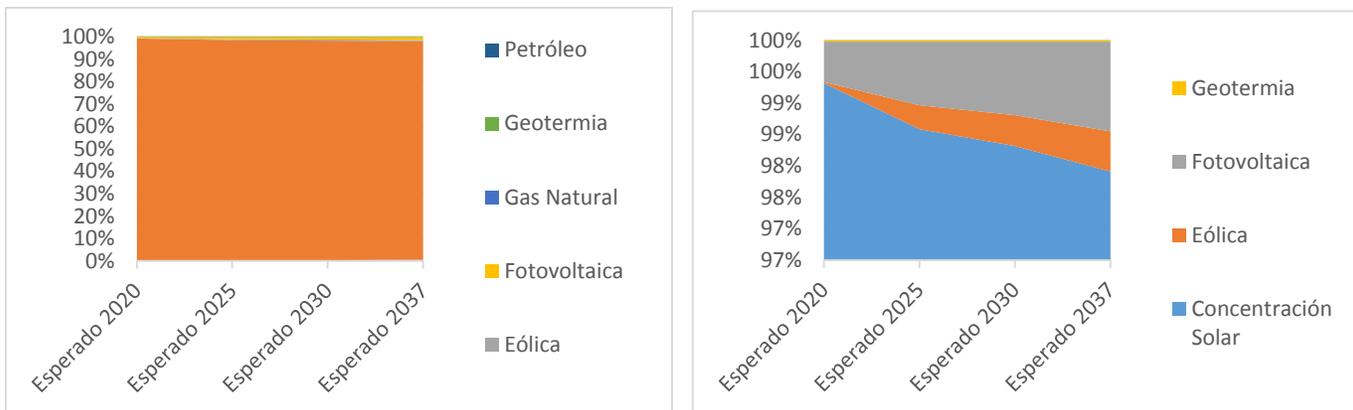
	Escenario Esperado								Unidad de medida
	Carbón	Concentración Solar	Eólica	Fotovoltaica	Gas Natural	Geotermia	Petróleo	Total	
<b>Agotamiento Abiótico</b>									
2020	0,27%	98,98%	0,02%	0,64%	0,04%	0,02%	0,03%	8,82E+02	Ton. Sb-eq
2025	0,27%	98,24%	0,38%	1,01%	0,04%	0,02%	0,03%	8,89E+02	Ton. Sb-eq
2030	0,27%	97,98%	0,49%	1,17%	0,04%	0,02%	0,03%	8,91E+02	Ton. Sb-eq
2037	0,47%	97,38%	0,63%	1,42%	0,04%	0,02%	0,03%	8,97E+02	Ton. Sb-eq
<b>Acidificación</b>									
2020	90,80%	0,15%	0,01%	0,54%	2,72%	0,05%	5,72%	2,69E+05	Ton. SO2-eq
2025	90,23%	0,14%	0,33%	0,86%	2,71%	0,05%	5,68%	2,71E+05	Ton. SO2-eq
2030	90,01%	0,14%	0,43%	1,00%	2,70%	0,05%	5,67%	2,72E+05	Ton. SO2-eq
2037	93,80%	0,09%	0,33%	0,73%	1,62%	0,03%	3,40%	4,53E+05	Ton. SO2-eq
<b>Eutrofización</b>									
2020	97,93%	0,03%	0,01%	0,41%	0,26%	0,05%	1,31%	1,17E+05	Ton. fosfato-eq
2025	97,36%	0,03%	0,36%	0,64%	0,26%	0,05%	1,31%	1,17E+05	Ton. fosfato-eq
2030	97,16%	0,03%	0,47%	0,74%	0,26%	0,04%	1,30%	1,18E+05	Ton. fosfato-eq
2037	98,17%	0,02%	0,35%	0,53%	0,15%	0,03%	0,76%	2,02E+05	Ton. fosfato-eq
<b>Toxicidad agua fresca</b>									
2020	97,86%	0,16%	0,06%	0,76%	0,50%	0,05%	0,62%	1,53E+07	Ton. DCB eq
2025	96,05%	0,15%	1,47%	1,18%	0,49%	0,05%	0,61%	1,56E+07	Ton. DCB eq
2030	95,45%	0,15%	1,89%	1,37%	0,48%	0,05%	0,61%	1,57E+07	Ton. DCB eq
2037	96,84%	0,09%	1,43%	0,98%	0,28%	0,03%	0,35%	2,70E+07	Ton. DCB eq
<b>Potencial Calentamiento Global</b>									
2020	89,06%	0,05%	0,02%	0,55%	5,11%	0,06%	5,15%	3,55E+07	Ton. CO2 eq.
2025	88,44%	0,05%	0,40%	0,86%	5,08%	0,06%	5,11%	3,58E+07	Ton. CO2 eq.
2030	88,21%	0,05%	0,51%	1,00%	5,06%	0,06%	5,10%	3,59E+07	Ton. CO2 eq.
2037	92,65%	0,03%	0,40%	0,74%	3,06%	0,04%	3,08%	5,93E+07	Ton. CO2 eq.
<b>Toxicidad Humana</b>									

