



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelado de escenarios de impacto
ambiental de la manufactura de paneles
solares**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Industrial

P R E S E N T A

Valeria Vázquez Ramírez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Flor Hernández Padilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia que siempre me acompañó y apoyó en cada etapa de mi vida, recordándome en los momentos de mayor duda, lo que es importante.

A la doctora Flor Hernández por guiarme y enseñarme tanto en este proceso.

A todas las personas que estuvieron involucradas en este proyecto de investigación; cuya labor, dedicación y esfuerzo retroalimentaron enormemente al trabajo y lograron los resultados que aquí se reflejan.

Igualmente, extendo un agradecimiento hacia el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por haber financiado el proyecto IA106723 "Hacia la sostenibilidad de la manufactura de la industria fotovoltaica en México", con lo cual fue posible la realización de este trabajo.

Índice

1. Introducción.....	5
1.1. Justificación	8
1.2. Objetivo.....	8
1.3. Metodología	8
2. Marco teórico.....	9
2.1. Análisis de Ciclo de Vida.....	9
2.2. Tecnología fotovoltaica.....	25
2.3. Visitas a dos empresas de manufactura de paneles fotovoltaicos.....	28
2.4. Diagrama de bloques.....	35
3. Marco regulatorio de los residuos de la industria fotovoltaica	37
4. Inventario de Ciclo de Vida.....	42
4.1. Entradas.....	42
4.2. Emisiones	43
4.3. Residuos	43
4.4. Estimaciones de consumo eléctrico.....	44
5. Modelos de ciclo de vida de manufactura de paneles fotovoltaicos	46
5.1. Incineración.....	50
5.2. Reciclaje.....	53
5.3. Relleno sanitario	54
5.4. Relleno sanitario no controlado.....	56
6. Comparativa de escenarios	58
7. Análisis de resultados	60
7.1. Impactos al agua dulce	60
7.2. Cambio climático, calidad de los ecosistemas	64
7.3. Impactos al agua del mar.....	68
7.4. Acidificación del terreno.....	71
7.5. Uso de suelo	75
7.6. Disponibilidad de agua.....	79
7.7. Radiación ionizante, calidad de los ecosistemas	81

7.8.	Cambio climático, salud humana	85
7.9.	Disponibilidad de agua, salud humana.....	88
7.10.	Toxicidad humana.....	91
7.11.	Formación de partículas	96
7.12.	Radiación ionizante, salud humana.....	100
7.13.	Agotamiento de la capa de ozono	103
7.14.	Formación de oxidantes fotoquímicos	107
7.15.	Análisis global.....	111
7.16.	Propuestas de mejora analizadas	116
8.	Conclusiones.....	119
9.	Anexos.....	122
9.1.	Impacto en el ecosistema y la salud humana por residuo de la manufactura de paneles fotovoltaicos.....	122
9.2.	Cantidad de flujos elementales emitidos por proceso representativo y tipo de tratamiento de residuos durante la fabricación de paneles fotovoltaicos.....	123
10.	Referencias	124

1. Introducción

Desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido las mayores promotoras del cambio climático, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como lo son el dióxido de carbono y el metano (United Nations, 2021). El sector energético representó casi el 75% de las emisiones de estos GEI a nivel mundial en 2020, siendo la generación de electricidad y calor los mayores emisores (Climate Watch, 2021). Entre las consecuencias más alarmantes del cambio climático se puede mencionar sequías, escasez de agua, incendios, aumento del nivel del mar, inundaciones, deshielo de los polos, disminución de la biodiversidad, pérdida de la capacidad para cultivar alimentos, etc. Limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1.5 °C nos ayudará a evitar los peores impactos climáticos y a mantener un clima habitable (United Nations, 2021).

Es gracias a estas preocupaciones, junto a la crisis energética experimentada en diferentes países, que en los últimos años se habla cada vez más de una transición de los sistemas energéticos tradicionales basados en la quema de combustibles fósiles hacia aquellas formas de producir energía de manera limpia, sostenible, renovable y sustentable. Formas de producir energía como a través de la fuerza del viento, el flujo del agua, el poder calorífico del subsuelo, entre otras más; podrían reducir las emisiones que provocan el cambio climático, por lo que han sido altamente promovidas. Hablando de un caso en particular, tenemos la industria fotovoltaica, cuyo desarrollo ha sido considerable en las últimas décadas, sin embargo, un crecimiento exorbitante y descontrolado de esta industria ¿Qué conllevaría? ¿A la larga podría alejarnos de nuestros objetivos ambientales? Sobre todo, en nuestro país, México.

Como en todo proceso productivo, en la manufactura de paneles fotovoltaicos están involucrados ciertos impactos al medio ambiente y la generación de determinados residuos y emisiones. El análisis de estos residuos y emisiones se volverá cada vez más apremiante a futuro. En primer lugar, porque el crecimiento de la industria fotovoltaica traerá consigo una generación cada vez más importante de residuos. En segundo lugar, porque se ha visto que los paneles fotovoltaicos contienen materiales, como metales pesados y otros componentes tóxicos, que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y para la salud humana si no se gestionan adecuadamente. También, se espera que la importancia que gane esta industria, la haga acreedora de una regulación cada vez más estricta y específica que obligará tanto a los gobiernos como a las empresas a obtener más información sobre el tema. En cualquier caso, los estudios sobre los residuos y emisiones de la industria fotovoltaica, al seguir esta tendencia, con el tiempo serán altamente necesarios.

El crecimiento de la industria fotovoltaica, y por tanto de sus residuos, ya sea durante los procesos productivos o al final de la vida útil de sus productos, está ligado a los esfuerzos por procurar la seguridad energética del mundo. La expansión de las economías, el impulso de las industrias nacionales y la atención a distintas necesidades de una población mundial cada vez mayor, requieren de la construcción de más servicio eléctricos. Dado el panorama político actual, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) prevé que la demanda mundial total de energía aumente de 630 exajoules (EJ) en 2022 a 670 EJ en 2030, con una tasa media de crecimiento anual de 0.7%. Esta tasa se espera que aumente entre 2030 y 2050 a 9% en países desarrollados y a 16% en países en vías de desarrollo. Entre los medios que se emplearán para cubrir esta demanda futura, por su puesto, se contempla la energía solar, cuya expansión de la capacidad de fabricación ha sido aún más rápida. La AIE reporta que la tasa de utilización de la fabricación solar se ha reducido de cerca de 60% a menos del 40% en 2022. Esto es realmente notable, si se

considera que estar por debajo de un nivel del 70% es lo que normalmente se consideraría saludable para una industria madura (International Energy Agency, 2023). Además, la eficiencia de conversión de los paneles ha aumentado hasta un 0,5% cada año durante la última década y los costos de producción (y por tanto los precios) han disminuido debido a las innovaciones en los procesos de fabricación, incentivados principalmente en China (Atasu, Duran, & Van Wassenh, 2021). Pero eso no es todo. Gracias a su reciente gran éxito y a las cuantiosas inversiones previstas para esta industria, la AIE pronostica que la capacidad mundial de fabricación de módulos fotovoltaicos pase de 640 GW en 2022 a 1200 GW en 2030 (International Energy Agency, 2023). Tal y como se ve, es prácticamente un hecho que la demanda energética mundial aumentará año con año y que el desarrollo tecnológico de la industria fotovoltaica no hará más que crecer, haciéndose cada vez más asequible. Si bien, esto suena como un escenario positivo, no se puede ignorar que este crecimiento se acompañará de otro tipo de problemas potenciales que deberán empezar a ser analizados desde tiempos tempranos, ahora que el cambio a gran escala está aún en progreso, para así tratar de evitarlos o hacerles frente una vez que lleguen.

La industria fotovoltaica también contamina. Quizá no en la misma magnitud que los sistemas tradicionales, pero aún no existe un sistema energético que no despidan ni una sola emisión o produzca residuos. Se sabe que los paneles fotovoltaicos contienen metales pesados, como cadmio y plomo, que no sólo se convierten en residuos (clasificados como peligrosos) después de que el panel se desecha tras su vida útil o por haberse dañado, también durante su manufactura estos residuos surgirán en diferentes etapas del proceso, sobre todo como excedentes, rechazos o reparaciones. Además, la materia prima que se emplea en un panel fotovoltaico, así como el consumo energético implicado en toda su cadena de suministro, no están exentos de liberar emisiones de todo tipo al medio ambiente. Por otro lado, podríamos considerar que los problemas de gestión de residuos de la industria fotovoltaica podrían reducirse si aplicamos algunos principios de la economía circular, como el reciclaje, pero no es tan sencillo y menos cuando se tiene un producto terminado. Contrario a lo que se piensa, el reciclaje de los componentes de paneles fotovoltaicos (como las celdas fotovoltaicas) aún no ha sido muy desarrollado. Lo que es peor. Los paneles fotovoltaicos no contienen muchos materiales valiosos que incentiven los esfuerzos para invertir en su recuperación, al estar compuestos en su mayoría de silicio. Dada esta situación, es probable que muchos de los residuos de esta industria terminen siendo tratados por métodos generales que se aplican a cualquier tipo de residuo (incineración, rellenos sanitarios, vertederos a cielo abierto, etc.) que en contraste implican menores costos, aunque no siempre son los más recomendados cuando se pretende cuidar al medio ambiente (Atasu, Duran, & Van Wassenh, 2021). Igualmente, con base en nuestras observaciones, en México (el escenario que más nos preocupa) tras su fabricación, la mayoría de los paneles fotovoltaicos manufacturados en el país no terminan siendo instalados en el mismo, gran parte son exportados. En consecuencia, México se queda con los residuos y emisiones de esta industria sin poder beneficiarse de su producción de energía más limpia que compensa sus impactos ambientales. Sin duda, tras considerar todo esto, no podemos afirmar que la producción de energía a través de tecnología fotovoltaica no se acompaña de problemas de residuos o emisiones que a la larga impacten al medio ambiente. Es posible que con mayor investigación se lleve un estricto control de las emisiones de esta industria, lo que dará a los ecosistemas la oportunidad de recuperarse de los daños que podamos causarles, pero para conseguirlo se debe entender que consecuencias está provocando actualmente y cuáles son las reglas a seguir para trabajar en congruencia con el objetivo ecológico que en principio promueve el desarrollo de la tecnología fotovoltaica.

Se está viendo que se necesitan leyes y reglamentos claros que nos guíen en una transición energética representada por la tecnología fotovoltaica, los cuales serán alimentados por el conjunto de investigaciones que se lleven a cabo sobre el tema. Actualmente los gobiernos y diferentes organizaciones internacionales están trabajando para mejorar sus regulaciones acerca de los impactos ambientales de la industria fotovoltaica. La base de este esfuerzo está en la idea de que el impacto ambiental futuro de la manufactura de paneles fotovoltaicos, en parte, será reducida con una correcta gestión de sus residuos. Por ejemplo, en 2014 la Directiva WEEE de la Unión Europea (UE), que ofrece un marco legal para el reciclaje y la eliminación de residuos electrónicos en los estados miembros de la UE, se modificó para incluir paneles fotovoltaicos. Paralelamente, hay estados de EE.UU que han promulgado leyes sobre el reciclaje de productos electrónicos fuertemente influenciadas por el modelo WEEE, por lo que se espera que también lleguen a añadir paneles fotovoltaicos (Atasu, Duran, & Van Wassenh, 2021). Tal y como se aprecia, de la mano con la nueva información sobre el impacto ambiental de la industria fotovoltaica, y el desarrollo de mejores tratamientos para la gestión de sus residuos y prácticas para reducir sus emisiones industriales, surgirán cada vez más normas que gestionen de forma sustentable a estos sistemas energéticos.

Finalmente, después de todo lo discutido, se hace más evidente que los impactos ambientales de la industria fotovoltaica deben ser estudiados y analizados, en pro de contribuir a la construcción de una industria que se acerque más a alcanzar la visión ecológica que en principio la distinguen. Se espera que la industria fotovoltaica esté en constante cambio y evolución, por lo que la cantidad de paneles fotovoltaicos instalados aumentará significativamente en los próximos años. Sujeto a este crecimiento, se verá un incremento de sus residuos cuya disposición incorrecta causa contaminación del suelo y el agua, así como daños a la vida silvestre y a la salud humana, de modo que se necesitarán desarrollar mejores prácticas al respecto. Afortunadamente, a nivel internacional las regulaciones sobre el impacto ambiental de la industria fotovoltaica están en proceso. En definitiva, un estudio sobre los residuos y emisiones de la industria de paneles fotovoltaicos es necesario para abordar de manera efectiva los desafíos ambientales, económicos y legales asociados con su gestión y tratamiento en un momento en que la energía solar está desempeñando un papel cada vez más importante en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

1.1. Justificación

Tal y como se planteó en la introducción, la realización de este trabajo se justifica en el propósito del mismo proyecto de investigación del cual se deriva, de contribuir al estudio en el campo de la gestión de residuos y emisiones de paneles fotovoltaicos para abordar los desafíos ambientales, económicos y legales asociados con esta industria en crecimiento, sobre todo en México. Como herramienta principal de este trabajo se eligió al Análisis de Ciclo de Vida, ya que permitirá evaluar y comprender plenamente el impacto ambiental de la manufactura de paneles fotovoltaicos. Igualmente, surge la posibilidad de que los resultados finales de este trabajo contribuyan a la toma de decisiones informadas, el desarrollo de políticas efectivas y el avance hacia una energía más sostenible y limpia.

1.2. Objetivo

Modelar escenarios de Análisis de Ciclo de Vida de las etapas de la manufactura de paneles solares para rastrear el proceso o materia prima de mayor carga ambiental.

1.3. Metodología

1. Documentación de Análisis de Ciclo de Vida, manufactura de paneles fotovoltaicos, modelado en software OpenLCA y base de datos de Ecoinvent.
2. Visitas a dos empresas de manufactura de paneles fotovoltaicos
3. Realizar el inventario de Ciclo de Vida de la manufactura de paneles solares en México
4. Modelo de Análisis de Ciclo de Vida
5. Análisis de resultados
6. Recomendaciones para trabajos futuros

2. Marco teórico

2.1. Análisis de Ciclo de Vida

En la actualidad, las personas están acostumbradas a consumir una gran variedad de productos. Detrás de estos productos existen operaciones y procesos que generan impactos al medio ambiente, ya sea que hacen uso de grandes cantidades de recursos naturales, emiten sustancias dañinas a los ecosistemas o provocan otras alteraciones ambientales durante toda su existencia. Por este motivo, es importante estimar y evaluar estos impactos, a fin de tener información que dará sustento a decisiones empresariales, políticas gubernamentales o no gubernamentales en materia ambiental. De ahí la razón de ser del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El concepto de ACV ha sido estandarizado en la norma ISO 14010:2006, la cual, se refiere a esta metodología como una “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”. En otras palabras, de acuerdo con el Instituto de Medio Ambiente y Sostenibilidad perteneciente al Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC-IES, por sus siglas en inglés), en su guía general de ACV, publicada en 2010, se dice que es un método completo y estructurado en el que se cuantifican todas las emisiones relevantes, recursos consumidos, impactos tanto ambientales como de salud, así como los problemas de agotamiento de recursos que están asociados con cualquier bien o servicio; a los que la JRC-IES dice que se nombra simplemente como “productos”.

Un ACV tiene cuatro características que lo distinguen de otras herramientas de evaluación de impactos ambientales (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017):

- Toma una perspectiva de ciclo de vida: Esta metáfora proviene de la biología, en donde se sigue el desarrollo de los seres vivos desde su nacimiento hasta su muerte. Un ACV no tiene como objeto de estudio a un ser vivo, sino que suelen ser productos físicos (fabricados por el hombre) o también, compañías o energía. De manera especial, se emplea el término "sistema de producto" para indicar que se tienen en cuenta todos los procesos necesarios para que el producto funcione; desde la recolección y extracción de recursos, seguida de la producción, el uso y, finalmente, la gestión del objeto como residuo, que marca el final de su ciclo de vida. La razón principal para usar una perspectiva de ciclo de vida es que permite identificar y prevenir el desplazamiento de la carga ambiental entre las etapas del ciclo de vida de un producto (o procesos), cuando los esfuerzos para reducir los impactos ambientales en un proceso productivo crean involuntariamente impactos (posiblemente mayores) en otros procesos o etapas del ciclo de vida.
- Cubre un amplio rango de cuestiones ambientales: Un ACV hace una cobertura exhaustiva de diferentes cuestiones ambientales implicadas a en el ciclo de vida de un producto. En lugar de centrarse únicamente a una problemática (como el cambio climático, que hoy en día recibe más atención), el ACV abarca una amplia gama de problemáticas medioambientales (normalmente unas quince), ya que, al considerar múltiples cuestiones medioambientales se puede evitar el desplazamiento de cargas ambientales que podría suponer el intentar reducir un solo tipo de impacto ambiental.

- Es cuantitativo: Un ACV otorga una cifra al impacto potencial que podría tener un sistema de producto en el medio ambiente. Un resultado de esta naturaleza permite comparar el impacto ambiental de diferentes procesos y sistemas de productos (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017). No obstante, el enfoque exclusivo de un ACV al análisis y la interpretación de los impactos medioambientales hace que el método se limite a cuantificar únicamente el aspecto ecológico de la sostenibilidad. La exclusión de los factores económicos y sociales distingue el ACV de otros métodos similares. Esta separación se hizo para evitar una sobrecarga del método (Klöpffer & Grahl, 2014).
- Se basa en la ciencia: La cuantificación de los impactos potenciales en un ACV tiene sus raíces en las ciencias naturales. Los flujos se basan generalmente en mediciones. Los modelos de las relaciones entre emisiones (o consumo de recursos) e impacto se basan en casualidades probadas. Además, el ACV requiere un juicio de valor, que se hace más evidente en el paso opcional de asignar pesos a los distintos tipos de problemas medioambientales para evaluar el impacto global de un sistema de productos.

Dada su naturaleza, el ACV es considerado una herramienta que complementa la toma de decisiones, especialmente, en la necesidad de seleccionar y optimizar las opciones tecnológicas disponibles, tomando como criterio su efecto en el medio ambiente (Jolliet, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz , 2015). Además, el ACV puede ayudar a identificar oportunidades que harán que un producto tenga un mejor desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida, seleccionar indicadores de desempeño ambiental y mejorar la imagen de los organismos al ser usado en marketing (Organización Internacional de Normalización, 2012).

2.1.1. Semblanza del uso de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida

Los estudios de impacto ambiental de productos de consumo, como pueden ser los ACV, no son precisamente una herramienta reciente. Aunque la elaboración de análisis energéticos ya se llevaba a cabo desde muchos años antes, la historia de los ACV se remonta a finales de la década de 1960 y comienzos de 1970. Es durante esta época que se tiene registro de lo que hoy en día sería visto como estudios “parciales” de ACV, ya que, en materia ambiental, los problemas que eran apremiantes estaban relacionados con la eficiencia de los recursos y la energía, el control de la contaminación y los desechos sólidos (Guinée, y otros, 2011).

Tiempo después el alcance de estos primeros estudios se amplió, de manera que empezaron a abarcar los requisitos de recursos, las cargas de emisiones y los desechos generados. Algunos de estos estudios ampliados son aquellos conducidos por el Instituto de Investigación del Medio Oeste (MRI, por sus en inglés *Midwest Research Institute*) para la compañía Coca Cola en el año 1969 y para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en 1974. El MRI usó el término de Análisis de Perfiles Ambientales y de Recursos (REPA, por sus siglas en inglés *Resource and Environmental Profile Analysis*) para referirse en su momento a este tipo de estudios que se basaban en un sistema de análisis de la cadena de producción del producto investigado (de la cuna a la tumba). También en 1974, se sabe de un estudio similar conducido por Basler y Hoftman en Suiza, el cual, junto a los anteriores marcaron el inicio del desarrollo de estudios de ACV como los conocemos hoy en día.

Después de un periodo de tiempo en el que disminuyó el interés público y las publicaciones de estudios de ACV, en la década de 1980 comenzaron nuevamente a tener apoyo. En 1984, los Laboratorios Federales Suizos para Pruebas e Investigación de Materiales (EMPA, por sus siglas en inglés) publicaron un reporte que presentaba una

lista integral de los datos necesarios para un estudio de ACV, y del mismo modo, introdujo un primer método de impacto. Este método dividía las emisiones en el aire y en el agua a través de estándares semipolíticos y luego los agregaba, respectivamente, en lo que denominaron como “volúmenes críticos” de aire y “volúmenes críticos” de agua. (Guinée, y otros, 2011)

La década de 1990 fue una época de estandarización para los estudios de ACV, de escrutinio científico, de investigación de los fundamentos de ACV, de la exploración de las conexiones con las disciplinas existentes y de su incorporación a distintos documentos de política y de legislación.

A lo largo de los años 1970 y 1980, los ACV habían sido realizados utilizando diferentes métodos y sin un marco teórico común. Los años de 1990, caracterizados por el crecimiento científico y la globalización, vieron el surgimiento de un gran número de guías y manuales para realizar estudios de ACV. En un esfuerzo conjunto entre organismos de América de Norte y Europa, la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC, por sus siglas en inglés *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) comenzó a desempeñar un papel de liderazgo y coordinación al respecto. La SETAC reunió a los profesionales, usuarios y científicos de ACV para colaborar en la mejora continua y la armonización del marco, la terminología y la metodología de ACV. El *Code of Practice* (Código de prácticas) de la SETAC fue uno de los resultados clave de este proceso de coordinación.

Paralelamente a estos grupos de trabajo de la SETAC, en 1994 la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) comenzó una tarea formal de estandarización de métodos y procedimientos de ACV, logrado así desarrollar dos normas estándar internacionales que fueron actualizadas en el año 2006:

- ISO 14040 (2006E): Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia
- ISO 14044 (2006E): Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices

A pesar de todo, hay que tener en cuenta que la ISO nunca tuvo la intención de estandarizar a detalle los métodos de ACV. Un resultado clave de su trabajo de normalización fue brindar un marco metodológico general. De este modo, hoy en día sigue sin existir un método único para realizar un estudio de ACV. (Guinée, y otros, 2011)

Pasando los años noventa, a lo largo del siglo XXI se ha mostrado una atención cada vez mayor hacia los estudios de ACV. En 2002, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés *United Nations Environment Programme*) y la SETAC lanzaron la Iniciativa del Ciclo de Vida (*Life Cycle Initiative*). Esta iniciativa se creó con el objetivo principal de poner en práctica el pensamiento de ciclo de vida y mejorar las herramientas de apoyo a través de mejores datos e indicadores.

Fue sobre todo en Europa, que el pensamiento de ciclo de vida continuó creciendo y se incorporó en las estrategias temáticas sobre el uso sostenible de los recursos y sobre la prevención y el reciclaje de residuos. Ejemplo de esto es que en su Comunicación sobre Política Integrada de Productos (COM (2003) 302), la Comisión Europea concluyó que los ACV brindan el mejor marco para evaluar los impactos ambientales potenciales de los productos actualmente disponibles (European Commission, 2020). De esta manera, a mediados de 2005 comenzó un proyecto conjunto entre el DG Medio Ambiente (*DG Environment*) y el Centro Común de Investigación de la Dirección General de la Comisión (JRC-IES, por sus siglas en inglés *Commission's Directorate-General Joint Research Centre*) para establecer *The European Platform of Life Cycle Assessment* (la Plataforma Europea de

Evaluación de Ciclo de Vida). Esta plataforma tiene el propósito de promover el pensamiento de ciclo de vida en los negocios y en la elaboración de políticas en la Unión Europea, a la vez que proporciona datos, métodos y estudios de ACV de calidad garantizada. (Guinée, y otros, 2011)

Viendo hacia otras partes del mundo, a principios del siglo XXI, donde las políticas ambientales del planeta se basaban cada vez más en el ciclo de vida, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos comenzó a promover el uso de estudios de ACV. Así mismo, se establecieron varias redes nacionales de ACV como la *Australian LCA Network* y la *American Center for LCA*, ambas en 2001, o la *Thai network* en 2000 (de escala menor en comparación con las anteriores).

Recientemente, durante los años 2010 la demanda de estudios de ACV se disparó, siendo este auge caracterizado nuevamente por una divergencia en los métodos. Como ya se dijo, la ISO no estandarizó los métodos a detalle, por lo que no existe un acuerdo común sobre cómo interpretar sus requisitos. Debido a los distintos enfoques que se le pueden dar a un ACV, se han desarrollado variaciones con base en los límites del sistema y los métodos de asignación, como los: ACV dinámicos, ACV diferenciados espacialmente, ACV basados en el riesgo, ACV basados en insumo-producto ambiental e híbridos, entre otros. Estos diferentes enfoques tienen en común la base del ciclo de vida, pero difieren en la elaboración metodológica y en la(s) pregunta(s) que abordan.

Finalmente, sólo queda mencionar que la Comisión Europea reconoció este desafío y encargó el proyecto a la Acción de Coordinación para la Innovación en el Análisis del Ciclo de Vida para la Sostenibilidad (CALCAS, por sus siglas en inglés) en 2006 para estructurar el campo variable de los enfoques de LCA y definir líneas de investigación y programas para promover el LCA cuando sea necesario. Se ha finalizado el proyecto CALCAS y se han publicado los resultados. Uno de sus principales resultados se refiere al establecimiento de un marco para el Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) que vincula las cuestiones de sostenibilidad del ciclo de vida con el conocimiento necesario para abordarlas, identificando el conocimiento disponible y los modelos relacionados, las lagunas de conocimiento y la definición de programas de investigación para llenar estas lagunas (Guinée, y otros, 2011).

2.1.2. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida

Tal y como se vio en la sección anterior, las normas ISO, siendo su intención ofrecer un marco metodológico de ACV estandarizado, distingue cuatro fases:

- Definición del objetivo y el alcance

La primera fase de cualquier ACV es la definición del objetivo, y luego, el alcance del estudio. Esta fase es decisiva para las demás fases del ACV, y sobre todo, para la correcta interpretación de los resultados, ya que garantiza, en la medida de lo posible, que no puedan ser utilizados o interpretados involuntaria o erróneamente más allá del objetivo inicial y del ámbito para el que se llevó a cabo el estudio (JRC-IES, 2010).

En la definición del objetivo y el alcance se pretende describir el problema de estudio, identificar el contexto de la decisión, nombrar los destinatarios del estudio, así como la aplicación que se prevé para este (JRC-IES, 2010). En otras palabras, es una definición meditada y deliberada que responde a ¿Por qué se realiza el estudio? ¿Qué

preguntas pretende responder y a quién? Posteriormente, el objetivo será la base para definir el alcance del ACV, donde la evaluación se delimita y perfila; principalmente en términos de unidad funcional (descripción cuantitativa de la función o servicio para el que se realiza la evaluación, en ella se basarán los límites del sistema y sus entradas y salidas), alcance o límites del sistema del producto (las actividades y procesos que integran el ciclo de vida del producto que se estudia), parámetros de evaluación (los impactos ambientales que se evaluarán en el estudio), los límites geográficos, límites temporales, entorno del estudio, nivel tecnológico, nivel de detalle (depende del tema y uso previsto del estudio), perspectivas pertinentes que se aplicaran al estudio (si será un estudio de tipo consecucional o atribucional) y si existe la necesidad de realizar una revisión crítica (en especial si se divulgará al público) (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017).

- Análisis de inventario

El análisis de inventario recopila información sobre los flujos físicos de entrada (recursos, materiales, semiproductos y productos) y salida (emisiones, residuos y productos valiosos) del sistema de producto. De acuerdo con los objetivos y requisitos establecidos con base en el alcance de un ACV, un análisis de inventario revisa todos los procesos que integran al sistema de producto para identificar y escalar sus flujos de acuerdo con la unidad funcional del flujo de referencia del sistema de producto estudiado (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017). Para cumplir los objetivos de un ACV, un análisis como este cuantifica las emisiones contaminantes (a la atmósfera, el agua y el suelo), la extracción de materias primas (renovables o no renovables) y el uso de cualquier recurso necesario para el funcionamiento del sistema (Jolliet, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz , 2015); usando exclusivamente un enfoque en el que sólo se toman en cuenta los impactos potenciales causados por intervenciones entre el sistema analizado y su ambiente (un entorno que llega a conocerse como ecosfera), causado durante condiciones de funcionamiento normales y anormales de los procesos incluidos, pero excluyendo accidentes, vertidos y similares. Los efectos ajenos a los límites de un ACV deben agregarse e interpretarse por separado (JRC-IES, 2010).

Al final, el resultado de un análisis de inventario es lo que se conoce como Inventario de Ciclo de Vida (ICV), que es una lista de los flujos físicos elementales cuantificados y asociados a la unidad funcional (aquella que describe la prestación del servicio o función de un producto) para un sistema de producto (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017). En un ICV podemos encontrar datos de entradas y salidas del sistema estudiado, por lo que hay casos en los cuales el objetivo de un ACV se puede satisfacer elaborando solamente un ICV y su interpretación (excluyendo la fase de evaluación de impacto ambiental), lo que se conoce como estudio de ICV (Organización Internacional de Normalización, 2012) Gracias al desarrollo de un ICV y al aporte de su información, también podemos modificar la configuración inicial del alcance ya que a menudo necesita ajustes (JRC-IES, 2010).

De acuerdo con la JRC-IES (2010), un análisis de ICV, comúnmente, sigue los siguientes pasos: identificación de procesos, planeación de la recogida de datos e información (de fuentes primarias y secundarias), recopilación, desarrollo de datos genéricos (especialmente cuando no se disponga de ciertos datos, no haya recursos o forma de obtenerlos), obtención de datos básicos complementarios (como conjunto de datos de procesos unitario o de resultados de un ICV del proveedor de datos), promediar los datos ente procesos o productos, modelización del sistema (conectando y escalando los datos con la unidad funcional) y cálculo de resultados (suma de entradas y

salidas de todos los procesos dentro de los límites del sistema de producto). Estos pasos son iterativos. Además, dice que entre los datos que se consideran más importante recopilar para un análisis de ICV se encuentran:

- Flujos elementales: Como recursos, emisiones, uso de suelo, etc.
- Flujos de producto: Insumos, consumibles, bienes o servicios que son “producto” (o resultado) de determinado proceso que se vinculan con nuestro proceso analizado.
- Flujos de residuos: Como aguas residuales, residuos sólidos, residuos líquidos, entre otros, que deben ser vinculados a un proceso de gestión o tratamiento de residuos.
- Otra información que se considere relevante dado el tipo de sistema analizado: Exceptuando a los datos relacionados directamente con la evaluación de impacto, se pueden tener datos estadísticos, datos sobre las características de los procesos, datos sobre las características de los productos, etc.

Ya que es una fase en la que se requiere los mayores esfuerzos y recursos de un ACV (para recopilar, adquirir y modelar datos), a menudo este tipo de análisis tiene que basarse en datos genéricos (JRC-IES, 2010).

- Evaluación del impacto ambiental

En la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) se valora y estima la repercusión que tienen las emisiones inventariadas en el medio ambiente (Jolliet, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz , 2015). Su objetivo es proporcionar información adicional que ayude a comprender mejor la importancia ambiental de los resultados del ICV de un sistema de producto (Organización Internacional de Normalización, 2012).

A grandes rasgos, lo que se hace en una EICV es traducir los flujos físicos y las intervenciones del sistema de producto en impactos al medio ambiente (salud humana o agotamiento de recursos) utilizando conocimientos y modelos de la ciencia medioambiental (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017). En específico, analiza impactos ambientales potenciales causados por intervenciones que cruzan la frontera entre la tecnosfera (lo que se encuentra dentro de los límites del sistema de producto) y la ecosfera y actúan sobre el entorno natural y los seres humano (JRC-IES, 2010). Generalmente, los pasos que se siguen para conseguir esto son los siguientes: selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización; clasificación de las emisiones que contribuyen en cada categoría de impacto; caracterización de punto medio, en la que se ponderan las emisiones con una métrica común (por categoría de impacto) conocidos como factores de impacto, y se agregan en categorías de impacto de punto medio (*midpoint*, en el idioma inglés) más asociadas al perjuicio (o cambio) del medio ambiente; y caracterización de punto final, en la que se pondera y agrega las emisiones en categorías de impacto de punto final (*endpoint*, en el idioma inglés) más asociadas a daños directos a la sociedad, los recursos naturales y la biodiversidad (Jolliet, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz , 2015).

Como paso adicional, puede hacerse una normalización en el que todas las puntuaciones de los indicadores por categoría se expresan en la misma métrica. Esto se consigue multiplicando los resultados del EICV por factores de normalización que representen el inventario global de una referencia (como un país, ciudad o ciudadano medio), obteniendo así valores adimensionales. Otro paso que se puede llevar a cabo es la agrupación (o ponderación) en la que los resultados normalizados se multiplican por factores de ponderación, que indican la diferente relevancia que hay entre las distintas categorías de impacto (ponderación relacionada con el nivel medio) o áreas de protección (ponderación relacionada con el nivel final), consiguiendo valores que pueden sumarse en

un indicador de impacto global de valor único. Al final, los resultados de un EICV, ya sea que hayan sido normalizados o no o que hayan sido agrupados o no, se consideran indicadores potenciales de impacto ambiental, más que predicciones de efectos ambientales reales (JRC-IES, 2010).

- Interpretación

En la etapa de interpretación se resumen y discuten los resultados del ICV y/o del EICV como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance del ACV (Organización Internacional de Normalización, 2012). Dicho de otro modo, los resultados de las etapas anteriores se interpretan para responder a o las preguntas planteadas en la definición del objetivo. Para valorar la solidez de las conclusiones e identificar puntos en los que hace falta mayor investigación, se puede realizar un análisis de sensibilidad y un análisis de incertidumbre (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2017).

2.1.3. Software para Análisis de Ciclo de Vida

Con el propósito de facilitar el desarrollo de la etapa de EICV, para este trabajo se usará el software openLCA en su versión 1.10.3 (openLCA 1.10.3).

openLCA es un software gratuito, de código abierto, especializado en tareas de modelado de sostenibilidad, sistemas de ciclo de vida y evaluación de ciclo de vida (GreenDelta, 2022). Fue desarrollado por la empresa internacional de consultoría basada en ciclo de vida, GreenDelta, desde el año 2006, a raíz de su idea de promover y extender la práctica de los ACV a partir de la reducción del alto costo que suponía la adquisición de un software de ACV en aquel tiempo (considerado innecesario bajo la visión de la empresa) y de mejorar la transparencia de los resultados obtenidos en estos análisis (Ciroth, Di Noi, Lohse, & Srocka, 2020).

Se trata de un software que es actualizado constantemente (sin costo extra por mantenimiento), que es potente, rápido y flexible con capacidad de calcular indicadores ambientales, sociales y económicos; además de tener la posibilidad de vincularse a otros softwares de modelado, hacer uso de herramientas como parámetros e indicadores de incertidumbre para factores de caracterización. Del mismo modo, cuenta con una arquitectura que facilita la importación y exportación de bases de datos grandes. Además, entre sus funciones, el software ofrece la posibilidad de desglosar los resultados en diferentes vistas, lo que es útil en el momento de identificar las actividades impulsoras y los impactos ambientales más destacados de un sistema de producto (GreenDelta, 2022).

De manera general, para familiarizarnos con los aspectos básicos del entorno de openLCA (Figura 1), GreenDelta (2020) destaca los siguientes elementos que son necesarios para modelar y comparar sistemas de productos en openLCA,

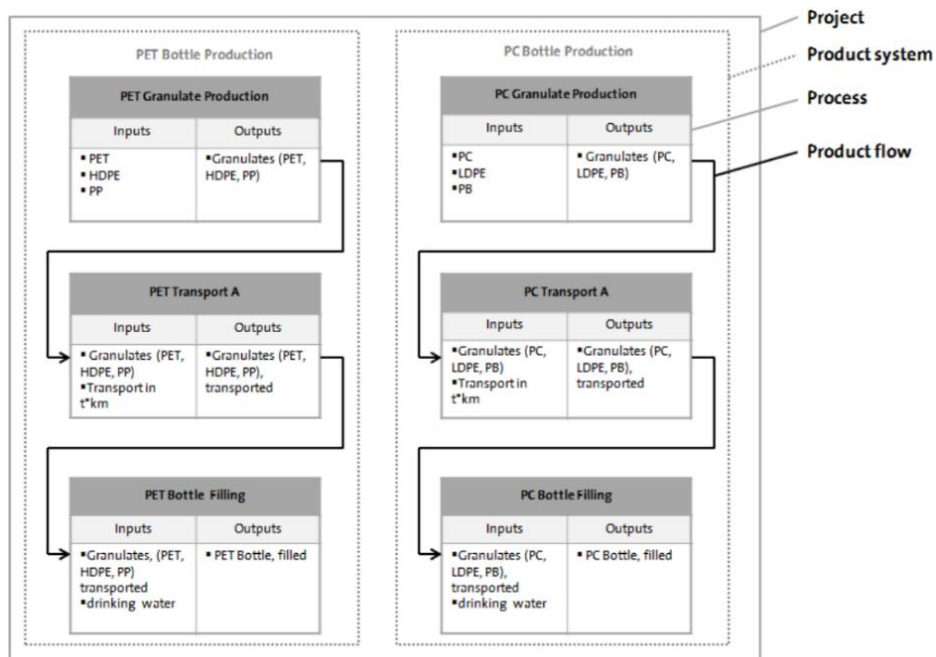


Figura 1. Elementos para modelar y comparar sistemas de productos en openLCA. Tomado de (GreenDelta, 2020).

- Flujos

Se refieren a todas las entradas y salidas de producto, material o energía de los procesos en el sistema de producto (GreenDelta, 2020). openLCA distingue tres tipos de flujo

- Elementales: Material o energía del entorno que entra o sale directamente del sistema de producto. No han sido producidos por ningún otro proceso antropogénico cuando entran a los procesos, es decir, proceden exclusivamente del ambiente (el entorno natural del sistema de producto) y cuando son emitidos por los procesos se dirigen únicamente al ambiente. Estos son los tipos de flujo que openLCA toma en cuenta para la EICV.
- De producto: Material o energía intercambiada entre los procesos del sistema de producto. En caso de tener una o varias salidas de producto (subproductos), aquel flujo de producto principal u objetivo que es producido por el proceso y que puede unirse a otro(s) proceso(s), se le conoce como producto de referencia (*reference product*, en el idioma inglés) y openLCA lo destaca siempre con letra negrita.
- De residuos: Material o energía que sale del sistema de producto. No tienen ningún otro propósito dentro del sistema de producto y normalmente, tienen que ser llevados a algún tipo de tratamiento o disposición final.

- Procesos

Son un conjunto de actividades que interactúan entre sí y que transforman los flujos de entrada en flujos de salida (GreenDelta, 2020). Cada proceso tiene solamente un producto de referencia, el cual cargará cuantitativamente con todos los impactos ambientales que resulten del proceso y de los acumulados en procesos anteriores. openLCA distingue dos tipos de procesos:

- Unitarios: Unidad más pequeña analizada para la que se cuantifican los datos de entrada y salida. Al calcular sus impactos ambientales y cargarlos al producto de referencia, openLCA únicamente tendrá que analizar un proceso cuyas entradas y salidas son flujos elementales (excepto el producto de referencia, que siempre es un flujo de producto) que puede multiplicar por un factor de impacto ya estipulado.
- De sistema: Son la unidad de análisis para la que se agregan datos de entrada y salida. Sus entradas y salidas son flujos de producto. Al calcular sus impactos ambientales, openLCA tendrá que analizar más de un proceso, siguiendo hacia atrás la red de procesos interconectados por flujos de producto modelados como entradas de nuestro proceso, para así ir cargando al producto de referencia los flujos elementales que se vaya encontrando hasta llegar a los procesos unitarios originales, y así sumarlos y aplicar los factores de impacto correspondientes.

- Sistemas de productos

Contienen todos los procesos interconectados que son objeto de estudio, es decir, a todas las redes de procesos (GreenDelta, 2020). Los sistemas de productos pueden formarse desde un proceso hasta por varios procesos que, en ambos casos, son definidos por un único proceso de referencia, a partir del cual se calculan todos los impactos ambientales del sistema de producto, del mismo modo como se calculan los impactos de un proceso de sistema. Al final, los impactos serán cargados al producto de referencia del proceso de referencia, siendo así, el resultado del ICV y de la EICV.

- Proyectos

Contienen todos los sistemas de producto que se quiere comparar. Es una herramienta que permite contrastar los impactos ambientales de diferentes productos, materiales, tipos de energía, entre otros sistemas de producto (GreenDelta, 2020).

2.1.4. Base de datos para Análisis de Ciclo de Vida

Por más sencillo que sea un sistema de producto, la presencia de ciertas entradas de material o energía puede provocar que su ciclo de vida se vuelva más complejo, ya que detrás de cada una de estas entradas hay otra red de procesos cuyos impactos ambientales pueden tener repercusiones en nuestro sistema de producto. Por otro lado, los datos que se necesitan para llevar a cabo un ACV normalmente son confidenciales, lo cual, a menos que el análisis sea para uso interno, no se conseguirán con tanta facilidad al haber un acceso limitado al público. Es por estas razones que, como apoyo al trabajo de un ACV, los analistas utilizan bases de datos desarrolladas por diferentes instituciones (Jorgensen, 2020).

Las bases de datos de ACV proporcionan datos generales sobre procesos unitarios y materiales más comunes en diferentes industrias (Jorgensen, 2020). Consisten en una colección organizada, bajo criterios comunes, de datos resultado del trabajo detrás de distintos ICV para diferentes productos. Además, están pensadas para organizar, almacenar y recuperar fácilmente grandes cantidades de datos digitales. Del mismo modo, si se entiende los criterios y la metodología que se empleó para formar la base de datos de ACV, su uso, siguiendo estos mismos juicios, permite interconectar distintos procesos (Pati, 2022).

Hoy en día existen diversas bases de datos de ACV completas, de calidad, coherentes y en una actualización constante para dar respuesta a las necesidades cambiantes de las partes interesadas (como nuevas políticas gubernamentales, mejora de procesos, avances tecnológicos y científicos, entre otros) (Jorgensen, 2020). La existencia de este tipo de base de datos de ACV, que además pueden encontrarse como públicas (lo que hace más sencillo su validación), facilitan la realización de la EICV y aumenta la credibilidad y aceptación de sus resultados (Weidema, y otros, 2013). Gracias a esto, el uso de este recurso suele ser suficientes para proporcionar la información necesaria para satisfacer los objetivos de muchos ACV, lo que ha provocado que su uso se haya extendido ampliamente entre los analistas (Pati, 2022).

2.1.4.1. Ecoinvent 3.8_cut off

openLCA es compatible con una gran variedad de base de datos, algunas de ellas gratuitas, que pueden ser utilizadas como datos de referencia para estudios de ACV y que permiten ser importadas fácilmente al software, ya que comparten un conjunto común de flujos elementales (y otros datos de referencia) que se han acordado con los proveedores de datos para homogeneizar metodologías (GreenDelta, 2022). En este trabajo se utilizará la versión 3.8 de la base de datos desarrollada por el centro Ecoinvent (Ecoinvent 3.8_cut off).

Ecoinvent es una base de datos de ICV desarrollada por el Centro Suizo de Inventarios de Ciclo de Vida, cuya misión es promover el uso y las buenas prácticas de ACV a través de la proporción de datos de ICV de productos clave para diferentes sectores industriales, fiables, transparentes, y accesibles (Weidema, y otros, 2013). Se trata de un repositorio de datos sobre ICV que se actualiza todos los años y que describe más de 18,000 actividades productivas a nivel de proceso unitario y alrededor de 3,500 productos en un amplio rango de sectores industriales (agricultura, energía, transporte, construcción, plásticos, tratamiento de residuos, etc.) a escala mundial y regional. Asimismo, contiene información que modela y mide los recursos naturales extraídos del medio ambiente, las emisiones liberadas (al agua, aire o suelo), los productos demandados de otros procesos (como la electricidad), subproductos y residuos generados; además de que cada conjunto de datos cuenta con puntuaciones (o ponderaciones) de EICV (Ecoinvent, 2020a).

La base de datos de Ecoinvent, debido a que está construida de forma que es compatible con diversas normas medioambientales, se utiliza para apoyar una amplia gama de estudios, desde aquellos empresariales internos hasta estudios de profundidad que cumple con las normas ISO (Ecoinvent, 2020a). Para entender de manera general su estructura, a continuación, se presentan algunos conceptos clave sobre ella.