2020	92,17%	0,99%	0,11%	1,65%	1,55%	0,12%	3,42%	1,75E+07	Ton. DCB eq
2025	89,00%	0,96%	2,59%	2,53%	1,49%	0,12%	3,30%	1,81E+07	Ton. DCB eq
2030	87,97%	0,95%	3,33%	2,91%	1,47%	0,12%	3,26%	1,83E+07	Ton. DCB eq
2037	91,79%	0,57%	2,59%	2,14%	0,89%	0,07%	1,96%	3,05E+07	Ton. DCB eq
<b>Toxicidad agua marina</b>									
2020	97,83%	0,12%	0,02%	0,97%	0,39%	0,03%	0,64%	7,21E+10	Ton. DCB eq
2025	96,79%	0,11%	0,51%	1,52%	0,39%	0,03%	0,64%	7,29E+10	Ton. DCB eq
2030	96,41%	0,11%	0,66%	1,76%	0,39%	0,03%	0,64%	7,32E+10	Ton. DCB eq
2037	97,56%	0,07%	0,50%	1,26%	0,23%	0,02%	0,37%	1,26E+11	Ton. DCB eq
<b>Agotamiento capa de ozono</b>									
2020	35,01%	0,91%	0,06%	4,80%	7,94%	1,86%	49,41%	6,56E-01	Ton. R11 eq.
2025	33,55%	0,87%	1,51%	7,32%	7,61%	1,79%	47,35%	6,85E-01	Ton. R11 eq.
2030	33,01%	0,86%	1,93%	8,36%	7,49%	1,76%	46,59%	6,96E-01	Ton. R11 eq.
2037	45,24%	0,68%	1,97%	8,09%	5,90%	1,39%	36,73%	8,82E-01	Ton. R11 eq.
<b>Smog fotoquímico</b>									
2020	87,33%	0,12%	0,04%	1,09%	4,52%	0,16%	6,74%	1,45E+04	Ton. etileno eq.
2025	86,02%	0,12%	0,90%	1,72%	4,45%	0,16%	6,64%	1,48E+04	Ton. etileno eq.
2030	85,55%	0,12%	1,16%	1,98%	4,43%	0,16%	6,60%	1,48E+04	Ton. etileno eq.
2037	90,71%	0,07%	0,92%	1,48%	2,70%	0,10%	4,03%	2,43E+04	Ton. etileno eq.
<b>Toxicidad terrestre</b>									
2020	72,21%	0,56%	0,53%	2,71%	0,99%	1,82%	21,19%	8,00E+04	Ton. DCB eq.
2025	63,30%	0,49%	11,39%	3,78%	0,87%	1,59%	18,58%	9,12E+04	Ton. DCB eq.
2030	60,86%	0,47%	14,22%	4,22%	0,83%	1,53%	17,86%	9,49E+04	Ton. DCB eq.
2037	70,50%	0,31%	12,26%	3,45%	0,56%	1,02%	11,90%	1,42E+05	Ton. DCB eq.
<b>Uso de agua</b>									
2020	56,90%	1,92%	0,31%	31,91%	3,70%	0,48%	4,78%	9,15E+06	Toneladas
2025	45,10%	1,52%	6,02%	40,26%	2,93%	0,38%	3,79%	1,15E+07	Toneladas
2030	41,65%	1,41%	7,21%	43,17%	2,71%	0,35%	3,50%	1,25E+07	Toneladas
2037	50,75%	0,99%	6,54%	37,14%	1,90%	0,25%	2,45%	1,78E+07	Toneladas
<b>Uso de suelos</b>									
2020	83,50%	1,76%	0,39%	11,98%	0,78%	0,23%	1,37%	6,06E+03	Hectáreas
2025	71,86%	1,51%	8,17%	16,41%	0,67%	0,20%	1,17%	7,04E+03	Hectáreas

2030	68,39		10,09		18,13%	0,64%	0,19%	1,12%	7,40E+03	Hectáreas
2037	75,44%	0,91%	8,29%	14,12%	0,41%	0,12%	0,71%	1,17E+04	Hectáreas	