- Modelo de sistema

Ecoinvent cuenta con diferentes modelos de sistema que se basan en supuestos fundamentales y proporcionan reglas para vincular los conjuntos de datos de procesos unitarios indefinidos (nombradas también actividades, por Ecoinvent) en sistemas de producto contiguos y para establecer las reglas metodológicas para el cálculo de la base de datos (Weidema, y otros, 2013). Lo más importante es que son las directrices que nos dirán como se distribuyen los impactos ambientales entre los productores y consumidores de productos y servicios (Ecoinvent, 2020d). Estos modelos de sistema son: Asignación, corte por clasificación (*Allocation, cut-off by classification*, en el idioma inglés); Asignación, corte, EN15804 (*Allocation, cut-off, EN15804*, en el idioma inglés); Asignación en el punto de sustitución (*Allocation at the point of substitution*, en el idioma inglés) y Sustitución, consecuente, a largo

plazo (*Substitution, consequential, long-term*, en el idioma inglés). En este trabajo se usará el modelo de sistema de “Asignación, corte por clasificación” o también llamado modelo de sistema de corte (*cut-off system model*, en el idioma inglés).

El modelo de sistema de corte se enfoca en el contenido reciclado o enfoque de corte (Spindler & Ciroth, 2022). En este modelo los residuos son responsabilidad del productor, quien vendría siendo la persona que contaminó originalmente, por lo que tendrá que pagar por esto asumiendo también todos los impactos ambientales que serán provocados por el reciclaje u otro tratamiento de los residuos que esté generando (quien contamina paga). Asimismo, existe un incentivo para utilizar materiales reciclados, los cuales, serán “cortados”, es decir, estarán disponibles sin carga ambiental (la que provocaron los procesos involucrados en la generación de ese residuo) para aquellos procesos que se encarguen de reciclarlos, y una vez reciclados, estos sólo contendrán los impactos ambientales del tratamiento de reciclaje en sí, y no de aquellos procesos por los que pasaron antes de ser reciclados (estos ya han sido “cortados”). Por otro lado, los subproductos valiosos (no residuales) de cualquier tratamiento de residuos (como la energía eléctrica o térmica) estarán disponibles sin carga ambiental (estarán “cortados”) para cualquier proceso que los ocupe como entradas. En resumen, quienes producen residuos no reciben ningún crédito por el reciclaje o la reutilización de productos resultantes de cualquier tratamiento de residuos (Ecoinvent, 2020d).

- Geografías

Los procesos unitarios que componen la base de datos de Ecoinvent representan las condiciones medias de producción dentro de una ubicación geográfica, en lugar de las condiciones específicas de una empresa o de un emplazamiento. Dicho de otro modo, por cada zona geográfica (conocida como geografía) Ecoinvent revisa que sea lo más representativa posible o que tengan una participación importante en la producción mundial del producto estudiado. La base de datos cubre las actividades productivas más relevantes para el producto o servicio seleccionado, basándose en la calidad y la disponibilidad de datos. Esto con el fin de conseguir una base de datos que pueda usarse como referencia (Ecoinvent, 2020c). Por esta razón, Ecoinvent tiene un archivo maestro con las ubicaciones geográficas de todos los países, así como las regiones y subregiones de la ONU, las redes eléctricas europeas y norteamericanas y algunas regiones económicas. Estas geografías se anotan al final del nombre de los procesos unitarios en un lenguaje estándar para datos geoespaciales llamado *Keyhole Markup Language* (KML); por ejemplo, MX es la abreviación que se utiliza para referirse a México y RER es la abreviación que se refiere a la región compuesta por todos los países del continente europeo (Weidema, y otros, 2013). No obstante, en versiones más actuales de la base de datos (a partir de la versión nueve) se ha optado por dejar el nombre completo ampliado de las geografías para facilitar su visibilidad y comprensión (Spindler & Ciroth, 2022). Es importante decir que Ecoinvent valida sus conjuntos de datos dentro de estas geografías, por lo que, lo más adecuado es que los procesos que estemos estudiando se ubiquen en estas geografías (Weidema, y otros, 2013).

Además de estas abreviaciones geográficas estandarizadas, Ecoinvent emplea otras abreviaciones que engloban a diferentes geografías:

- GLO – *Global*: Indica que el proceso está reflejando las condiciones medias mundiales de producción de un producto o servicio. En otras palabras, representa al mundo entero. Normalmente para construir estos conjuntos se emplean datos internacionales promedio, sin

embargo, existen casos en los que su falta de disponibilidad provoca que Ecoinvent lleve a cabo una media ponderada (por volumen de producción) de los datos de todas las geografías que sí tiene disponible o que, en su defecto, extrapole como copias algunos de estos conjuntos de datos que sí tiene. Es así como para todos los procesos de la base de datos habrá una geografía GLO (Ecoinvent, 2020c).

- RoW – *Rest of the World*: Indica que en un proceso se están considerando a todos los proveedores del mundo, de un mismo producto, cuyas geografías específicas no están presentes en la base de datos. Para que exista un RoW, debe de existir un GLO y otros conjuntos de datos de geografías que Ecoinvent sí tiene disponible. De este modo, RoW hace la diferencia entre estos datos globales y los datos locales (o no globales) que sí están disponibles en la base de datos. No se genera si, en conjunto, los procesos de las geografías que sí están presentes en la base de datos cubren una gran parte de (o casi toda) la producción mundial (Ecoinvent, 2020c).

Gracias a GLO y RoW, que toman en cuenta todos los conjuntos de datos presentes en la base de datos y hacen aproximaciones, Ecoinvent, en ambos casos, puede decir que ofrece conjuntos de datos que representan, lo mejor posible, un proceso a nivel mundial, es decir, la producción media mundial de un producto. Esto es útil en caso de que no se encuentre en la base de datos a la geografía específica del proceso que se está estudiando y que, en su defecto, se tenga que usar estos conjuntos de datos más generales, pero mucho más aproximados que seleccionar un proceso con una geografía completamente diferente (Ecoinvent, 2020c). En este trabajo, en caso de necesitarse, se preferirá usar geografías RoW antes que GLO, dado que el primero acota una ubicación más parecida a la que se busca, la cual, siempre será más pequeña que el mundo entero y no será ninguna de las geografías que sí están presentes en la base de datos.

- Actividades de mercados

La base de datos de Ecoinvent distingue un tipo de actividad especial, llamada mercado, en la que se conectan uno o varios procesos unitarios, de una misma geografía y que producen el mismo producto de referencia, con otros procesos unitarios que consumen este producto de referencia (es uno de sus flujos de entrada), agregando a este enlace ciertas estimaciones y datos promedio para modelar, lo mejor posible, la dinámica que se observa en un mercado real de producto en el que se agrupan varios proveedores de una zona.

Ecoinvent (2020b) describe a los mercados como una actividad que representa la mezcla de consumo de un producto para una región determinada. También explica que no se trata de una actividad que transforma los flujos de entrada en flujos de salidas, como sí ocurre en los procesos unitarios (a las que llama actividades de transformación), sino que se sitúa entre las actividades de transformación y sirve como un “puente” que transfiere un producto específico procedente de uno o varios proveedores distintos de una misma zona geográfica (tomando en cuenta la proporción de su volumen de producción disponible) a un proceso unitario que tiene este producto específico como flujo de entrada. La diferencia (y ventaja) que ofrece el uso de actividades de mercado, es que durante esta transferencia también se contabilizan y adicionan medias de transporte, actividades de mayoristas y minoristas; así como pérdidas de productos en el comercio y el transporte, que se modelizan como entradas extras al mercado, es decir, entra al mercado más producto de los proveedores del que sale, porque se asume que una parte de esta entrada se perderá por diversas causas (Ecoinvent, 2020b). El producto de referencia que resulta de

una actividad de mercado se le conoce como mezcla de consumo, y dado que esta mezcla considera pérdidas y otros costos, tendrá un precio modificado de adquisición que será distinto al precio básico del producto (Weidema, y otros, 2013).

Entre actividades de transformación (los procesos unitarios) se pueden establecer vínculos directos, evitando así el mercado. Según Weidema y otros (2013), esto puede ocurrir si las empresas involucradas están estrechamente relacionadas en una cadena de suministro y se puede demostrar que los volúmenes de producción de un proveedor específico fluctúan en correlación con la demanda de un cliente específico. Estos casos sugieren que hay una justificación para enlazar directamente dos actividades de transformación. No obstante, comenta que, si no hay información disponible que justifique un enlace directo, o no se especifica al proveedor, se tendrá que asumir que el producto que entra a un proceso unitario proviene de un mercado local, es decir, aquel que tiene una geografía que abarca la misma geografía en la que se ubica este proceso o que geográficamente tiene un área de cobertura de demanda que se extiende lo suficiente para abastecer a este proceso. Por lo tanto, en la base de datos de Ecoinvent, los mercados, por lo regular, son proveedores por defecto de las actividades de transformación y, de vincularse dos de estas directamente, se tendrá que añadir manualmente todos los datos que sí considera el mercado (transporte, pérdidas de producto, entre otros) a la actividad de transformación consumidora (Ecoinvent, 2020b).

- Actividades de tratamiento

En la base de datos de Ecoinvent se considera a una salida de proceso como residuo cuando no tiene valor económico, es decir, ya no puede ser vendido en el mercado y por lo tanto, usualmente, la actividad que lo está generando tiene que pagar a un tercero para que el residuo reciba un servicio de tratamiento (por esta razón, Ecoinvent también nombra a los residuos como materiales para tratamiento o *material for treatment*, en el idioma inglés) que le permita gestionarlo adecuadamente (ya que no pueden ser liberados directamente al medio ambiente) o le dé la posibilidad de ser reincorporado al mercado o a un proceso productivo como producto sustituto de alguna materia prima virgen. Los procesos de tratamiento (o actividades de tratamiento) convierten los residuos en productos valiosos, como los productos reciclados, o simplemente los convierten en emisiones al medio ambiente (intercambios elementales) con menor capacidad de perjudicarlo, como el agua tratada que es vertida en los ríos (Ecoinvent, 2020e). Cualquier proceso (o actividad de transformación) puede ser una actividad de tratamiento si recibe material para tratamiento, pero sí su producto de referencia es positivo, Ecoinvent la nombra producción especializada. También pueden existir mercados de tratamiento (Weidema, y otros, 2013).

La forma de modelar actividades de tratamiento en la base de datos de Ecoinvent tiene su razón de ser en la economía. En la mayoría de las transacciones económicas, el dinero y los bienes físicos fluyen en direcciones opuestas, es decir, el productor entrega el bien físico al consumidor y este le entrega dinero de vuelta. En un ACV estudiamos bienes físicos, siguiendo a los mismos desde su producción hasta su entrega al consumidor. En Ecoinvent, al flujo de un bien físico con esta dirección (productor-consumidor) se le asigna un signo positivo. En el caso de una actividad de tratamiento, las empresas que quieren deshacerse de un residuo casi siempre tienen que pagar por su tratamiento, haciendo que se rompa con la simetría del ciclo económico normal, porque en este flujo particular se verá que el residuo (el bien físico) que oferta el productor ahora va en la misma dirección que el dinero (van en paralelo) hacia el consumidor (el tratamiento). Para restablecer la simetría, se dice que el

tratamiento de residuos se modela como un servicio (el servicio de tratar a los residuos), el cual, a su vez, en otro proceso (o actividad transformadora) que este generando residuos se considerará como un insumo (una entrada y no una salida) del producto (Pauliuk, 2021).

Tomando en cuenta lo anterior, Ecoinvent modela las actividades de tratamiento, en su base de datos, haciendo que en la salida del proceso su producto de referencia tenga signo negativo para indicar que la actividad brindará un servicio para tratar o eliminar ese producto de referencia, que para otros procesos será un residuo. Además, al añadir este signo negativo a un flujo de producto de salida, se logra conservar el equilibrio de masa de la actividad de tratamiento (todo lo que entra al proceso es positivo y todo lo que sale del proceso es negativo), ya que, en sí, el residuo es una entrada para la actividad de tratamiento, pero se debe respetar que en los conjuntos de datos de Ecoinvent siempre se colocan los productos de referencia a la salida del proceso (Ecoinvent, 2020e). Cuando otro proceso unitario (o actividad transformadora) tenga la necesidad de declarar este producto de referencia negativo de una actividad de tratamiento como el residuo que está generando, se traslada el residuo de la parte de las salidas a la parte de las entradas del proceso, cambiando su signo para conservar el equilibrio de masa del proceso, es decir, los residuos de un proceso serán entradas negativas (Pauliuk, 2021).

En general, cada actividad de tratamiento sólo trata un residuo a la vez, sin embargo, hay casos en los que es necesario recibir más de un residuo porque el tratamiento de uno requiere la presencia de otro(s), es decir, son codependientes. No obstante, en cada actividad de tratamiento, siempre hay un solo producto de referencia negativo. Si se reciben más de un residuo, se elige a uno de ellos como producto de referencia negativo, dejando a los demás con signo positivo (Weidema, y otros, 2013). Otra situación que puede presentarse es que, además del producto de referencia negativo, se tengan más salidas que puedan ser empleadas en otros procesos unitarios (o actividades transformadoras), es decir, subproductos. Estos subproductos de la actividad de tratamiento tienen signo positivo, ya que se tratan de productos valiosos obtenidos tras el tratamiento, como energía eléctrica o térmica para otros procesos (Ecoinvent, 2020e).

2.1.5. Métodos de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

Después realizar un ICV, se cuenta con datos brutos sobre emisiones y residuos que tenemos que interpretar. Para hacer esto hay que traducir estos datos a un resultado numérico que nos permita cuantificar y calcular objetivamente el impacto ambiental de nuestro proceso estudiado. Esta es la tarea que cumple el uso de métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) durante la etapa de EICV en un ACV.

Los métodos de EICV agrupan las clases de impacto que los procesos pueden tener sobre diversos asuntos de interés del medio ambiente (como el uso del agua, el cambio climático, la toxicidad de los ecosistemas, etc.) y los asignan dentro de algo que se conoce como categoría de impacto. En cada categoría de impacto se encuentran traducidas a una misma unidad, y sumadas, las diferentes emisiones del ciclo de vida de un producto, que causan el mismo impacto al medio ambiente. Para realizar esta traducción, las emisiones que forman parte de los resultados del ICV son multiplicadas por un factor de conversión de unidades (o valor numérico o proporción) llamado factor de caracterización, que relaciona estas emisiones con una unidad equivalente en la que se cuantifica la categoría de impacto (Organización Internacional de Normalización, 2012).

Como ejemplo de estas unidades de medida equivalentes de las categorías de impacto se tiene (Dhondt & Muthu, 2021):

- Categoría de Potencial de calentamiento global [kg CO₂ eq]
- Categoría de Eutrofización [kg PO₄ eq]
- Categoría de Agotamiento de la capa de ozono [kg CFC-11 eq]
- Categoría de Oxidación fotoquímica [kg C₂H₄ eq]
- Categoría de Formación de partículas [kg PM10 eq]
- Para categorías de punto medio se puede usar la unidad PDF que son las fracciones potencialmente desaparecidas de especies para la calidad del ecosistema o *Potentially Disappeared Fractions of species for ecosystem quality*, en el idioma inglés (Azevedo, y otros, 2020).
- Para categorías de punto medio se puede usar la unidad DALY que son los años de vida ajustados por discapacidad para impactos en la salud humana o *Disability Adjusted Life Years for human health impacts*, en el idioma inglés (Azevedo, y otros, 2020).

Por otro lado, los factores de caracterización surgen de un modelo de caracterización (Organización Internacional de Normalización, 2012) e indican el impacto ambiental por unidad de emisión o uso de recursos (Boulay, y otros, 2019). Con la aplicación de estos factores de caracterización a los datos de un ICV, se puede tener un número limitado de puntuaciones de impacto ambiental que se separan en categorías de impacto (Boulay, y otros, 2019). De esta manera, una EICV se puede presentar en términos de los resultados (o sumas) obtenidos en cada una de las diferentes categorías de impacto que se tomaron en cuenta. A esta “representación cuantificable de una categoría de impacto”, se le conoce como indicador de categoría. (Organización Internacional de Normalización, 2012).

Diferentes métodos de EICV se han desarrollado a lo largo del tiempo por distintas instituciones. Cada uno de estos métodos incluye diferentes categorías de impacto que, dependiendo del objetivo o los requisitos para el ACV (como aquellos pedidos por normas gubernamentales), pueden ser más útiles que otras. Estos distintos métodos de EICV suelen surgir alrededor de tres familias: métodos orientados al punto medio, enfocados más a los cambios en el medio ambiente en su estado natural; métodos orientados al punto final (o al daño), enfocados más en las consecuencias para el ser humano, los recursos naturales y la biodiversidad; y métodos que combinan de forma coherente los dos métodos anteriores (Boulay, y otros, 2019). Cada familia de métodos tiene sus ventajas y desventajas, de acuerdo con el objetivo del ACV (JRC-IES, 2010). Por mencionar algunos métodos de EICV que están disponibles actualmente, se tiene: ReCiPe, de Holanda; Impact 2002+, de Suiza; EDIP 2003, de Dinamarca; EPS 2000, de Suecia; LIME, de Japón; LUCAS, de Canadá; TRACI 2.0, de Estados Unidos; entre otros (Urbina, 2022).

2.1.5.1. IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431)

Para este trabajo se empleará IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431) como método de EICV. Este método fue desarrollado gracias a la colaboración organizaciones como (IMPACT World+, 2019c):

- Centro Internacional de Referencia para la Evaluación del Ciclo de Vida y la Transición Sostenible (CIRAIG, por sus siglas en inglés de *The International Reference Center for Life Cycle Assessment and Sustainable Transition*) de la Universidad Politécnica de Montreal.
- Universidad de Michigan
- *Quantis International*
- Universidad Técnica de Dinamarca (DTU, por sus siglas en inglés de *Technical University of Denmark*)
- Escuela Politécnica de Lausana (EPFL, por sus siglas en francés de *école Polytechnique de Lausanne*)

De manera general, IMPACT World+ es un método de EICV global que presenta resultados de caracterización en los niveles de punto medio y punto final, y que también ofrece abordar la incertidumbre del impacto ambiental relacionado con la variabilidad espacial. Dicho de otro modo, es un método de EICV que nos permite obtener indicadores de categoría que consideran mejor las diferencias geográficas y sociales que puede haber entre diferentes ubicaciones, como la disponibilidad de recursos, las condiciones climáticas, las prácticas de gestión de residuo locales, las regulaciones ambientales, entre otros. Esto lo consigue a través de los factores de impacto regionalizados que proporciona para categorías de impacto como (Figura 2): Acidificación del agua dulce, Acidificación terrestre, Eurotrofización del agua dulce, Eurotrofización marina, Toxicidad humana, Formación de partículas, Escasez de agua, Transformación del suelo, entre otras (Boulay, y otros, 2019). IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431) es una versión regionalizada de IMPACT World+, es decir, incluye factores de caracterización específicos (regionalizados) para diferentes países de América Latina (openLCA, 2022).

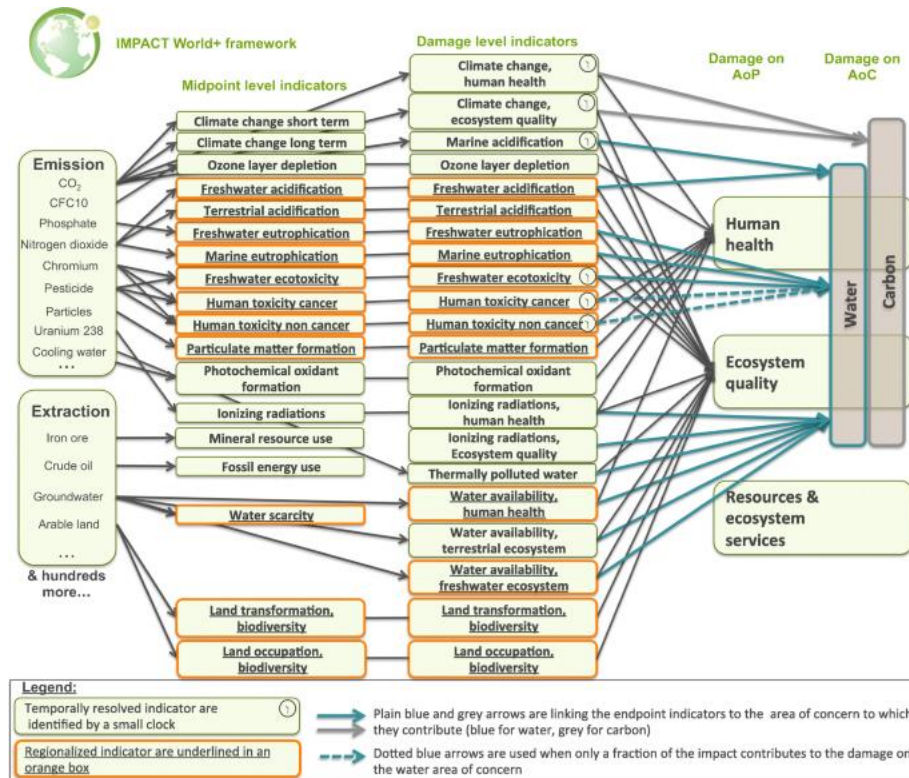


Figura 2. Marco de trabajo de IMPACT World+. A nivel de daño (o punto final) las categorías de impacto pueden agruparse en categorías de impacto AoP (salud humana, calidad de los ecosistemas y recursos y servicios ecosistémicos) o en categorías de impacto AoC (daños relacionados con el agua o con el carbono y el resto de los daños en las AoP de salud humana y calidad de los ecosistemas). Tomado de (Boulay, y otros, 2019).

Al momento de su lanzamiento IMPACT World+ tenía como objetivo específico proponer el primer método de EICV regionalizado que abarque a todo el mundo a diferentes niveles de resolución espacial (mundial, continental, por país y local) para analizar la magnitud de los indicadores de categoría a escala mundial, con la novedad de que, en vez de usar factores de caracterización generales, se emplean factores de caracterización regionalizados que permiten resultados de EICV que cuantifican la importancia relativa de la variabilidad espacial (Boulay, y otros, 2019). Es debido a estas características especiales que se eligió usar su versión IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431), ya que, no sólo es un método de EICV desarrollado para ser usado en una geografía más parecida a la de México (América Latina), sino que permitirá estimar resultados de EICV que nos indique como los procesos productivos llevados a cabo en nuestro país impactan en materia ambiental al mundo (resultados escalados a nivel global), tomando en cuenta nuestro contexto (o al menos uno más parecido) y al ser un método de EICV de punto final, nos permite estimar y visualizar mejor los posibles daños a la salud humana y a los ecosistemas de nuestro país.

2.2. Tecnología fotovoltaica

Una tecnología energética puede considerarse renovable cuando la fuente de trabajo suministrada está disponible de forma natural o se repone en un determinado período de tiempo. En el caso de la tecnología fotovoltaica, la fuente de energía es la luz del Sol; que es intermitente en su ciclo diario y estacional, es de baja densidad, pero universalmente disponible en la superficie de la Tierra y no requiere reposición por lo que puede considerarse una fuente permanente (Urbina, 2022).

La tecnología fotovoltaica convierte la energía de la luz solar disponible en la superficie de la Tierra en electricidad útil. En otras palabras, convierte un recurso intermitente de baja densidad de potencia en una fuente confiable de trabajo eléctrico que se puede entregar bajo demanda a la densidad de potencia requerida. La energía solar fotovoltaica se considera renovable, aunque no es una tecnología completamente limpia ya que requiere algún aporte de energía para fabricar los dispositivos que son capaces de convertir la energía del Sol en trabajo útil.

La tecnología fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, el cual, no debe confundirse con el efecto fotovoltaico. En el efecto fotoeléctrico, los fotones de la luz solar de alta energía (azul o ultravioleta) son absorbidos por un material metálico y los electrones son expulsados del material (al aire o preferiblemente en una cámara de vacío). En el efecto fotovoltaico, los electrones no son expulsados del material, los fotones de la luz solar son absorbidos y excitan a los electrones a niveles más altos de energía dentro del material, y si estos electrones pueden usarse efectivamente para generar una corriente a través de una carga externa, pueden suministrar trabajo a esta carga. La celda solar, impulsada por el efecto fotovoltaico, actúa como una fuente de corriente donde la cantidad de corriente entregada a la carga es controlada por la luz que llega a la celda (Urbina, 2022).

2.2.1. Celdas solares

Una característica importante de la tecnología fotovoltaica es su modularidad, es decir, su capacidad para funcionar como un convertidor de energía eficiente en todas las escalas. Una celda solar, considerada la unidad más pequeña de la tecnología fotovoltaica, es tan eficiente como un módulo, o como un generador, o incluso como una planta muy grande.

La estructura básica de una celda solar (o fotovoltaica) comprende la capa activa, las capas transportadoras de electrones y huecos y los electrodos a ambos lados de la celda. En la capa activa, fabricada con un material semiconductor, se generan los portadores de carga (electrones y huecos). Los electrodos, fabricados con metales en la mayoría de los casos, recogen selectivamente los portadores y los entregan a la carga externa. La inclusión de capas transportadoras no es obligatoria, pero en ciertas tecnologías es necesaria para optimizar la transferencia de portadores desde la capa activa a los electrodos. Al final, también se debe tener en cuenta una buena combinación de los diferentes niveles de energía en los materiales que garanticen la extracción más eficiente del portador desde la celda hasta la carga (Urbina, 2022).

Actualmente, la oferta de celdas solares disponible en el mercado está conformada por celdas de distintos materiales y características. Las celdas de silicio cristalino (o celdas de primera generación) constan de una única unión, poseen un grosor de aproximadamente 150 micras, y son las más empleadas en la industria fotovoltaica. De acuerdo con Haas et.al. (2022), este tipo de celdas se dividen en los siguientes dos grupos:

- **Celdas de silicio monocristalinas:** Están compuestas por monocristales de silicio, que son una red cristalina continua y única. Dicho de otro modo, son un cristal que no presenta (o muy pocos) ni impurezas ni defectos, lo que les permite obtener una mayor eficiencia.
- **Celdas de silicio policristalinas (o multicristalinas):** Se componen de rodajas de silicio compuestas por múltiples cristales de este material. Es decir, son celdas que se componen de pequeños granos (o áreas) de un monocristal con orientación aleatoria entre sí. Presentan pérdidas en las fronteras entre los cristales (recombinación de portadores), una conductividad reducida y una menor eficiencia en comparación con las celdas monocristalinas. No obstante, este tipo de celdas son más económicas y fáciles de fabricar, ya que emplean métodos que requieren menor demanda de energía.

2.2.2. Manufactura de paneles fotovoltaicos

Si bien, el proceso de manufactura de paneles solares realizado por distintas empresas no es el mismo, pudiendo presentar variaciones entre cada una, dependiendo de la tecnología a su disposición, su capacidad instalada, políticas de calidad, entre otras cosas; la manufactura de paneles solares sigue una serie general de procesos y operaciones unitarias. Este proceso productivo general es el que se presenta a continuación.

El proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos comienza con la obtención de materia prima para la fabricación de celdas fotovoltaicas. Si bien, se sabe que las celdas pueden ser elaboradas con diferentes materiales semiconductores, el silicio ha sido el material de trabajo utilizado desde el inicio de la industria solar fotovoltaica y el 90% de las instalaciones fotovoltaicas se han realizado con módulos basados en celdas solares de silicio. (Satpathy & Pamuru, 2020)

El silicio se encuentra solo en forma combinada en la naturaleza, por lo que el primer paso en la producción de paneles fotovoltaicos es conseguir que los cuarzos de silicio extraídos por minería tengan un grado metalúrgico. Esto se consigue mediante un proceso electrometalúrgico que consiste en ingresar una mezcla de cuarzo (SiO_2), carbón y madera en un horno a muy alta temperatura. El silicio metalúrgico que se obtiene tiene una pureza del 99%, sin embargo, para la industria fotovoltaica se requieren especificaciones aún mayores. Los paneles fotovoltaicos emplean silicio de grado solar, el cual, debe tener una pureza superior al 99.999999 %. Para obtener

este silicio de grado solar, se lleva a cabo un proceso de purificación que consiste en un craqueo del triclorosilano a altas temperaturas (1100°C) en un reactor. El silicio se deposita y se obtienen pepitas (llamadas *chunks* en el idioma inglés) de este material.

Estas pepitas de silicio de grado solar se emplearán para la cristalización de lingotes de silicio. El silicio monocristalino se forma a partir del crecimiento de un monocristal hasta obtener un lingote cilíndrico mediante proceso Czochralski, en donde el punto de fusión se alcanza a 1414°C. Más adelante, los lingotes cilíndricos pasan a un proceso de conformación para proporcionarles una forma cuadrada que permite optimizar el espacio en la fabricación de los módulos. Posteriormente se eliminan los extremos del lingote, ricos en impurezas y defectos, y las ondulaciones de la superficie externa.

Los lingotes obtenidos pasan a una operación de corte para obtener una especie de obleas de silicio (*wafers* en el idioma inglés). Estos cortes en obleas se realizan por medio de sierras de hilo. Es necesario que el corte se realice con alta precisión a fin de minimizar los desperdicios. Los *wafers* cortados no tienen un grosor mayor a 0.18mm, por lo que su manipulación debe ser muy cuidadosa, ya que se pueden romper fácilmente. Adicionalmente, los *wafers* se inspeccionan y seleccionan para eliminar aquellos que estén defectuosos; y a continuación, se tratan de diferentes maneras para limpiar los desechos de los procesos anteriores.

Para que estos *wafers* se conviertan en celdas fotovoltaicas se debe pasar por la siguiente serie de procesos. Primero, un proceso de texturizado, en donde se les coloca en un baño químico para eliminar la superficie dañada por el aserrado y darle una textura a su superficie que potencia la absorción de la luz solar. Luego se procede a un dopaje por difusión para obtener una unión semiconductor. En esta etapa se dopa la superficie del *wafers* con fósforo o boro mediante calentamiento térmico a 800°C. Posteriormente, a través de un proceso de deposición de vapor se les coloca un revestimiento antirreflejante que asegura una absorción de fotones y una pasivación de la superficie más efectivas, además de darle a la celda fotovoltaica su característico color azul. Finalmente, se procede a una metalización, en la cual, se forma el circuito eléctrico de la celda fotovoltaico por medio de un serigrafiado en la superficie delantera (ahora de color azul) o trasera del *wafers*. Es a través de este circuito que se transporta la corriente eléctrica recolectada por la celda fotovoltaica.

Una vez que las celdas fotovoltaicas han sido inspeccionadas y cumplen con las características de calidad necesarias, se pasa a la última etapa de la producción de paneles fotovoltaicos, la manufactura de estos. Se comienza con la unión de las celdas fotovoltaicas en cadenas de múltiples celdas en serie (*strings*, en el idioma inglés) por medio de soldadura y tiras de conexión (*ribbons* en el idioma inglés) que normalmente son de cobre estañado. Estos *strings*, más adelante pasan a conectarse entre sí por medio cintas de interconexión (*busbars* en el idioma inglés). Después de interconectar los *strings*, se colocan entre otros materiales, en un arreglo conocido como encapsulado, en el orden que se dice a continuación: una lámina de vidrio templado, una película de EVA (Etil-Vinil-Acetato), *strings*, una segunda película de EVA y una película impermeable (*backsheet* en el idioma inglés) de TPT (Fluoruro de polivinilo–polietilentereftalato–fluoruro de polivinilo, también llamado Tedlar-PET–Tedlar). Este encapsulado, pasa a un proceso de laminación al vacío, en donde se calienta y prensa para unir todos los materiales en un módulo, conocido como laminado, que después será enmarcado (normalmente con perfiles de aluminio) y al que se le colocará una caja de conexiones. Al final, los paneles fotovoltaicos se prueban en

equipos que generan una luz artificial calibrada para medir sus características eléctricas (se le conoce como prueba solar).

Finalmente, se debe agregar que, aunque la energía solar fotovoltaica es una energía renovable, no es una tecnología completamente limpia ya que, como cualquier otra tecnología energética (sea renovable o no), requiere algún aporte de energía para fabricar los dispositivos que convierten la energía del sol en trabajo útil (Urbina, 2022).

2.3. Visitas a dos empresas de manufactura de paneles fotovoltaicos

A continuación, como resultados de la visita a dos empresas mexicanas dedicadas a la manufactura de paneles fotovoltaicos, se describirá en esta sección el proceso de producción que en cada una de ellas se realiza.

2.3.1. Empresa 1

El proceso de manufactura de paneles solares de la Empresa 1 comienza con la importación de celdas fotovoltaicas monocristalinas de China como materia prima para el proceso.

El primer paso que se lleva a cabo en el proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos es el “Retiro de papel protector” del vidrio templado. Para esto, se coloca el vidrio templado sobre una repisa especial, luego un brazo mecánico de sujeción con ventosas sopla aire a presión sobre el vidrio para retirar el papel micro de protección, que tiene como parte de su embalaje de importación de China, y lo toma. Al estar sosteniendo el vidrio, el brazo mecánico lo dobla ligeramente para comprobar su estado. Si el vidrio tiene grietas, estas serán visibles durante la operación o, si se encuentra defectuoso, se romperá con este ligero doblez.

Paralelamente a la operación anterior, el EVA y el TPT (llamado también *backsheet* en el idioma inglés) es cortado a la medida del panel fotovoltaico con la ayuda de una cortadora mecánica programable (para los distintos modelos de paneles solares). El EVA y el TPT es adquirido en rollos que ya cuentan con la medida del ancho del panel, por lo que la cortadora sólo mide y realiza un corte que corresponde al largo del panel para formar pliegos de películas transparentes de EVA o blancas de TPT. Al TPT adicionalmente se le realiza un corte transversal al módulo para que a través de este salgan las cintas de interconexión que serán conectadas a la caja de diodos.

El vidrio templado es colocado por un brazo mecánico de sujeción con ventosas en una lámina que se encuentra sobre una banda transportadora que lo llevará a las diferentes etapas del proceso. En la primera parada, se coloca una película de EVA ya cortado sobre el vidrio. En otra parada se coloca manualmente la etiqueta de código de barras del panel y unas regletas de medición en cada extremo horizontal del vidrio con EVA con clips tipo mariposa. Estas regletas ayudarán en la etapa de “Inspección de medidas”, ya que cuentan con separaciones milimétricas que marcan la distancia que debe haber entre ristras. El código de barras se compone de 13 dígitos (número de línea, año, mes, día, hora, minuto y segundo) que corresponden al momento exacto de etiquetado, es decir, indica el tiempo de inicio de la manufactura del panel fotovoltaico.

Después del etiquetado; el vidrio con EVA, código de barras y regletas pasa a un “Precalentamiento”, en donde el vidrio se calienta ligeramente (por medio de una máquina de resistencias) para fundir un poco el EVA y volverlo

algo adhesivo. En otra etapa, se colocan cintas de plomo recubiertas de estaño sobre el EVA, a lo ancho de cada extremo del vidrio con EVA, código de barras y regletas; para que en una etapa más adelante estas permitan interconectar las celdas fotovoltaicas en paralelo. Estas cintas son conocidas como cintas de interconexión o *busbars*. Los *busbars* se colocan por medio de equipos de soldadura de radiación infrarroja a temperaturas mayores a 150°C y empleando un fundente basado en estaño líquido (Flux) para obtener una soldadura de mejor calidad.

Debido a la diferencia de los tiempos de trabajo en ciertas etapas del proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos, se necesita un “Almacenamiento de vidrio con EVA, regletas, clips mariposa y cintas de interconexión” después de la etapa de “Colocación de cintas de interconexión”. Este almacén es vertical y está formado por una cabina con capacidad para 18 vidrios con EVA, regletas, clips mariposa y cintas de interconexión.

Mientras se colocan todos los elementos anteriormente mencionados, de manera simultánea, las celdas se sueldan para construir ristras (o *strings*) en un proceso completamente automatizado. Las ristras son líneas de 10 a 12 celdas unidas en serie del polo negativo al polo positivo por medio de tiras de plomo estañado (también conocidas como *ribbons*) soldadas. Para la formación de ristras, los operadores alimentan la bandeja de entrada de una máquina *Stringer TT2100* (Figura 3) con grupos de 110 celdas fotovoltaicas. La máquina revisa individualmente cada celda por medio de un sistema de inspección visual por fotografía y descarta las celdas en mal estado (rotas, agrietadas, manchadas, etc.) o que no son útiles. Las celdas rechazadas se colocan en una bandeja aparte para ser retiradas y las que son útiles pasan al interior de la máquina. Dentro de sus operaciones, la *Stringer* se encarga de suministrar el Flux que requiere la soldadura, luego de colocar los *ribbons* para que se conecten de forma entramada sobre las celdas por medio soldadura de radiación infrarroja (únicamente en los extremos que unirán una celda con otra) y así formar las *ristras*. Al salir de la *Stringer*, las ristras son escaneadas por un sistema digital integrado a la máquina para revisar que las celdas no tengan fisuras o estén desalineadas. Para la formación de un panel fotovoltaico se necesitan 5 ristras.

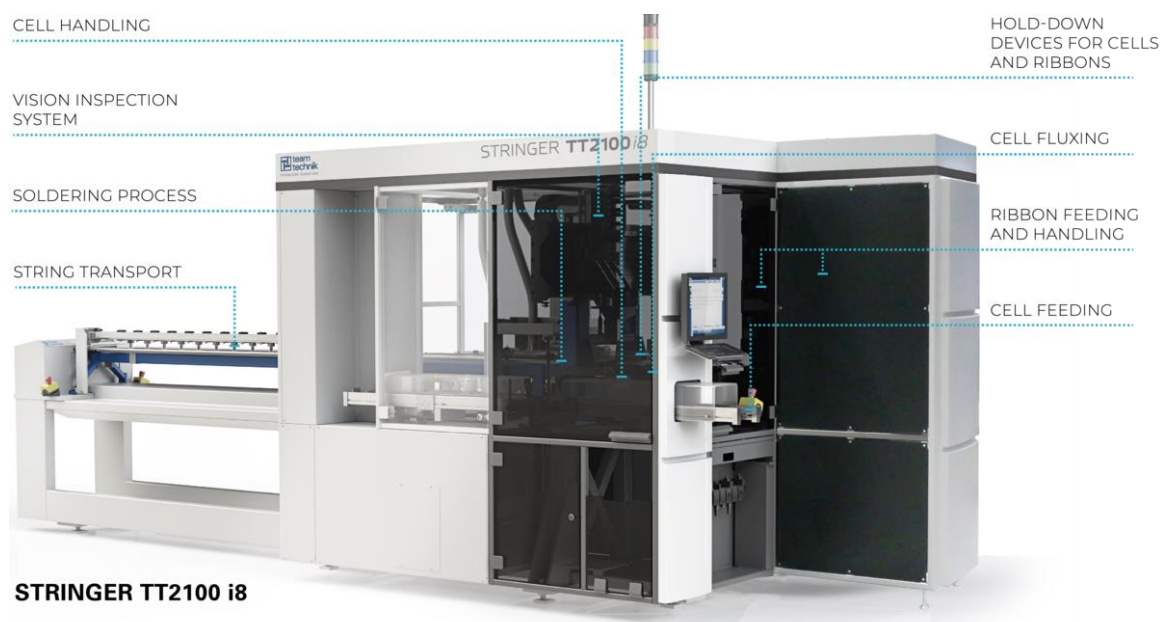


Figura 3. Máquina Stringer TT2100 para la formación de ristras. Imagen ilustrativa Tomado de (Teamtechnik, 2022).

Ya formadas, un brazo mecánico coloca las ristras encima de la primera capa de EVA transparente para agrupar todas las celdas en una matriz. Más adelante, la banda transportadora, sobre la que están colocados en una lámina el vidrio templado, la primera capa de EVA, regletas, clips mariposa y matriz de celdas, transporta el conjunto a otra cabina de almacenamiento vertical. Esta cabina va disponiendo de los conjuntos para ser inspeccionados por un grupo de trabajadoras que se aseguran de que la distancia entre las celdas sea correcta, que no haya celdas rotas o mal soldadas. De existir algún error que puedan corregir, las trabajadoras pueden desmontar y volver a soldar manualmente algunas celdas con alicates, cautín de punta y Flux. También verifican que la distancia entre los *ribbons* de las ristras coincida con las marcas de las regletas colocadas con los clips mariposa.

Una vez inspeccionado y posicionado correctamente, el conjunto pasa por banda transportadora a un robot que suelda los *ribbons* a los *busbars*, provocando así que la conexión de celdas deje de ser un circuito que funciona en serie y pase a ser un circuito que funciona en paralelo. Después de asegurarse que la soldadura de *busbars* se realizó correctamente, se retiran las regletas y los clips mariposa. También se recorta el excedente de *ribbon* que podría haber quedado.

Para la colocación de la segunda capa de EVA, se emplea un brazo robótico que toma de los extremos las películas transparentes y los dirige a la banda transportadora para colocarla encima de la matriz de celdas soldadas. De la misma forma, otro brazo robótico toma el pliego de TPT con la fisura transversal y lo coloca sobre la segunda capa de EVA. Al hacer esto se obtiene un encapsulado sin laminar.

Este encapsulado pasa a una prueba de electroluminiscencia que tiene el propósito de verificar el estado óptimo de cada celda. Es un proceso totalmente automático y para este se emplea la máquina *EL - Module Inspection System*, que cuenta con un procesamiento especial de imágenes que detecta defectos en celdas monocristalinas o policristalinas (Figura 4). La prueba consiste en incidir una corriente para que cada celda sensible pueda generar energía; si la celda se ilumina en la imagen, significa que está generando energía, de no ser así se oscurece. El equipo también cuenta los *microcracks* (roturas microscópicas). Después de esta prueba, los encapsulados que lo necesiten aún pueden ser enviados al taller manual de reparación para ser arreglados y luego hacer otra prueba de electroluminiscencia para regresar a la línea de producción.



Figura 4. Equipo para prueba de electroluminiscencia. Imagen ilustrativa. Tomado de (Meyer Burger India, 2023)

Como último paso, antes de la “Laminación” el encapsulado con la EVA y *backsheet* (previamente cortado por la parte de en medio para generar espacio e introducir los *busbars*), pasa por la colocación de cintas de interconexión en donde se levanta ligeramente la última capa (el *backsheet*) y se coloca otro pedazo de TPT para que, al momento de laminarlo, el panel no genere un cortó. Las cintas de interconexión se colocan atravesándolas de atrás para adelante por la ranura del *backsheet* y de forma que solo queden las cintas de interconexión para la caja de diodos en la parte de enfrente.

Después el módulo pasa a la etapa de “Laminación”, donde el EVA se funde y encapsula los materiales. Estos se unen al mantenerse en hornos (laminadoras) a una temperatura de 143°C al vacío por un tiempo de 15 a 20 minutos. La empresa cuenta con cuatro laminadoras de aceite con una capacidad de tres módulos de 72 celdas (de dos metros de longitud) o 4 módulos de 1.66 m de largo cada uno. Al salir de la laminación, se obtiene laminados que son transportados lentamente por una banda transportadora para ser enfriados, alrededor de 10 minutos, por ventiladores. Luego un brazo mecánico toma el panel laminado y lo sostiene en posición vertical para hacer más sencilla la operación de retirar el exceso de materiales plásticos que podría presentar en este punto. La etapa de “Corte de rebabas” se lleva a cabo mecánicamente con cuchillas calientes a 360°C (tolerancia: +60°C y -20°C).

El brazo más adelante coloca el laminado en una banda transportadora en donde se le realiza una inspección de calidad, luego se colocan manualmente por medio de soldadura su caja de diodos y sus cables de conexiones. Estos elementos luego son rodeados por silicón frío blanco. Después los laminados con caja de diodos son transportados por brazo mecánico a una sección donde se le colocará su marco de aluminio. Para esto, una operaria toma los perfiles de aluminio previamente cortados a medida y les coloca silicón frío blanco para después posicionarlos en una prensa ajustable al tamaño del panel.