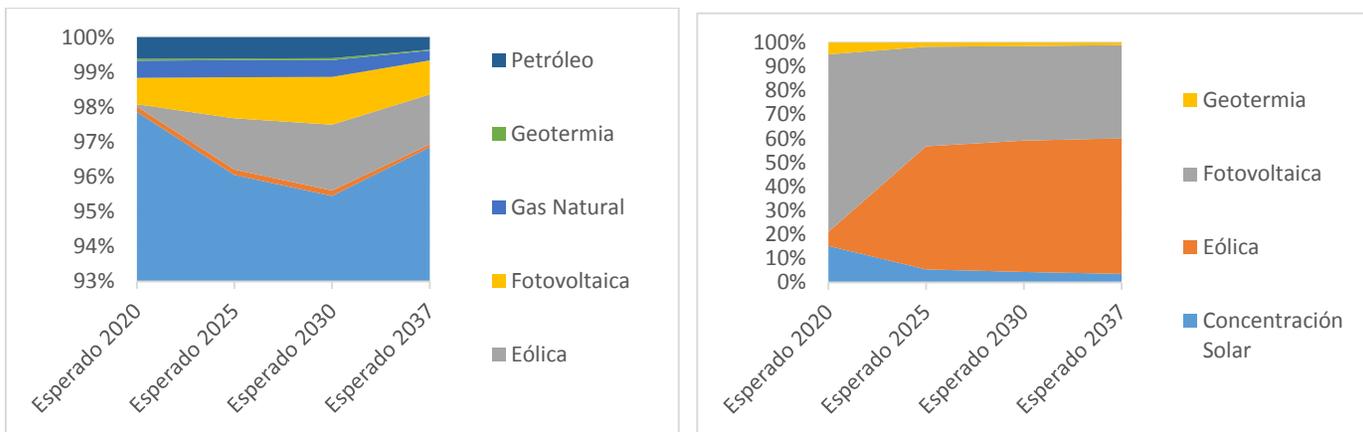
**Tabla 4:** Impactos anuales escenario esperado

**Fuente:** Confección propia



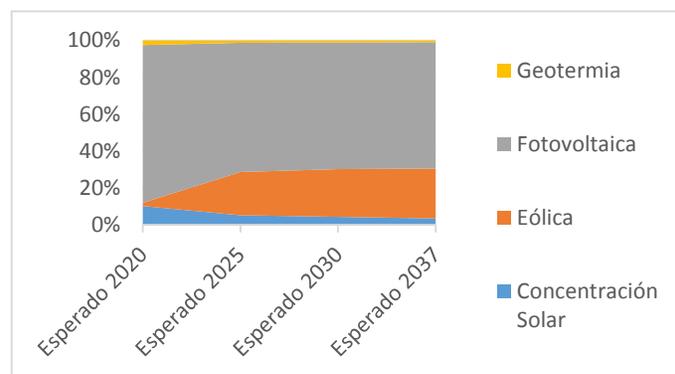
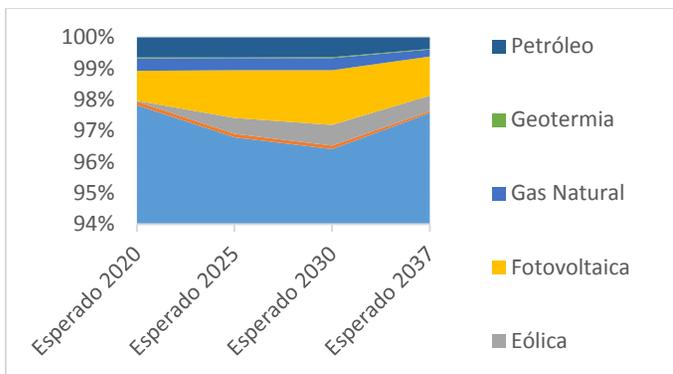
**Gráfico 83:** Impactos anuales agotamiento abiótico escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



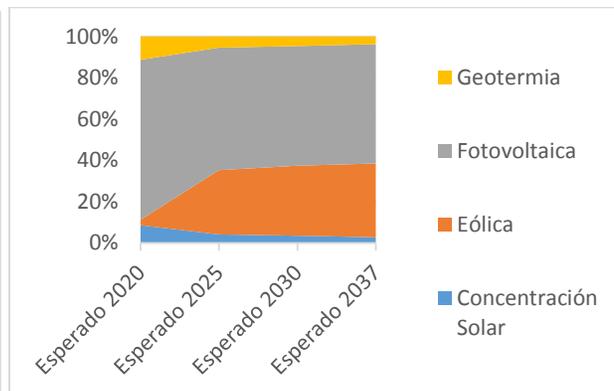
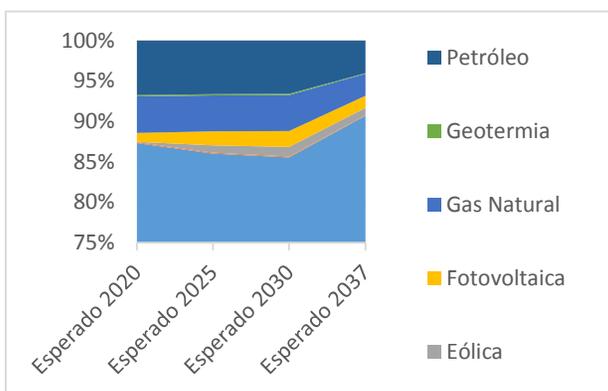
**Gráfico 84:** Impactos anuales toxicidad agua fresca escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 85:** Impactos anuales toxicidad agua marina escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables (der)

**Fuente:** Confección propia



**Gráfico 86:** Impactos anuales smog fotoquímico escenario esperado. Todas las tecnologías (izq), sólo renovables(der)

**Fuente:** Confección propia