Para este punto y tras comprobar su número de serie, el panel solar está terminado, sin embargo, aún debe ser sometido a una simulación de radiación solar (es una prueba de norma). La prueba solar se realiza con un simulador *Flasher* y gracias a ella se determina las características del panel que permiten clasificarlo, como: potencia efectiva, tipo de celda, dimensiones, eficiencia, temperatura, entre otras. Las categorías que se asignan al panel solar van de la A a la C: A indica que son aptos para venta, B y C que pueden ser usados en la misma planta (para proyectos o pruebas).

Finalmente, los paneles con buena clasificación pasan a una etapa de embalaje. Aquí se les coloca una etiqueta que denota los datos del panel como las características de operación, mecánicas y eléctricas necesarias para el correcto uso del panel solar. Luego, se toman manualmente nueve módulos finalizados uno por uno para ser colocados de manera vertical dentro de su caja. Una vez terminada dicha tarea, se colocan cartones al frente y atrás del panel y los flejes, que son tiras de plástico alrededor de la caja que evitan que la caja se abra con facilidad. Más adelante, se colocan las cajas arriba de un *pallet*, el cual va al área de almacenamiento para después ser transportados y entregados al cliente.

2.3.2. Empresa 2

El proceso de manufactura de paneles solares de la Empresa 2 comienza con el corte de las celdas fotovoltaicas a la mitad, para lo cual se emplea una cortadora láser automatizada *Flexem*. La cortadora tiene una eficiencia del 80%, por lo que el 20% de las celdas se rompen, sin embargo, se recuperan para ser reparadas y vendidas a un precio menor. Este paso de corte sólo se presenta en la producción de paneles fotovoltaicos de 545 W, ya que en la producción de paneles de 310W las celdas no se cortan.

Las celdas (cortadas o no) pasan a una máquina de soldadura de celdas en *string* (Figura 5) modelo *MCG 5/OSCAM*. Lo que hace la *MCG 5/OSCAM* es transportar las celdas fotovoltaicas a través de succionadores de vacío a bandas transportadoras, colocándolas en serie de polaridad positiva a negativa; luego corta y coloca los *ribbons* (que son cargados previamente a la máquina en carretes) para que más adelante el equipo los suelde automáticamente. La formación de un *string* de 12 celdas fotovoltaicas tarda aproximadamente un minuto para la máquina que, de acuerdo con la empresa, tiene una eficiencia del 99%. De esta forma se generan series de celdas que son transportadas manualmente a una mesa donde serán colocadas a través de una máquina de colocación de *strings* sobre un vidrio templado, previamente cortado a la medida del módulo fotovoltaico, con el propósito de formar una matriz de celdas fotovoltaicas. La empresa comenta que durante este transporte a la mesa han tenido accidentes donde se llegan a romper algunas celdas.

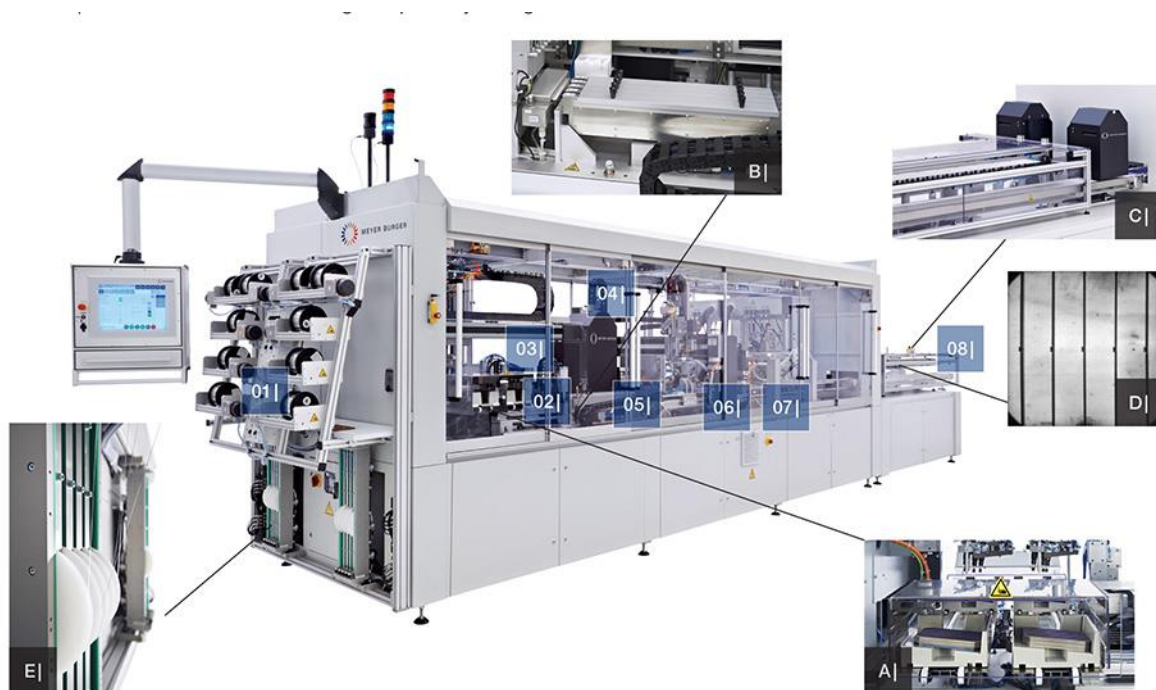


Figura 5. Máquina de soldadura de celdas en string. Imagen ilustrativa. Tomado de (Solarview, 2021)

Paralelamente, se realiza el corte de películas tipo *backsheet* (TPT) y EVA a través de una cortadora automática corrediza manejada por dos operadores. El corte se realiza para obtener el largo del panel deseado, ya que el ancho del rollo coincide con la medida del panel. Este y otros procesos se realizan con guantes de látex para obtener la mayor limpieza posible a fin de no dejar manchas o contaminantes en las películas que pudiera afectar la eficiencia

del panel fotovoltaico. Antes de colocar los *strings* en el vidrio templado se coloca sobre éste una primera película de EVA que queda entre ambos.

Más adelante, el módulo con vidrio, EVA y *strings* pasan a una mesa de trabajo donde se lleva a cabo de forma manual (con cautín de punta, Flux, vernier y alicates) la soldadura de los *ribbons* con los *busbars* para unir los *strings* y así formar el circuito de los módulos fotovoltaicos (Figura 6). Normalmente, debido a la paciencia que requiere esta operación, el personal encargado es femenino, las cuales, tienen tapetes para que estando paradas se sientan más cómodas. Por otro lado, antes, durante y después de este proceso se aseguran de que la separación entre las celdas esté dentro de las tolerancias, que la soldadura de la máquina y del personal se haya realizado correctamente y que las celdas no se hayan roto. Después de la soldadura, de forma manual, se le coloca por encima de la matriz de celdas una segunda película de EVA y luego una película de *backsheet*, obteniendo así un encapsulado.



Figura 6. Operación manual de soldadura de celdas fotovoltaicas. Imagen ilustrativa. Tomado de (Solarview, 2021)

Antes de pasar a la etapa de laminación, los encapsulados pasan a una prueba de inspección de electroluminiscencia en una máquina marca *Chinup*, con el fin de detectar pequeñas fisuras, comprobar que las celdas no estén rotas y que tengan la polaridad que les corresponde. Si se detecta algún fallo que pueda ser reparado, los módulos pasan de nuevo a la mesa de soldadura.

Los encapsulados que pasan la inspección son llevados a laminación (Figura 7). Aquí se emplea una laminadora *Siemens/Smart Line* de placas que se calientan con aceite, las cuales funden el EVA a una temperatura de 124°C entre 25 y 30 minutos (en el caso del modelo de 545 W, por sus dimensiones, el tiempo puede aumentar a 40 minutos).



Figura 7. Laminadora de paneles fotovoltaicos. Imagen ilustrativa. Tomado de (Mondragon Assembly, 2022).

Al mismo tiempo que se lleva a cabo este proceso, se realiza el punzado (de 1 cm de diámetro) y el corte de los perfiles de aluminio para ajustarlos a la medida del marco que será colocado en el módulo fotovoltaico. También para asegurar que los marcos tengan las medidas y los orificios que permitan que la caja de diodos llegue del circuito del panel solar a tierra. Este es un proceso semi manual, ya que cuentan con un equipo que le ayuda al personal (normalmente masculino) a realizar los cortes.

Al salir de la laminación los laminados se someten a una inspección visual. El módulo laminado es tomado por ventosas de la parte del *backsheet* por un robot de la marca *Yaskawa Motoman* para ser manipulado en todas las direcciones durante esta etapa.

Antes de pasar a enmarcado, el laminado se transporta manualmente a unas mesas de trabajo para una operación de corte de rebabas. Aquí se retiran los residuos de EVA y/o *backsheet* que puedan presentarse en las orillas tras la laminación. Luego se recubren las orillas con cinta doble cara de la marca *Saint Gobain* y el enmarcado con aluminio del módulo se realiza de forma semi manual con la ayuda de una enmarcadora *SPI-FRAME PRESS* que ajusta el marco a presión. Posteriormente, se realiza una prueba de alto voltaje y luego se coloca la caja de diodos, previamente ensamblada, con la ayuda de alicates y una compresora de sellado, uniéndola con pistolas de silicón industrial al módulo.

Casi al final, se realiza una prueba de simulación solar (como parte de su certificación) a través de un equipo *SPI-SUN.SIMULATOR 4600 SLP SPIRE SOLAR* (que genera fotones) y a una temperatura ambiente de entre los 23°C a 25°C (Figura 8). Con esta prueba, se puede detectar la eficiencia de los módulos y así asignarle una clasificación, ya sea: Premium (no presentó problemas, su eficiencia es alta y puede alcanzar una vida útil de 25 años), A (no presenta problemas, su eficiencia es alta, pero su vida útil es menor a 25 años), B (su eficiencia es menor y tiene una vida útil baja) y C (su eficiencia es de las más bajas al igual que su vida útil). También hay paneles re trabajados que son aquellos que cuentan con celdas que fueron extraídas de otros paneles con celdas rotas.



Figura 8. Prueba de simulación solar con un equipo SPI-SUN.SIMULATOR 4600 SLP SPIRE SOLAR. Imagen ilustrativa. Tomado de (Herrero, 2016)

Finalmente, los paneles fotovoltaicos aprobados, que deben generar alrededor de 30 V a 40 V, son etiquetados y pasan al área de embalaje.

2.4. Diagrama de bloques

Con base en la información recolectada sobre el proceso de manufactura de paneles solares, tanto de fuentes bibliográficas como a través de las visitas, se llegó al siguiente proceso (Figura 9) que será usado para elaborar el ICV del proceso de manufactura, así como su modelo en el software de EICV. Este se describe como se menciona a continuación.

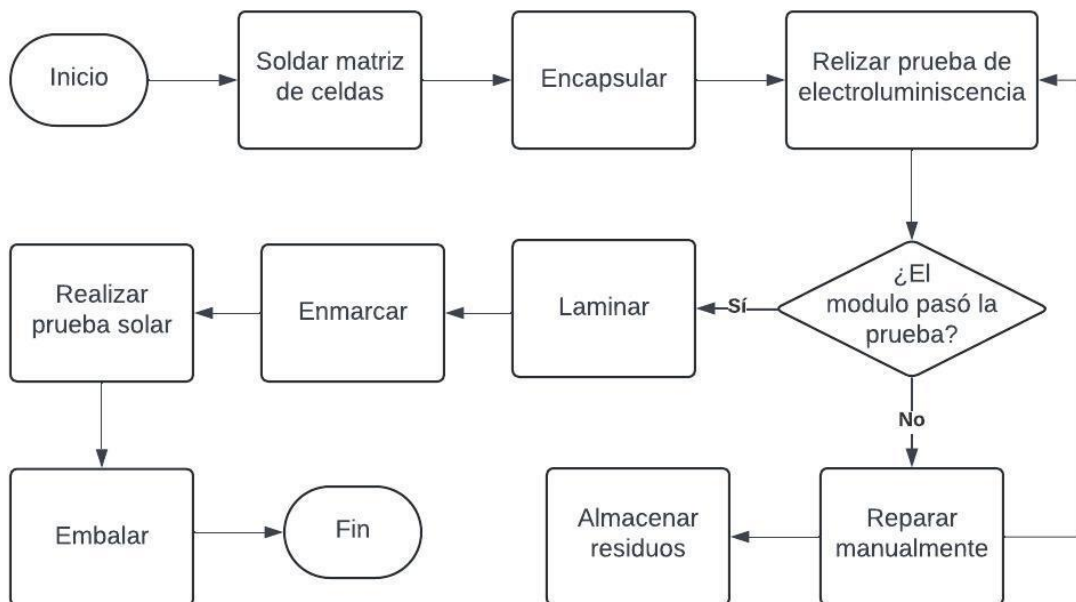


Figura 9.a. Diagrama de proceso de manufactura de panel fotovoltaico

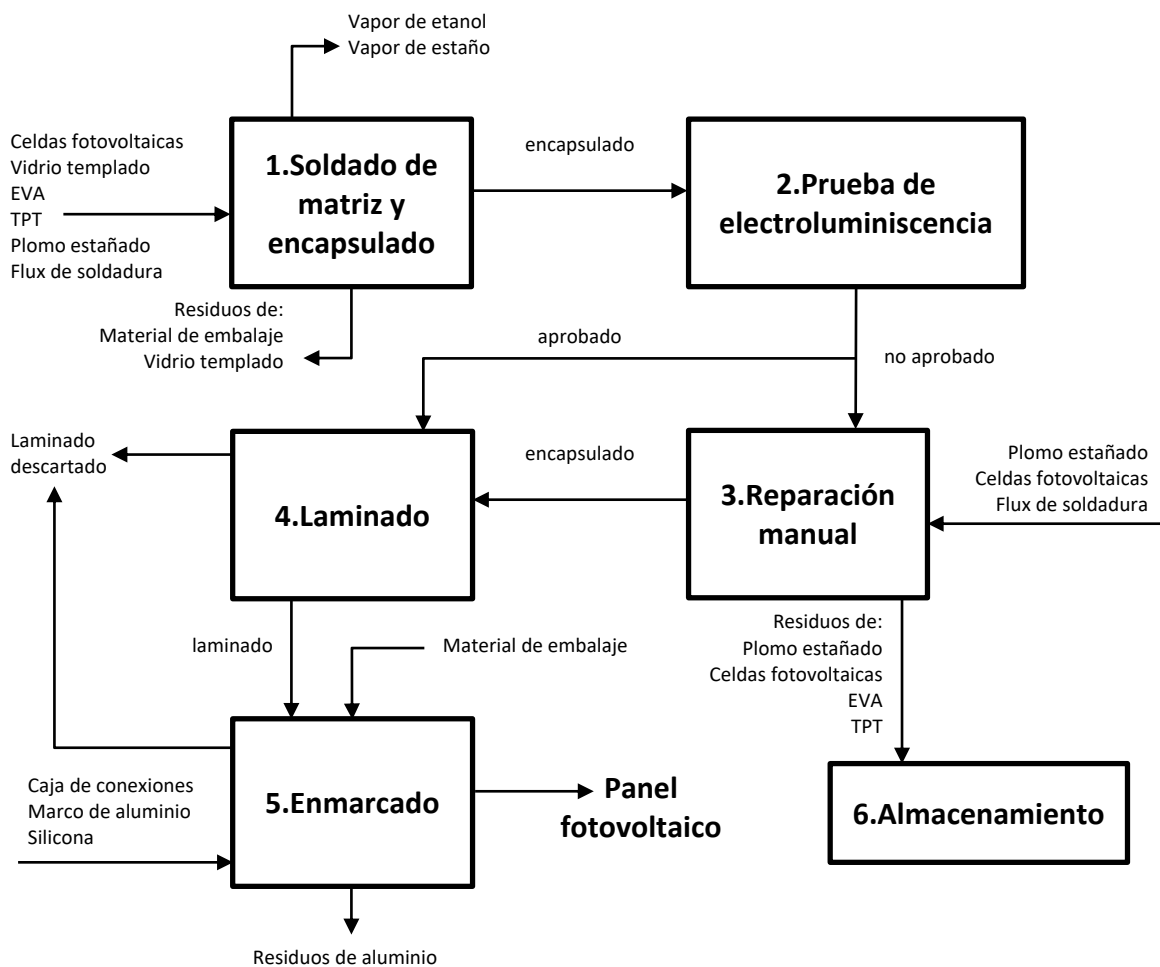


Figura 9.b. Diagrama de bloques de proceso de manufactura de panel fotovoltaico. Adaptado de (Vázquez et al., 2023)

Un panel fotovoltaico está conformado por celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino las cuales son unidas mediante soldadura en un robot ensamblador de ristras para formar una matriz de celdas que estén conectadas en serie (Figura 9.a) para incrementar el voltaje del panel fotovoltaico. La matriz de celdas (1 en Figura 9.b) se forma soportada en un vidrio templado, además se utilizan dos pliegos de EVA (etileno-vinil-acetato) como encapsulante termoplástico de tal manera que la matriz de celdas quede en medio de ellos. En la parte posterior del módulo se adiciona una capa de TPT, conocido también como *backsheet*, es la parte rígida del panel. Una vez que se tiene la matriz de ristras con EVA, TPT y vidrio templado, se somete a una prueba de electroluminiscencia (2 en Figura 9.b) en donde se muestra el estado de cada celda fotovoltaica que conforma a la matriz para observar si hay alguna celda fracturada, con defecto o que no esté cumpliendo con la eficiencia adecuada, si es así, se pasa a una reparación manual (3 en Figura 9.b) para reemplazar las celdas y hacer de nuevo la prueba de electroluminiscencia hasta que sea apto para el siguiente proceso. Los residuos de esta reparación son almacenados (6 en Figura 9.b).

El siguiente paso se realiza en un horno laminador (4 en Figura 9.b) que se encarga de aplicar calor para encapsular el módulo y después se enmarca con un perfil de aluminio 6061-T6 (5 en Figura 9.b). El módulo fotovoltaico se termina con el ensamble de una caja de conexiones en la parte posterior del módulo que sirve para entregar el voltaje y la corriente directa generados por las celdas; y luego de haber sido sometido a una prueba solar (Figura 9.a), el panel es embalado para la venta (Vázquez et al., 2023).

3. Marco regulatorio de los residuos de la industria fotovoltaica

Internacionalmente, los sistemas fotovoltaicos están regulados en al menos tres niveles: producción, instalación y operación. Sin embargo, son pocos los países que cuentan con un marco legislativo para la producción de módulos fotovoltaicos. Debido a esto, es común que las normas de impacto ambiental desarrolladas para la actividad productiva de la industria en general, sean las que terminen aplicándose a la industria fotovoltaica. No obstante, el problema no es tan drástico cuando se habla del reciclaje y el tratamiento de los residuos de la industria fotovoltaica, ya que los módulos fotovoltaicos y sus componentes son generalmente considerados como equipos eléctricos y electrónicos. Gracias a esto, es válida para la industria fotovoltaica la fuerte normativa con la que cuenta varios países para los Residuos Eléctricos y Electrónicos (REE). De cualquier forma, eso no elimina el hecho de que esta industria sigue sin tener recomendaciones únicas para la recuperación, reutilización y reciclaje de sus residuos (Urbina, 2022).

En cuanto a la regulación internacional de los residuos de la industria fotovoltaica, se tiene el trabajo de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés de *International Organization for Standardization*) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés de *International Electrotechnical Commission*). En el caso de la ISO, esta cuenta con pocas normas para el reciclaje de materiales, no obstante, se encuentra trabajando para ofrecer más próximamente. Con respecto a los residuos de la industria fotovoltaica, se puede destacar las normas:

- ISO 15270: Contienen los resultados de un estudio enfocado en el reciclaje de plásticos del 2008.
- ISO/TR 23891:2020 : Recopila y describe brevemente las normas existentes, las diferentes técnicas y métodos para la recuperación y reciclaje de residuos plásticos.
- ISO/TS 21480: Norma para el reciclaje de vidrio destinado a construcciones que integran tecnología fotovoltaica (BIPV, por sus siglas en inglés de *Building Integrated Photovoltaics*)
- ISO 22450:2020, ISO/TS 22451:2021, ISO 22453: 2021: Son normas dedicadas al reciclaje de elementos de tierras raras. Si bien, el contenido de estos elementos es casi inexistente en los módulos fotovoltaicos, sí están más presentes en sus componentes de balance de sistema (BoS, por sus siglas en inglés de *Balance of System components*)
- ISO 8887-1: 2017 : Ofrece especificaciones para el diseño de productos para facilitar la reutilización, recuperación, reciclaje y eliminación de componentes y materiales utilizados en el proceso de fabricación y durante la vida útil de un producto (mantenimiento y repuestos).

La IEC provee normas relacionadas con la tecnología fotovoltaica que pueden ser consultadas en su sitio web y en el que, además, hay una recopilación de comentarios del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (*European Commission Joint Research Centre*). No obstante, la IEC cuenta con pocas normas para el fin de la vida útil de los paneles fotovoltaicos. Algunas excepciones son las normas (Urbina, 2022):

- IEC TR 62635: Da información para el cálculo de la reciclabilidad de los equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo a la tecnología fotovoltaica.
- IEC 62257-3: Da recomendaciones para el reciclaje de componentes y la protección del medio ambiente en proyectos de electrificación rural con sistemas fotovoltaicos.

- IEC 62994: Propone un método para la caracterización y evaluación de impacto para la salud o el medio ambiente en la fase de producción, uso y fin de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos

Ahora se dará una idea general del marco legislativo que existe en diferentes países sobre los residuos de la industria fotovoltaica.

En China (el principal instalador de paneles fotovoltaicos en el mundo) la instalación, el funcionamiento y la disposición final de los sistemas fotovoltaicos deben cumplir con los informes de evaluación de impacto ambiental exigidos por la Ley de Protección del Medio Ambiente de 1984 (modificada en 2014); aunque, en la práctica la aplicación de esta ley no ha sido tan estricta. En la Unión Europea se tiene la Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, que trata sobre el reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos. En esta Directiva se menciona explícitamente a los paneles fotovoltaicos en los Artículos 5 y 7. También está la Directiva 2011/65/UE que regula el uso de sustancias peligrosas en la producción de equipos eléctricos y electrónicos. Esta Directiva no aplica para los módulos fotovoltaicos, según lo estipulado en su Artículo 2, 4. i, pero sus componentes BoS siguen sujetos a ella que, entre otras cuestiones, restringe enormemente el uso de plomo y cadmio, cuyas concentraciones no deben sobrepasar el 0.1% y el 0.01% del peso del componente, respectivamente (Urbina, 2022).

En Estados Unidos la *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) de 1976 y las leyes federales *Clean Air* de 1970 y *Clean Water* de 1942, regulan las emisiones de la industria en general (incluyendo la fotovoltaica) al aire o al agua de cualquier sustancia que pueda ser un daño potencial a la salud humana o al medio ambiente. Particularmente la RCRA regula los procedimientos de reciclaje a través de reglamentos específicos y desde 2012, es obligatorio la aplicación de un procedimiento de lixiviación de características de toxicidad (para determinar si un material se puede clasificar como peligroso) en los procesos de producción y reciclaje de cualquier tecnología fotovoltaica. Sin embargo, EE. UU. no cuenta con una ley federal que obligue a las organizaciones a recoger, reutilizar o reciclar los REE; y en su lugar se aplican las leyes de gestión general de residuos y de residuos potencialmente peligrosos. No obstante, a nivel estatal, 25 de sus estados tienen su propia legislación sobre REE, aunque algunas son de carácter no obligatorio y su cumplimiento sólo es voluntario.

En otros países, a pesar de no haber un marco legislativo dedicado exclusivamente a la industria fotovoltaica, se tienen norma destinadas a la gestión de residuos en general o a REE como (Urbina, 2022):

- Reino Unido: *Environmental Permitting Regulations 2010 No. 675*
- India: *Environmental Protection Act* (1986), *Solid Waste Management Rules* (2016) y *Hazardous and Other Waste Rules* (2016)
- Japón: *Law for the Recycling of Specified Kinds of Home Appliances* (LRHA)
- Corea del Sur: *Enforcement Rule of Wastes Control Act* (Act 14783, 2017)

En México, la normativa aplicable al tema de los residuos de la industria fotovoltaica involucra a leyes, reglamentos y normas como las siguientes:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR)
- Reglamento de la LGPGIR

- NOM-052-SEMARNAT-2005
- NOM-161-SEMARNAT-2011
- NADF019-AMBT-2018

Siguiendo la jerarquía de normas de la legislación mexicana, en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2023a, pág. 10) está estipulado en el quinto párrafo del Artículo 4, que será el Estado quien garantizará el derecho de las personas “a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar”, responsabilizando y aplicando las sanciones dispuestas por la ley a quienes provoquen daño o deterioro ambiental. Estos daños ambientales en la industria fotovoltaica, por consiguiente, también abarcan aquellos causados por sus residuos. También se dice que, en México, de acuerdo con la fracción III del Artículo 115 constitucional, son los municipios quienes tienen a su cargo la “limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2023a, pág. 118).

Adicionalmente, se tiene la LGPGIR (2023b, pág. 1), la cual, es una ley reglamentaria con la que se pretende proteger al medio ambiente a través de la “prevención y gestión integral de residuos” en el país, evitando así la contaminación de sitios debido a estos residuos o, en otro caso, su remediación. Además, contempla y establece bases para actividades como: prevenir la generación de residuos, su valorización y gestión integral; aunque una gran parte de la Ley se enfoca en estipular las dependencias y las herramientas administrativas que se emplearán para regular el tema que trata. Hay que mencionar que los residuos radioactivos, de acuerdo con el Artículo 4 de esta Ley, están sujetos a otro tipo de normas específicas (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2023b). Esta LGPGIR, también cuenta con un reglamento (Reglamento de la LGPGIR) en el que se brindan más detalles acerca de lo que establece e incluye “Criterios de Operación en el Manejo Integral de Residuos Peligrosos” en su Capítulo IV (Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2014, pág. 33). De igual manera, en este Reglamento se encuentran requisitos para registros de planes de manejo, autorizaciones, identificación de residuos, entre otros temas.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2023b), los residuos en México, por lo que se puede entender revisando los conceptos ofrecidos en su Artículo 5, se clasifican en: peligrosos, sólidos urbanos (comúnmente de origen domiciliario), de manejo especial (comúnmente de origen industrial), mineros y metalúrgicos. Se ha de notar que ninguna de estas categorías engloba por completo a todos los residuos que resultan de la industria fotovoltaica, por lo que estos pertenecerán a distintas clasificaciones.

En el caso de los residuos peligrosos, como aditamentos que contengan mercurio, cadmio o plomo; el Artículo 31 de la LGPGIR (2023b) obliga a los organismos a contar con un plan de manejo. De esta forma, en su Artículo 42, dice que los residuos peligrosos pueden ser llevados a servicios de manejo con gestores autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) o bien, si se autoriza, estos pueden ser transferidos a industrias que los utilicen como insumos de sus procesos. En caso de tener que almacenarse temporalmente en las instalaciones que generan este tipo de residuos, el Artículo 82 del Reglamento de la LGPGIR (2014), menciona que este sitio debe estar separado de las áreas de trabajo o donde se almacene otro tipo de materias primas, en zonas donde no representen un riesgo por el desencadenamiento de reacciones adversas a terceros, que cuenten con medidas de seguridad en caso de accidentes, entre otras condiciones. Más adelante, el Artículo 85 y 86 de este Reglamento hablan sobre la recolección y transporte de estos residuos, y del Artículo 87 al 106 se ofrecen bases

para el reciclaje, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos (Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2014). En cualquier caso, los residuos peligrosos siempre deben notificarse a la SEMARNAT, nunca deben mezclarse con otros materiales (de ser así, estos materiales podrían considerarse como residuos peligrosos), ni guardarse por más de seis meses a partir de su generación y la responsabilidad, tanto de su manejo como de su disposición final, corresponde a quien los genera (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2023b). También se dice que los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial, acorde a lo dicho en el Artículo 15 de esta Ley, se agruparán y se subclasificarán en categorías para ser puestos en inventarios elaborados por la SEMARNAT que, al ofrecer información confiable de sus características, ayudarán y podrán consultarse por la población para la toma de decisiones (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2023b).

Por otro lado, en cuanto a medidas de gestión específicas para cada tipo de residuo, a lo largo de toda la LGPGIR (y también de su reglamento), esta nos exhorta a consultar la respectiva Norma Oficial Mexicana (NOM) que aplique al residuo que se esté generando. Las NOM y otras normativas mexicanas que tratan el tema de los residuos son diversas. Algunas de ellas brindan especificaciones acerca de cómo medir características de los residuos (como humedad, nitrógeno total, poder calorífico, etc.), requisitos para sitios de disposición final (como rellenos sanitarios), límites máximos permisibles de contaminantes, inventarios para la identificación de residuos, entre otros temas.

El primer paso es identificar el tipo de residuo y, por consiguiente, el tipo de normativa que puede aplicarse. Para esto se tiene la NOM-052-SEMARNAT-2005, la cual “establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos” (NOM-052-SEMARNAT-2005, 2006, pág. 1). En ella podemos identificar, por ejemplo, gracias a su “Listado 5, Clasificación por tipo de residuos, sujetos a condiciones particulares de manejo”, que los “residuos de soldadura en la producción de circuitos electrónicos que contengan plomo” son considerados como residuos peligrosos ante la ley (NOM-052-SEMARNAT-2005, 2006, págs. 25, 27). En caso de no ser un residuo peligroso, existe la NOM-161-SEMARNAT-2011 (2013, pág. 1) “que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial, ... el listado de los mismos [y] el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado”. También se tienen las descripciones encontradas en el Artículo 5 de la LGPGIR (2023b) y el Capítulo I “Identificación de residuos peligrosos” del Título Cuarto del Reglamento de la LGPGIR (2014, pág. 12) que nos ayudarán a descartar entre los otros tipos de residuos. En general, es muy probable que, de no ser un residuo peligroso, el residuo de la industria fotovoltaica que se estudie sea un residuo sólido urbanos o de manejo especial.

La NOM-161-SEMARNAT-2011 (2013) se elaboró para reducir el problema de la disminución de la vida útil de los sitios de disposición final de residuos, al mezclar residuos sólidos urbanos con enormes cantidades de residuos de manejo especial. Acorde con la norma, esto se consigue al exigir a la industria la “elaboración, desarrollo y aplicación de... Planes de Manejo para los Residuos de Manejo Especial” (NOM-161-SEMARNAT-2011, 2013, pág. 14). Por supuesto, los elementos y requisitos de estos planes de manejo están contenidos en esta norma. A raíz de esto, en la Ciudad de México (CDMX) se desarrolló la NADF-019-AMBT-2018 (2020, pág. 15), que se enfoca específicamente en los Residuos Eléctricos y Electrónicos (REE), considerados en México como residuos de manejo especial y que, por consiguiente, necesitan un plan de manejo especial. Esta NADF-019-AMBT-2018 (2020, pág. 25), en la Tabla 1 de su Anexo I, clasifica a los paneles fotovoltaicos como REE en la categoría 4

“Grandes aparatos”. Asimismo, entre los distintos criterios y especificaciones que contiene podemos destacar los siguientes:

- Los REE deben ser separados por las propias organizaciones entre las categorías listadas en su Anexo 1: 1) Aparatos de intercambio de temperatura; 2) Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm²; 3) Lámparas; 4) Grandes aparatos; 5) Pequeños aparatos; y 6) Aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños.
- Los aparatos eléctricos y electrónicos no pueden ser desensamblados para su disposición final.
- Los REE debe ser protegidos de la intemperie y de personas que puedan robar alguno de sus componentes, así como almacenarse y sujetarse de manera que no representen un peligro a terceros.
- Los REE se deben entregar a centros de acopio o plantas recicladoras autorizadas. Los centros de acopio tienen prohibido la comercialización de los REE o de sus componentes y deberán entregarlos únicamente a plantas recicladoras u otros servicios autorizados. Aquellos que prestan servicios de reciclaje o tratamiento de REE, sí pueden “llevar a cabo acciones para maximizar su aprovechamiento y valorización”, como el desensamble parcial o total, fundición, refinación térmica y química o bien, de ser necesario, entregar los REE a otras planta, tratamientos o sitios de disposición final autorizados (NADF-019-AMBT-2018, 2020, pág. 21).

Al final, se aprecia que México no cuenta con una regulación específica para los residuos de la industria fotovoltaica, como si ocurre en otros países. En su lugar, México agrupa a todos estos residuos (y los de otras industrias) en categorías muy generales y amplias que abarcan a residuos de una gran diversidad. De esta manera, la ambigüedad que genera el tener clasificaciones tan extensas provoca que no se brinden normas claras que guíen a los particulares en la tarea de gestionar sus residuos conforme a las buenas prácticas que sugiera la ley. En cambio, parece ser que es la iniciativa de las propias organizaciones y particulares quienes realizan mayores aportes a la buena gestión de los residuos. Esto se piensa ya que, son ellos quienes, al haberse propuesto desarrollar un conocimiento especial para sus propios residuos, tienen planes de manejo que llegan a cumplir mejor el objetivo de protección al medio ambiente, que las medidas generales brindadas por la legislación. No obstante, se ve a bien el hecho que estos planes de manejo de residuos sean exigidos por el gobierno.

4. Inventario de Ciclo de Vida

Con base en la integración de los datos obtenidos de las dos empresas visitadas se elaboró el siguiente Inventario de Ciclo de Vida (ICV), el cual, se pretende utilizar para el modelado en software de los distintos escenarios que se presentarán en la siguiente sección de este trabajo.

Este ICV muestra datos que corresponden a la producción de un mes. Para su elaboración, se empleó el diagrama de bloques que se presentó anteriormente, en el capítulo 2.4. Gracias a este diagrama, a la investigación en distintas fuentes y a la información brindada por las mismas empresas, se realizó la recopilación, el cálculo y la organización de todos los datos de entrada y salida reportados a continuación.

4.1. Entradas

Tabla 1. INVENTARIO DE ENTRADAS DE MATERIALES O SUSTANCIAS EN LA MANUFACTURA DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Material / Sustancia	Cantidad	Unidad
Vidrio templado de bajo contenido de hierro	8	kg
Celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio	36.21	celdas
Tiras de conexión y cintas de interconexión de plomo estañado (Sn60Pb40)	65.55	g
Flux de soldadura	3.94	g
Soldadura de plomo estañado	12.63	g
Encapsulante Etil Vinil Acetato (EVA)	539.12	g
Fluoruro de polivinilo–polietilentereftalato–fluoruro de polivinilo o Tedlar-PET–Tedla (TPT)	374.39	g
Perfiles de aluminio 6061 anodizado (AlMg ₃)	3117.26	g
Silicona	35.30	g
Caja de conexiones de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, del inglés Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer)	79.32	g
Caja de cartón corrugado	0.0443	kg
Fleje de PET 5/8	28.22	g
Computadora para prueba solar	1.32	unidad
Empleaje calibre 60 de polietileno	0.00000213	g

La Tabla 1 presenta el listado de las materias primas y materiales auxiliares que se necesitan para la manufactura de un metro cuadrado de panel fotovoltaico.

Muchos de los componentes del panel fotovoltaico son importados (generalmente de China), como el vidrio templado, las celdas, el EVA, el TPT, las tiras y las cintas (ambas de plomo estañado). En el caso de las celdas fotovoltaicas, se consideró que son de silicio tipo monocristalinas cuyas dimensiones son de 0.156 m por lado. Las celdas fotovoltaicas, más adelante, son conectadas entre si para formar un circuito en forma de matriz, a través de tiras de conexión y cintas de interconexión que se unen por medio de soldadura de plomo estañado, en la cual, se emplea flux de soldadura para mejorar su calidad. Posteriormente, se tienen materiales encapsulantes (EVA y TPT) que se encargan de unir y proteger todos los componentes del panel fotovoltaico. La gran mayoría de los

materiales antes mencionados se utilizan tanto en la etapa de soldado de matriz y encapsulado, como en la etapa de reparación manual, no obstante, las cantidades que se reportan en la tabla, a excepción de las tiras de conexión y las cintas de interconexión, corresponden sólo a la etapa de soldado de matriz y encapsulado.

Más adelante, se tiene para la etapa de enmarcado silicona y perfiles para el marco de aluminio anodizado que protege los bordes del panel. De igual forma, se toma en cuenta la caja de conexiones de ABS, que se coloca uniéndose al panel fotovoltaico por medio de silicona, lo que representa los últimos pasos de la instalación eléctrica de los paneles. Finalmente, se tienen los materiales empleados para el embalaje de los paneles para su venta: cajas de cartón, fleje tensionado por aire comprimido y empaque para envolver.

4.2. Emisiones

Tabla 2. INVENTARIO DE EMISIONES DE LA MANUFACTURA DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Material / Sustancia	Cantidad	Unidad
Vapor de etanol	1.419E-09	g
Vapor de estaño	1.419E-09	g

Las dos emisiones presentadas en la Tabla 2 corresponden al proceso de manufactura de un metro cuadrado de panel fotovoltaico y tienen su origen principalmente en las actividades de soldadura que se llevan a cabo en diferentes etapas del proceso de manufactura. Las cantidades reportadas en la tabla corresponde a la etapa de soldado de matriz, la cual implica la formación de ristas y la soldadura de cintas de interconexión. Estas emisiones también son liberados al medio ambiente durante cualquier operación de soldadura que se requiera en la etapa de reparación manual, no obstante, no se tiene una estimación de la cantidad de esas emisiones.

4.3. Residuos

Tabla 3. INVENTARIO DE RESIDUOS DE LA MANUFACTURA DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Material / Sustancia	Cantidad	Unidad
Polipropileno	0.01614	g
Poliétileno	0.004968	g
Cartón	0.01028	g
Papel	76.56	g
Etil Vinil Acetato (EVA)	32.98	g
Fluoruro de polivinilo–polietileno tereftalato–fluoruro de polivinilo o Tedlar-PET–Tedla (TPT)	75.05	g
Vidrio templado de bajo contenido de hierro	14	g
Aluminio 6061 anodizado (AlMg ₃)	75.49	g
Plomo	2.62	g
Estaño	3.01	g
Cobre	29.84	g
Plata	6.7	g

Los datos que se presentan en la Tabla 3 son el resultado de mediciones y estimaciones de los residuos generados por la manufactura de un metro cuadrado de panel fotovoltaico. El origen de estos residuos se encuentra

principalmente en el descarte de material sobrante o que se halla dañado durante el proceso productivo, los cuales incluyen: celdas rotas o que no cumplen con las especificaciones necesarias, embalaje de materiales de importación, vidrio solar dañado, laminados descartados (o defectuosos), restos de corte de aluminio, tiras de conexión y cintas de interconexión retiradas o recortadas ya sea por reparación o por ser un excedente de la construcción de la red de celdas.

El descarte de materiales de protección que forman parte del embalaje de los productos de importación (como aquel que llevan las celdas fotovoltaicas y el vidrio templado) más adelante será la fuente de residuos como: polipropileno (material de las cajas en las que se transportan las celdas), polietileno (protectores de espuma que se incluyen en las cajas de celdas), cartón y papel. Por su parte, en una actividad como la reparación manual de encapsulados, antes de su entrada a la etapa de laminación, se generan residuos de material encapsulante (EVA y TPT), celdas descartadas (que contienen cantidades de plata y cobre), cintas de interconexión y tiras de conexión (que contienen cantidades de plomo y estaño). Más adelante, al concluir la laminación y en etapas posteriores, puede que los paneles laminados no cumplan con las especificaciones requeridas o se dañen por lo que su descarte se traduce en la generación de residuos de sus componentes: vidrio solar, descarte de EVA y TPT unido (que también se generan por el corte de rebabas después de la laminación), celdas fotovoltaicas, cintas de interconexión y tiras de conexión. Estos componentes de panel solar, una vez fundidos entre sí, son muy difíciles de separar.

También se pueden presentar situaciones accidentales en las que se rompan vidrios templados o se estropee los materiales encapsulantes durante el transporte del módulo a través de planta, por lo que estos son otros motivos por los que se descarta este tipo de materiales, no obstante, la tabla sólo reporta cantidades que pertenecen a las etapas de soldado de matriz y encapsulado, reparación manual, laminado y enmarcado. Por otro lado, el corte de perfiles de aluminio anodizado para que se ajusten a las medidas del panel también origina residuos de este material.

4.4. Estimaciones de consumo eléctrico

Tabla 4. INVENTARIO DE CONSUMO ELÉCTRICO DE LA MANUFACTURA DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Etapas del proceso de manufactura de paneles solares	Consumo eléctrico	Unidad
Selección de celdas	0.5455	Wh
Formación de matriz y encapsulado	33.89	Wh
Reparación de celdas rotas	19.84	Wh
Prueba de electroluminiscencia	6.12	Wh
Laminado	274.52	Wh
Ensamble final	4.38	Wh
Prueba de simulación solar	263.58	Wh
Embalaje	2.91	Wh
TOTAL=	605.78	Wh

La Tabla 4 presenta las estimaciones hechas para el consumo eléctrico general de una planta durante la manufactura de un metro cuadrado de panel fotovoltaico. La mayor parte de estos consumos eléctricos se deben a la utilización de máquinas y equipo necesario para la manufactura, así como la electricidad requerida para mantener la iluminación de las áreas de trabajo.

Durante la selección de celdas, en caso de llevarse a cabo por el mismo personal de las empresas, se requiere de una buena iluminación que permita apreciar correctamente las características de las celdas para que posteriormente estas sean separadas adecuadamente. Este proceso de selección también puede ser llevado a cabo por las mismas máquinas que se encargan de la formación de la matriz de celdas fotovoltaicas que más adelante serán encapsuladas. Ambos procesos antes mencionados, también significan un consumo eléctrico para las empresas, tanto por la iluminación adecuada como por la electricidad requerida por la máquina durante su operación. Otras operaciones que se realizan por el personal, por tratarse de procedimientos de alta precisión, necesitan de una buena iluminación como en el caso de la reparación de celdas rotas y el embalaje final de los paneles fotovoltaicos.

Finalmente, se puede apreciar en la tabla que las etapas del proceso de manufactura que tienen un consumo energético mayor son la laminación del panel fotovoltaico y su posterior prueba solar, debido a que emplean maquinaria y equipo de alta demanda eléctrica. En el caso de la laminación, también influye la duración del proceso, dado que es una de las actividades en las que más tiempo se invierte (sin contar la soldadura de matrices de celdas fotovoltaicas de forma manual). Por su parte, la prueba solar requiere de un gran consumo energético debido a que, como su nombre indica, intenta imitar las características de la luz solar para que el mismo equipo sea capaz de realizar las mediciones necesarias para identificar las condiciones de los paneles solares que están a punto de ponerse a la venta.

5. Modelos de ciclo de vida de manufactura de paneles fotovoltaicos

Con el fin de hacer una comparación de resultados en el siguiente capítulo de este trabajo, se modelaron en openLCA cuatro escenarios que corresponden a posibles disposiciones finales (incineración, relleno sanitario, relleno sanitario no controlado y reciclaje) que tienen los residuos de la manufactura de paneles fotovoltaicos en México. Se aclara que no todas las empresas emplean los mismos tratamientos para sus residuos, no obstante, el análisis de estos escenarios ayuda a evaluar cada opción y de esta manera, tomar una mejor decisión en este tema.

Estos modelos de escenarios se programaron de manera simplificada, sin seccionar el proceso de manufactura completo en diferentes procesos u operaciones unitarias. En cambio, se optó por hacer que todas las entradas del proceso completo ingresaran a una misma caja de proceso en openLCA. Lo mismo se realizó para las salidas del proceso completo de manufactura de paneles fotovoltaicos. Esto se hizo con el fin de disminuir errores causados por la complejidad del modelo, así como hacer más sencillas las tareas de rastrear entradas y salidas, corregir errores y hacer modificaciones en el modelo, sin que estas alteraciones afecten de sobre manera al trabajo ya realizado. Del mismo modo, se hace la observación de que el modelo se elaboró tomando en cuenta la unidad funcional de un metro cuadrado de panel solar con celdas fotovoltaicas de silicio tipo monocristalino.

Otras suposiciones que se tuvieron que hacer para el modelado de estos escenarios se debieron al límite de información de la base de datos de *Ecoinvent 3.8*. Dada esta situación, fue necesario modelar algunos de los residuos (Tabla 6) y entradas (Tabla 5) con algún material o sustancia equivalente que sí estuviera disponible en la base de datos de *Ecoinvent 3.8* como se muestra a continuación:

Tabla 5. BASE DE DATOS DISPONIBLE EN ECOINVENT 3.8 SOBRE ENTRADAS A PROCESO DE MANUFACTURA DE PANELES SOLARES

INPUT	ECOINVENT 3.8 FLOW	ECOINVENT 3.8 PROVIDER
Vidrio templado de bajo contenido de hierro	solar glass, low-iron	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO
Celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio	photovoltaic cell, single-Si wafer	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO
Tiras de conexión y cintas de interconexión de plomo estañado (Sn60Pb40)	solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO
Soldadura de plomo estañado	solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO
Flux de soldadura	flux, for wave soldering	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO
Encapsulante Etil Vinil Acetato (EVA)	ethylvinylacetate, foil	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO
Fluoruro de polivinilo– polietilentereftalato–fluoruro de polivinilo o Tedlar-PET–Tedlar (TPT)	polyvinylfluoride, film	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO
Perfiles de aluminio 6061 anodizado (AlMg ₃)	aluminium alloy, AlMg ₃	market for aluminium alloy, AlMg ₃ aluminium alloy, AlMg ₃ Cutoff, S - GLO
Silicona	silicone product	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW
Caja de conexiones de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, del inglés Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO

Caja de cartón corrugado	containerboard, fluting medium	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW
Fleje de PET 5/8	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO
Emplave calibre 60 de polietileno	packaging film, low density polyethylene	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO
Computadora para prueba solar	computer, laptop	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO
Electricidad	electricity, medium voltage	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX

También, se está suponiendo que, en todos los escenarios de tratamiento de residuos, el AlMg₃ que proviene de los marcos de los paneles fotovoltaicos, por ser un material valorado en México y que por tanto no es común que se pierda en su disposición final, se está mandando a reciclar, en cualquier caso. Una situación similar ocurre con el vidrio solar (y el vidrio en general), sin embargo, por tratarse de pocas cantidades y que además llega a estar fuertemente unido al encapsulante del panel fotovoltaico (tras el laminado, lo que lo hace muy difícil de separar), suele no llevarse a reciclar y termina siendo parte de la mezcla de los demás residuos de la manufactura de paneles fotovoltaicos. De esta forma, en todos los escenarios modelados, el vidrio es asignado al tratamiento que corresponda.

Tabla 6. BASE DE DATOS DISPONIBLE EN ECOINVENT 3.8 SOBRE TRATAMIENTOS PARA DISTINTOS TIPOS DE RESIDUOS

OUTPUT	ECOINVENT 3.8 FLOW	ECOINVENT 3.8 PROVIDER PER SCENARIO			
		Burning	Recycling	Sanitary Landfill	Unsanitary Landfill
Polipropileno	waste polypropylene	treatment of waste polypropylene, municipal incineration waste polypropylene Cutoff, S - RoW	NO DATABASE	treatment of waste polypropylene, sanitary landfill waste polypropylene Cutoff, S - RoW	treatment of waste polypropylene, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste polypropylene Cutoff, S - GLO
Polietileno	waste polyethylene	treatment of waste polyethylene, municipal incineration waste polyethylene Cutoff, S - RoW	waste polyethylene, for recycling, sorted FLOW WAS USED	treatment of waste polyethylene, sanitary landfill waste polyethylene Cutoff, S - RoW	treatment of waste polyethylene, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste polyethylene Cutoff, S - GLO
	waste polyethylene, for recycling, sorted	waste polyethylene FLOW WAS USED	treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting waste polyethylene, for recycling, sorted Cutoff, S - RoW	waste polyethylene FLOW WAS USED	waste polyethylene FLOW WAS USED
Cartón	waste paperboard	treatment of waste paperboard, municipal incineration waste paperboard Cutoff, S - Row	waste paperboard, sorted FLOW WAS USED	treatment of waste paperboard, sanitary landfill waste paperboard Cutoff, S - RoW	treatment of waste paperboard, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste paperboard Cutoff, S - GLO
	waste paperboard, sorted	waste paperboard FLOW WAS USED	treatment of waste paperboard, unsorted, sorting waste paperboard, sorted Cutoff, S - RoW	waste paperboard FLOW WAS USED	waste paperboard FLOW WAS USED

Papel	waste graphical paper	treatment of waste graphical paper, municipal incineration waste graphical paper Cutoff, S - RoW	waste paper, sorted FLOW WAS USED	treatment of waste paperboard, sanitary landfill waste paperboard Cutoff, S - RoW	treatment of waste paperboard, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste paperboard Cutoff, S - GLO
	waste paper, sorted	waste graphical paper FLOW WAS USED	treatment of waste paperboard, unsorted, sorting waste paperboard, sorted Cutoff, S - RoW	waste graphical paper FLOW WAS USED	waste graphical paper FLOW WAS USED
Etil Vinil Acetato (EVA)	waste plastic, mixture	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration waste plastic, mixture Cutoff, S - RoW	waste plastic, consumer electronics, sorted FLOW WAS USED	treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill waste plastic, mixture Cutoff, S - RoW	treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste plastic, mixture Cutoff, S - GLO
	waste plastic, consumer electronics, sorted	waste plastic, mixture FLOW WAS USED	treatment of waste plastic, consumer electronics, manual dismantling, sorting and cleaning, informal sector waste plastic, consumer electronics, sorted Cutoff, S - IN	waste plastic, mixture FLOW WAS USED	waste plastic, mixture FLOW WAS USED
Fluoruro de polivinilo– polietilentereftalato –fluoruro de polivinilo o Tedlar–PET–Tedla (TPT)	waste polyvinylfluoride	treatment of waste polyvinylfluoride, municipal incineration waste polyvinylfluoride Cutoff, S - RoW	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE
	waste polyethylene terephthalate	treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration waste polyethylene terephthalate Cutoff, S - RoW	waste polyethylene terephthalate, for recycling, sorted FLOW WAS USED	treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill waste polyethylene terephthalate Cutoff, S - RoW	treatment of waste polyethylene terephthalate, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste polyethylene terephthalate Cutoff, S - GLO
	waste polyethylene terephthalate, for recycling, sorted	waste polyethylene terephthalate FLOW WAS USED	treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted, sorting waste polyethylene terephthalate, for recycling, sorted Cutoff, S - RoW	waste polyethylene terephthalate FLOW WAS USED	waste polyethylene terephthalate FLOW WAS USED
Vidrio templado de bajo contenido de hierro	waste glass	treatment of waste glass, municipal incineration waste glass Cutoff, S - RoW	waste glass sheet FLOW WAS USED	treatment of waste glass, sanitary landfill waste glass Cutoff, S - GLO	treatment of waste glass, unsanitary landfill, hyperarid infiltration class (-250mm) waste glass Cutoff, S - GLO
	waste glass sheet	waste glass FLOW WAS USED	treatment of waste glass sheet, sorting plant waste glass sheet Cutoff, S - RoW	waste glass FLOW WAS USED	waste glass FLOW WAS USED
Aluminio 6061 anodizado (AlMg ₃)	aluminium scrap, post-consumer	SENT TO RECYCLING	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer,	SENT TO RECYCLING	SENT TO RECYCLING

			prepared for melting Cutoff, S - RoW		
Vapor de estaño (por soldadura de celdas fotovoltaicas)	Tin	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor
Vapor de etanol (por soldadura de celdas fotovoltaicas)	Ethanol	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor	Elementary flows/Emission to air/indoor
Cobre (de celdas fotovoltaicas descartadas)	Copper	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/agricultural
Plomo (de celdas fotovoltaicas descartadas)	Lead	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/agricultural
Estaño (de celdas fotovoltaicas descartadas)	Tin	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/ agricultural
Plata (de celdas fotovoltaicas descartadas)	Silver	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/agricultural
Estaño (de tiras de conexión y cintas de interconexión)	Tin	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/agricultural
Plomo (de tiras de conexión y cintas de interconexión)	Lead	NO DATABASE	NO DATABASE	NO DATABASE	Elementary flows/Emission to soil/agricultural

* Con respecto a la información de las bases de datos que corresponden a Reciclaje, Ecoinvent 3.8 no dice que los proveedores de servicio sean específicos para ese tipo de tratamiento, se trata de tratamientos que abarcan partes del proceso de reciclaje, lo cual es lo más aproximado que se consiguió modelar a este tratamiento de disposición final.

Adicionalmente, la Tabla 6 muestra que *Ecoinvent 3.8* no cuenta con los datos del tratamiento que se requiere analizar en algunos tipos de residuos, por lo que fue necesario hacer el supuesto de que aquel residuo con el que no se contará con información de tratamiento, no se tomará en cuenta asignándole una cantidad igual a cero en openLCA, como se ejemplifica en la Figura 10.

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data quali...	Description
waste paper, sorted	383:Materials recovery/3830:Mat...	0.00000	kg		none		treatment of ...		Sin base de datos para Unsanitar...
waste plastic mixture	382:Waste treatment and dispos...	31.98497	g		none	<input checked="" type="checkbox"/>	treatment of ...		Sin base de datos para Unsanitar...
waste polyvinylfluoride	382:Waste treatment and dispos...	0.00000	g		none	<input checked="" type="checkbox"/>	treatment of ...		Sin base de datos para Unsanitar...

Figura 10. Escenario de relleno sanitario no controlado (Unsanitary Landfill) en el que se está descartando residuos de papel, EVA y Tedlar (que compone al TPT). Este es un ejemplo de que aquellos residuos sin tratamiento en la base de datos de *Ecoinvent 3.8*, no se toma en cuenta dejando el campo de cantidad (Amount) en cero.

Sólo en el caso de los rellenos sanitarios no controlados, los residuos de celdas fotovoltaicas, tiras de conexión y cintas de interconexión están siendo vistos como emisiones a suelo agrícola (Tabla 6), es decir, como emisiones directas al medio ambiente. Esto se debe a que se modelo el peor caso para este tratamiento final de residuos.

Hay que recordar que, en la realidad, todos estos residuos (provenientes, en su mayoría, de la estación de reparación manual) son almacenados por las compañías. No se deshacen de ellos porque no hay un lugar al que puedan ser llevados. En México, de acuerdo con lo comentado durante las visitas, no existen compañías dedicadas al tratamiento de celdas fotovoltaicas y no hay una legislación específica que lo regule. Esto puede dar lugar a malas prácticas de gestión de residuos. Por lo que se modelo este escenario pensando en el momento en el que las compañías de manufactura de paneles fotovoltaicos ya no podrán seguir almacenando estos residuos (tal vez por el cierre de la empresa o falta de espacio) y sean llevados a un relleno sanitario no controlado. La falta de un riguroso control en un lugar como este puede provocar que el agua de lluvia alcance los residuos, lo que a su vez

provocará lixiviados contaminados con metales (como plomo, cobre, plata, etc.) que entrarán en contacto con el suelo y aguas subterráneas, dada la mala calidad o ausencia de una geomembrana adecuada que lo impida. En el peor de los casos, estos metales contaminarán suelos empleados para actividades agrícolas (una importante fuente alimento para el ser humano) a través del uso de agua de irrigación extraída, como suele ser común en México, de esta agua subterránea contaminada.

5.1. Incineración

En la Figura 11 se presenta el modelo de un ACV en openLCA para un escenario, en el cual, se está suponiendo que los residuos de manufactura de paneles solares serán llevados a incineración como tratamiento de disposición final. Los demás escenarios fueron modelados en el software de manera similar a como se observa en Figura 11, ya que las cantidades de material cargadas en el programa son las mismas que se presentaron en el ICV del capítulo anterior, con la diferencia del tratamiento al cual fueron llevados cada tipo de residuo.

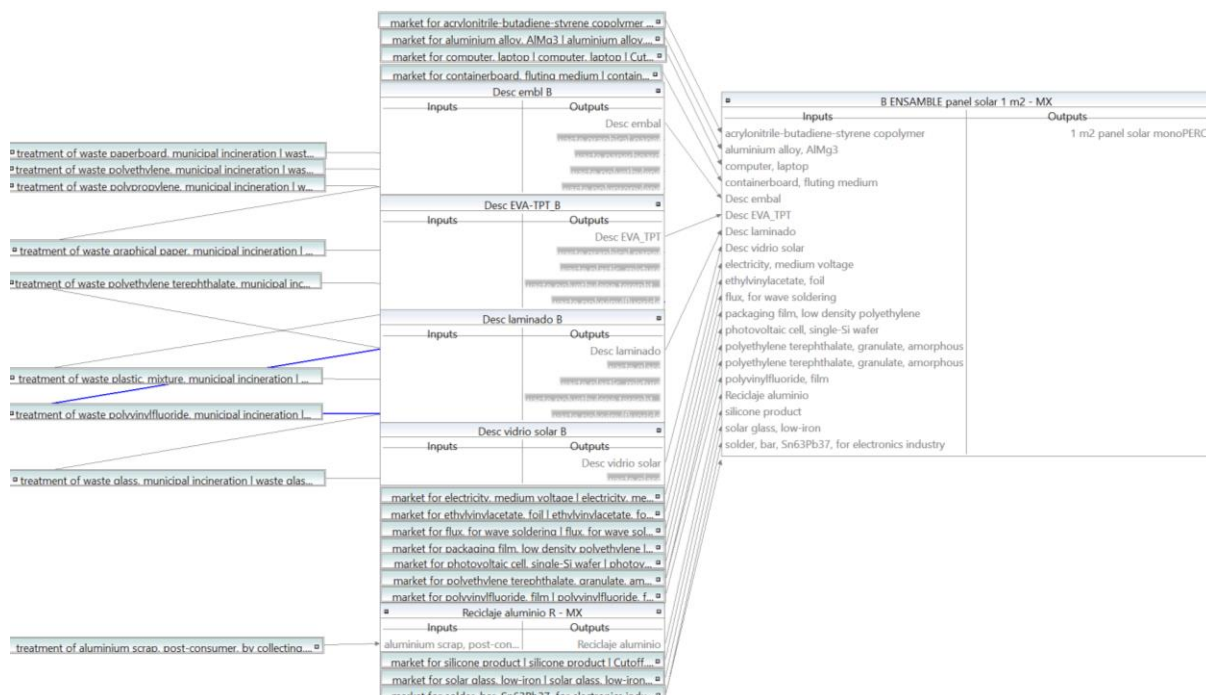


Figura 11. Modelo de Análisis de Ciclo de Vida en openLCA. Escenario de disposición final de residuos a incineración. Elaborado con base en la información recolectada.

Según la información de *Ecoinvent 3.8*, los datos que proporciona representan la actividad de eliminación de residuos en una incineradora de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Suiza. Según la base de datos, estas cifras bien pueden ser aplicables a las prácticas modernas de incineración en Europa, Norteamérica o Japón; y aseguran por completo su validez para un periodo de tiempo que abarcan los años entre 2006 y 2021.

En específico, la obtención de estos datos sobre el tratamiento de incineración fue resultado de un estudio de la tecnología media encontrada en las plantas de RSU suizas en 2010, la cual involucra *grate incinerators* (en español, incineradores de tipo parrilla) con las siguientes características:

- Precipitador electrostático para cenizas volantes

- Depurador húmedo de gases de combustión
- Instalaciones DeNox: Reducen el contenido de óxidos de nitrógeno (NOx) a menudo usando amoníaco. En estas instalaciones, según un ponderado de la masa de residuos quemados que representan la media suiza, hay 25% de reducción de emisiones de NOx por medio de RNCS (Reducción No Catalítica Selectiva), 42.77% de reducción de alto polvo de SCR (Sílice Cristalino Respirable) y 32.68% de reducción de bajo polvo de SCR. Sin este tipo de instalaciones, las reducciones de las emisiones antes expuestas son de 0%.
- 58% de eficacia de separación de chatarra de hierro de la escoria
- 31% de eficacia de separación de chatarra no férrica
- 15.84% de eficiencia eléctrica bruta
- 28.51% de eficiencia térmica bruta

Adicionalmente, la base de datos de *Ecoinvent 3.8*, reporta que el estudio suizo de 2010 incluye al inicio actividades (de la puerta) de recepción de residuos y entrega en el depósito de residuos en el emplazamiento de la planta incineradora (sin transportes a la incineradora), al igual que todas las actividades previas a esto (de la cuna). Del mismo modo, en el final incluye emisiones específicas de residuos a corto plazo al agua procedentes de lixiviados y emisiones a largo plazo del vertedero a las aguas subterráneas. En otras palabras, se puede decir que es un estudio que abarca actividades de la cuna a la tumba.

Ecoinvent 3.8 también recomienda este conjunto de datos para residuos, que van a eliminación como parte de la mezcla de residuos urbanos, con las siguientes características (Tabla 7).

Tabla 7. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS PARA LOS CUALES ECOINVENT 3.8 RECOMIENDA USAR SU BASE DE DATOS DE TRATAMIENTO POR INCINERACIÓN

Características del residuo	Polipropileno	Polietileno	Cartón	EVA	TPT	Vidrio templado de bajo contenido de hierro	
Poder calorífico superior [MJ/kg]	36.16	42.82	17.91	34.05	28.09	0.1423	
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	32.78	42.47	15.92	30.79	27.89	0.04602	
Composición de residuo (húmedo, en ppm)	H ₂ O	159000	4000	104370	153000	2000	20000
	O	32454	38435	392680	73717	16911	483070
	H	103430	122490	57791	105910	1066	
	C	694120	822050	433270	633590	570130	
	S	360.46	426.9	1776.8	1406.7	1057	
	N	1095.3	1297.2	2583.5	6112	1057	
	Cl	1234.1	1461.5	7173.3	18131		195.89
	Br	8.0972	9.5896		65.319	73.839	
	F	12.146	14.384		13.717	329620	
	As	1.5385	1.822	1.168	1.7729	2.0042	
	Ba	202.43	239.74	57.193	174.03	196.73	
	Cd	28.663	33.946	0.93313	75.786	2.7546	
	Co	1.417	1.6782	0.91806	29.478	33.322	
	Cr	10.526	12.466	9.2403	38.132	43.106	303.63
Cu	34.93	41.367	35.113	296.41	28.223	7.8356	
Hg	0.040486	0.047948	0.30131	0.79234	0.89569		

Mn	25.371	30.047	95.196	74.574	84.301	
Ni	0.80972	0.95896	10.64	19.222	21.729	
Pb	19.076	22.596	28.963	435.81	16.002	38.688
Sb	8.5021	10.069	0.0046044	40.093	45.323	
Se	1.7004	2.0138	3.1073	1.9596	2.2152	
Sn	3.2205	3.814	6.7521	24.453	391.41	
V	1862.4	2205.6		268.88	303.95	
Zn	288.78	342.01	63.333	521.69	59.775	3.9178
Be	0.40486	0.47948	1.1299	0.46656	0.52742	
Sr	71.661	84.868	45.009	82.582	93.353	
Ti	809.72	958.96		933.13	1054.8	
Tl	0.32389	0.38358		0.37325	0.42194	
Si						359090
Fe	1295.6	1534.3		3476.5	3930	
Ca	2186.3	2589.2				72818
Al	161.94	191.79		186.63	210.97	
Mg	80.972	95.896				
Na	1186.6	1405.4		1367.5	1545.9	64472

En todos los casos, se dice que el porcentaje de carbono biogénico en los residuos es de 0% y que el porcentaje de metales en los residuos no oxidados y reciclables a granel (excluidas las piezas muy pequeñas o finas) es de 0% hierro, 0% aluminio y 0% cobre. Por otro lado, en el caso del vidrio templado, el mismo proceso de *Ecoinvent* 3.8 recomienda que grandes cantidades de vidrio de empaque se manden a tratamientos de reciclaje o a relleno sanitario. En nuestro caso, por estar considerando que la cantidad de vidrio templado que se está generando como residuo es baja, entonces es mandada a incineración.

Después de la incineración, *Ecoinvent* 3.8 indica que se obtienen los siguientes resultados para un kilogramo de cada tipo de residuo de manufactura de paneles solares (Tabla 8).

Tabla 8. RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS POR INCINERACIÓN SEGÚN LA BASE DE DATOS DE ECOINVENT 3.8

Después de la incineración (burning)	Polipropileno	Poliétileno	Cartón	EVA	TPT	Vidrio templado de bajo contenido de hierro
kg de escoria que se depositarán en vertederos / kg de residuo incinerado	0.02025	0.02398	0.009791	0.0223	0.3223	1.152
kg de residuos que se depositarán en vertederos / kg de residuo incinerado	0.008463	0.01002	0.00712	0.01561	0.3313	0
kg de cemento para solidificación adicional / kg de residuo incinerado	0.003385	0.004009	0.002848	0.006245	0.1325	0
Producción neta de energía (MJ/kg)	4.2	5.55	1.99	3.92	3.53	0.01
Producción neta de energía térmica (MJ/kg)	8.15	10.69	3.98	7.66	6.9	0

La composición de los residuos anteriores, de acuerdo con *Ecoinvent* 3.8, se obtuvo según coeficientes de transferencia para RSU modernos, al igual que con el uso de referencias bibliográficas, datos teóricos u otra fuente.

5.2. Reciclaje

En la Figura 12 se presenta el modelo de un ACV en openLCA para un escenario, en el cual, los residuos de manufactura de paneles solares serán llevados a reciclar.

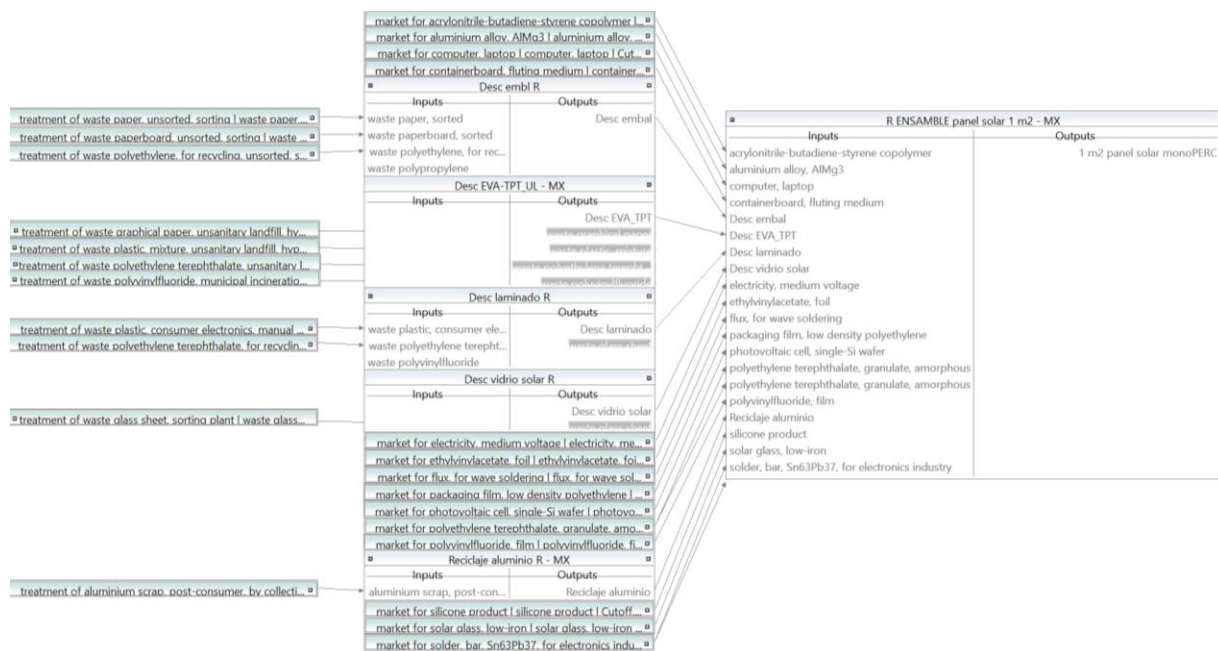


Figura 12. Modelo de Análisis de Ciclo de Vida en openLCA. Escenario de reciclaje de residuos. Elaborado con base en la información recolectada.

Con respecto a este tratamiento de residuos, la base de datos de *Ecoinvent 3.8* no tiene mucha información disponible para ninguno de los tipos de residuos de manufactura de módulos fotovoltaicos que se está estudiando. Indica que los datos, de los cuales se asegura su completa validez en el año 2021, toman en cuenta actividades desde la cuna, es decir, todas las actividades previas al reciclaje. También que la tecnología que se analizó en su estudio para obtener los datos es actual, sin especificar más.

Para ofrecer una idea general de como luce el tratamiento de reciclaje al que se refiere *Ecoinvent 3.8* se investigó acerca del tema. Se averiguó que, en el caso de los residuos plásticos, pueden ser tratados por medio de reciclaje mecánico o químico (entre otros procesos), aunque, el reciclaje mecánico es el proceso más común. De acuerdo con estudios, comparado con el reciclaje químico, el reciclaje mecánico es la opción más económica, ecológica y energética para gestionar los residuos plásticos. Se refiere a la transformación de residuos plásticos en materias primas o productos secundarios sin cambiar significativamente la estructura química del material y con esto no afectar significativamente a su calidad. Este proceso incluye actividades como separación y clasificación de los residuos (en función de su tipo, densidad, color y propiedades físicas), molidura y trituración, lavado y limpieza (con diferentes disolventes en función de sus impurezas, después con agua y, en algunos casos, para una mayor eliminación, con tensioactivos y disolventes alcalinos), secado, aglutinación y un reprocesado que le confiere al plástico diferentes formas (Rajkumar, Parameswaranpillai, Mavinkere , & Siengchin, 2021).

En el caso de los residuos de papel y cartón, se encontró que la maquinaria y los equipos utilizados para volver a fabricar papel a partir de fibras secundarias (papel para reciclar) son similares a los equipos de las plantas que

tradicionalmente producen papel a partir de pasta de madera (material virgen), sólo se modifican algunos equipos y pasos del proceso. En general, el proceso para reciclar papel abarca las siguientes etapas: fabricación de la pasta o pulpa (mezclando el papel previamente troceado con agua caliente y añadiendo químicos que facilitan la eliminación de tintas), tamizado (la pulpa se hace pasar por agujeros de distintos tamaños, lo que ayuda a eliminar algunos contaminantes), lavado (se hace girar la pulpa en grandes cilindros en forma de cono para que mediante fuerzas centrípetas se expulsen los contaminantes pesados y los ligeros se acumulen en el centro), destintado (puede realizarse por métodos químicos como el lavado y la flotación, u otros como el método de blanqueo, el método ultrasónico y el método biológico) y amasado (importante para obtener una mejor calidad, distribuir la temperatura homogéneamente en el material y evitar que el efecto de los químicos se ralentice). Después de estas actividades, los que antes eran residuos de papel y cartón pueden ahora ser usados en la producción de papel o cartón reciclado (Yılmaz, Tutus, & Sönmez, 2021).

5.3. Relleno sanitario

En la Figura 13 se presenta el modelo de un ACV en openLCA para un escenario, en el cual, los residuos de manufactura de paneles solares son llevados a un relleno sanitario como tratamiento de disposición final.

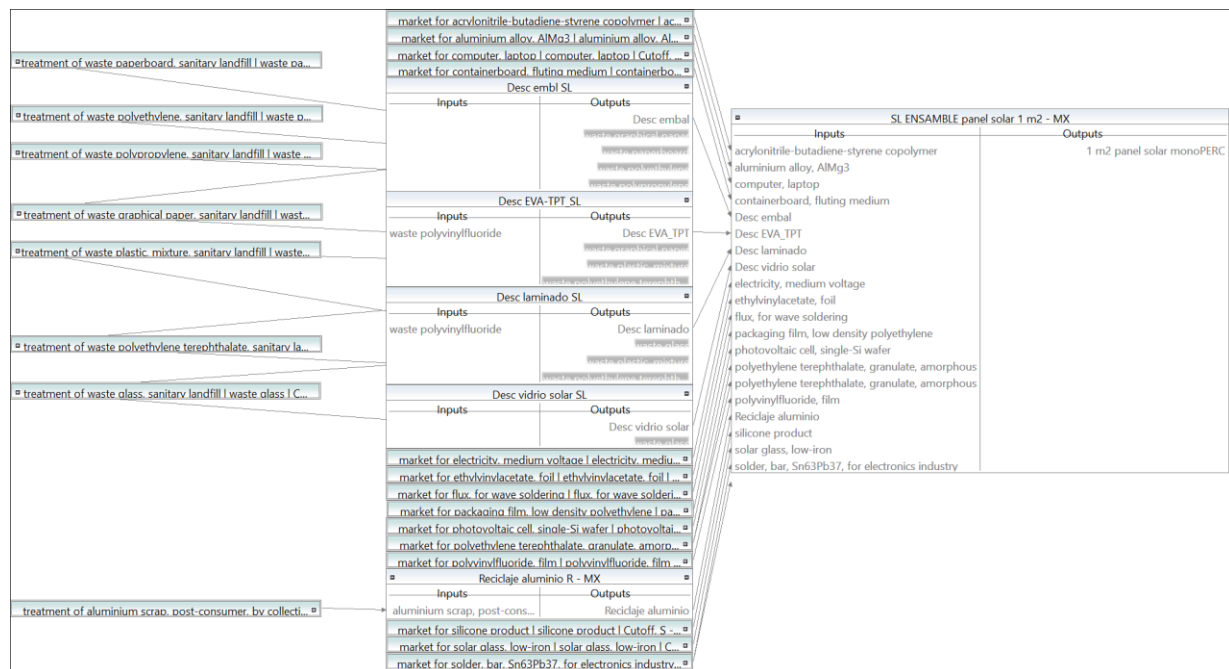


Figura 13. Modelo de Análisis de Ciclo de Vida en openLCA. Escenario de disposición final de residuos a relleno sanitario. Elaborado con base en la información recolectada.

De acuerdo con la información de *Ecoinvent 3.8*, los datos que proporciona representan la actividad de eliminación de residuos en un relleno sanitario que cuenta con la tecnología encontrada en Suiza en el año 2000. En el caso del vidrio templado de bajo contenido de hierro, los datos se obtuvieron bajo el supuesto de que el relleno sanitario se encuentra en un lugar con una temperatura media anual de 14.74 °C y una precipitación media anual de 889 mm/año e infiltración neta de 392 mm/año. Del mismo modo, se menciona que asegura la completa validez de los datos durante el periodo de tiempo que abarcan de los años de 1994 a 2021 para la mayoría de los residuos,

con excepción del vidrio templado, ya que su periodo se encuentra entre los años 2010 y 2021 (año en el que fueron extrapolados datos del 2017 y la incertidumbre ajustada).

El tipo de tecnología que analiza los estudios de la base de datos *Ecoinvent 3.8* se trata de un relleno sanitario para residuos municipales biogénicos (residuos de origen vegetal, animal o microbiano) o no tratados que incluye el sellado de la base, un sistema de recogida de lixiviados y el tratamiento de los lixiviados en una planta municipal de aguas residuales. También cuenta con recultivo y seguimiento durante 150 años tras el cierre. En el caso del vidrio templado, se tiene un inventario para un relleno sanitario de residuos sólidos urbanos que se encontrará en operación por 30 años con: recolección y tratamiento de lixiviados (de los primeros 100 años), una altura media final de 20 m, un porcentaje de gas directamente emitido de 47%, un porcentaje de gas recuperado y utilizado de 34.98% (con una eficiencia de conversión en electricidad de 27.8% y de 13.5% en energía térmica).

Según *Ecoinvent 3.8*, se realizó un estudio que analizó las actividades involucradas en el tratamiento por relleno sanitario desde la cuna, es decir, incluyendo todas las actividades anteriores a partir del depósito final de los residuos. Aunque, en el caso del vidrio templado no se incluye el transporte de este al emplazamiento. Posteriormente, las actividades incluidas en el estudio terminan, en el caso de la mayoría de los residuos, con el cálculo de las emisiones atmosféricas a corto plazo (de 0 a 100 años) específicas de la incineración de gases emitidos en el relleno sanitario y por sus lixiviados; igualmente, con las emisiones procedentes del tratamiento de lixiviados a corto plazo en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (incluida la eliminación de lodos de PTAR en incineradoras municipales) y emisiones a largo plazo del relleno sanitario a las aguas subterráneas (tras el fallo del revestimiento de la geomembrana). En el caso del vidrio templado, el estudio se limita hasta el cálculo de las emisiones a corto plazo y a largo plazo específicas de los residuos a la atmósfera a través del gas y los lixiviados de rellenos sanitario.

Por último, *Ecoinvent 3.8* menciona que se realizó un modelo de relleno sanitario para casi todos los residuos (exceptuando al vidrio templado) basado en composiciones iniciales de los residuos provenientes de diversas fuentes bibliográficas y también, de las concentraciones de lixiviados observados en la literatura, que luego se extrapolaron a 60 000 años considerando sus características químicas. En la Tabla 9 se dice la composición de los residuos para los cuales *Ecoinvent 3.8* recomienda usar su base de datos.

Tabla 9. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS PARA LOS CUALES ECOINVENT 3.8 RECOMIENDA USAR SU BASE DE DATOS DE TRATAMIENTO POR RELLENO SANITARIO

Características del residuo	Polipropileno	Polietileno	Cartón	Etil Vinil Acetato (EVA)	Vidrio templado de bajo contenido de hierro
Poder calorífico superior [MJ/kg]	36.16	42.82	17.91	34.05	0.1423
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	32.78	42.47	15.92	30.79	0.04602
Porcentaje de carbono biogénico	0%	0%	100%	0%	60.40%
Degradabilidad global durante 100 años	1%	1%	32.44%	1%	0%
Composición de residuo (húmedo, en ppm)	Igual a la mencionada en la Tabla 7	Igual a la mencionada en la Tabla 7	Igual a la mencionada en la Tabla 7	Igual a la mencionada en la Tabla 7	Igual a la mencionada en la Tabla 7

5.4. Relleno sanitario no controlado

En la Figura 14 se presenta el modelo de un ACV en openLCA para un escenario, en el cual, los residuos de manufactura de paneles solares son llevados a un relleno sanitario no controlado como tratamiento de disposición final.

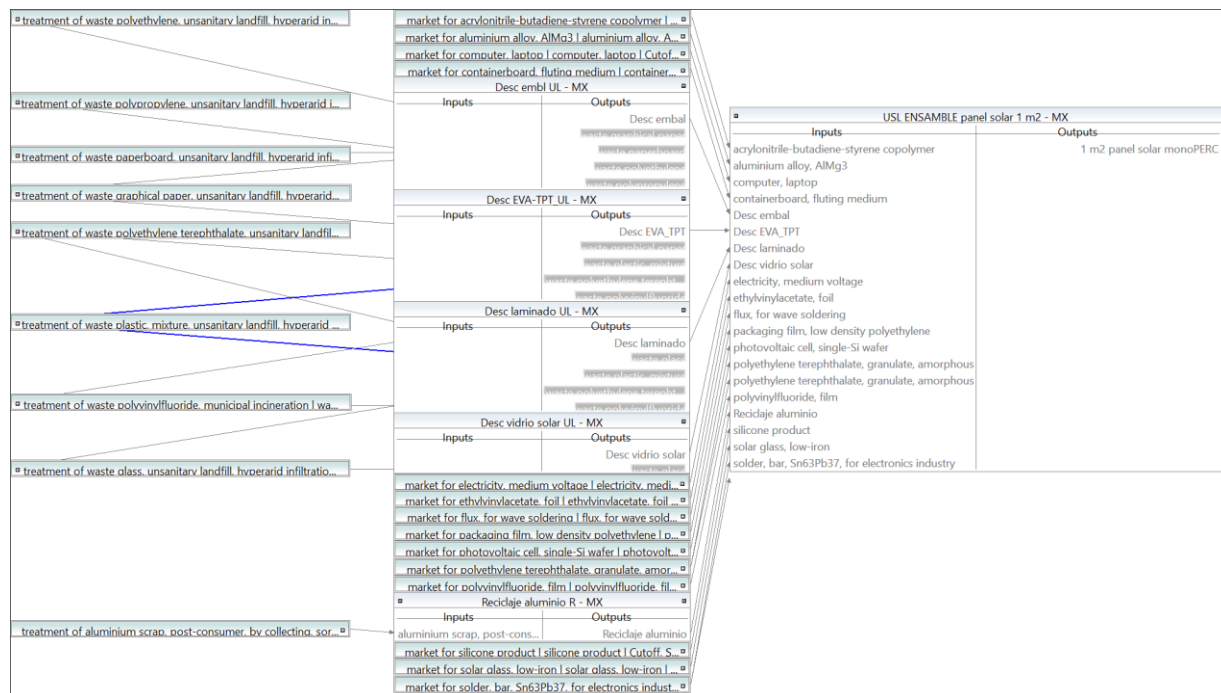


Figura 14. Modelo de Análisis de Ciclo de Vida en openLCA. Escenario de disposición final de residuos a relleno sanitario no controlado. Elaborado con base en la información recolectada.

Sobre rellenos sanitarios no controlados, *Ecoinvent 3.8* cuenta con una base de datos que representan la disposición final de los residuos en un relleno sanitario no controlado del año 2018, del que no se informa su ubicación geográfica. No obstante, da a conocer que se trata de un relleno sanitario no controlado con temperatura media anual de 8 °C, una precipitación media anual de 350 mm/año y una infiltración neta de -250 mm/año. La infiltración negativa significa que el flujo de lixiviados se invierte y fluye hacia la superficie, donde el agua se evapora y los sólidos disueltos se convierten en evaporitas sólidas. Esta base de datos tiene completa validez durante el periodo de tiempo que abarcan los años de 2006 a 2021, siendo los datos extrapolados del año 2012 al año de cálculo más actual (2021), con la incertidumbre ajustada.

La base de datos de *Ecoinvent 3.8* sobre rellenos sanitarios no controlados, incluyen actividades desde su depósito final (sin incluir el transporte hasta el emplazamiento), es decir, desde la cuna o incluyendo todas las actividades previas, hasta el cálculo de emisiones a corto y largo plazo específicas de los residuos a la atmósfera a través del gas y los lixiviados generados en el relleno sanitario no controlado.

Para casi todos los residuos de manufactura de paneles solares que cuentan con datos disponibles (a excepción del vidrio templado), *Ecoinvent 3.8* elaboró su inventario a partir del estudio de un relleno sanitario no controlado con una altura media final de 15 metros y que estará en operación por 25 años. Del mismo modo, entre otras características de este relleno sanitario no controlado, se tiene que el porcentaje de gas emitido directamente es de

100%, los lixiviados no son tratados (no se puede realizar ningún tratamiento) y su infiltración es negativa. Además, debido a las condiciones climáticas áridas de la ubicación del relleno sanitario, se presenta formación de evaporitas a partir del contenido del relleno sanitario, que son parcialmente erosionadas por el viento (10% de estas) y transportadas por el aire. También, se tiene que la descomposición inicial en los primeros 100 años de los residuos da lugar a una tasa de erosión eólica anual que a largo plazo que se modifica como se muestra en la Tabla 10. No hay datos de esta tasa para el vidrio templado.

Tabla 10. TASA ANUAL DE EROSIÓN EÓLICA GENERADA POR LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO DE BASE DE DATOS DE ECOINVENT 3.8 EN LOS PRIMEROS 100 AÑOS Y A LARGO PLAZO

TASA ANUAL DE EROSIÓN EÓLICA	Polipropileno	Poliétileno	Cartón	Etil Vinil Acetato (EVA)
Durante las descomposición inicial de los residuos en los primeros 100 años (g/m ² .yr)	6.717	7.955	353.4	21.04
A largo plazo (g/m ² .yr)	20.93	24.79	15.17	21.57

Sobre los residuos que se están analizando en este trabajo, *Ecoinvent 3.8* dice que, en sus estudios para la obtención de su base de datos, los residuos formaban parte de la mezcla de residuos municipales que va a disposición a un relleno sanitario no controlado como parte de su manejo. En el caso particular del cartón y en vidrio templado de bajo contenido de hierro, *Ecoinvent 3.8* indica que las cantidades mayores (ya separadas) es muy probable que vayan a reciclaje, dependiendo de la situación específica del país. En nuestro caso, se considera que ninguno de estos residuos será reciclado.

6. Comparativa de escenarios

En esta sección se presentarán los resultados de impacto ambiental de los diferentes escenarios modelados en el capítulo anterior. Se utilizó *IMPACTWorld+* (*Continental Latin America_Damage 1.431*) como método para la evaluación del impacto del ciclo de vida de todos los escenarios. Al ser un método que cuenta con 27 categorías de impacto diferente, se agruparon algunas de ellas (que son similares y que tienen misma unidad de referencia) en una misma para generar un resultado general (total) de esas categorías. A continuación, se presentan las categorías que se agruparon (Figura 15).

<p style="text-align: center;">Freshwater total [PDF.m2.yr]</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Freshwater acidification •Freshwater ecotoxicity, long term •Freshwater eutrophication
<p style="text-align: center;">Human toxicity total [DALY]</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Human toxicity cancer, long term •Human toxicity non-cancer, long term
<p style="text-align: center;">Land total [PDF.m2.yr]</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Land occupation, biodiversity •Land transformation, biodiversity
<p style="text-align: center;">Marine total [PDF.m2.yr]</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Marine acidification, long term •Marine eutrophication
<p style="text-align: center;">Water availability, total [PDF.m2.yr]</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Water availability, freshwater ecosystem •Water availability, terrestrial ecosystem

Figura 15. Agrupación de categorías de impacto del método IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431)

También, al estar usando *IMPACTWorld+* (*Continental Latin America_Damage 1.431*), se hace la aclaración que este método de evaluación del impacto del ciclo de vida considera como “corto plazo” a un periodo de tiempo de 100 años posteriores a la emisión y “largo plazo” a un periodo de tiempo que supera los 100 años después de la emisión. Estas dos consideraciones de evaluación a corto y largo plazo no se suman, sino que se elige entre las dos para la toma de decisiones. De aquí en adelante, se decidió analizar las consideraciones de evaluación a largo plazo, ya que incluye las consideraciones a corto plazo.

Una vez que se agruparon las anteriores categorías de impacto, se acomodaron los diferentes resultados de impacto de los distintos escenarios en una tabla comparativa (Tabla 11) a la cual, se le aplicó un formato condicional para identificar con facilidad, por cada tratamiento de residuos, aquellas categorías con mayor impacto relativo (color rojo) y aquellas con menor impacto relativo (color verde), siendo los colores intermedios anaranjado y amarillo los que siguen en esta escala de colores, de mayor a menor impacto (en ese orden mencionado).

Tabla 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IMPACTO EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS

IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM					
Impact category (agrupation)	Reference unit	Burning	Recycling	Sanitary Landfill	Unsanitary Landfill
Freshwater total	PDF.m2.yr	3520.90	3517.00	3521.26	3614.20
Climate change, ecosystem quality	PDF.m2.yr	140.33	140.00	140.182	140.183
Marine total	PDF.m2.yr	33.38	33.30	33.35	33.34
Terrestrial acidification	PDF.m2.yr	11.594	11.58	11.593	11.595
Land total	PDF.m2.yr	9.1076	9.10	9.1075	9.107
Water availability, total	PDF.m2.yr	0.0137775	0.01377	0.0137771	0.0137770
Ionizing radiation, ecosystem quality	PDF.m2.yr	2.17812E-07	2.176E-07	2.17809E-07	2.17806E-07
Thermally polluted water	PDF.m2.yr	0	0	0	0
IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH					
Impact category (agrupation)	Reference unit	Burning	Recycling	Sanitary Landfill	Unsanitary Landfill
Climate change, human health	DALY	0.000639	0.000637	0.000638161	0.000638162
Water availability, human health	DALY	0.0004859	0.0004856	0.000485744	0.000485743
Particulate matter formation	DALY	0.000144622	0.0001469	0.000144619	0.0001473
Human toxicity total	DALY	0.00008547	0.000086	0.00008546	0.0011
Ionizing radiation, human health	DALY	5.28893E-07	5.285E-07	5.28888E-07	5.28883E-07
Ozone layer depletion	DALY	6.9630E-08	6.46E-08	6.96274E-08	6.96267E-08
Photochemical oxidant formation	DALY	3.4320E-08	3.428E-08	3.43162E-08	3.43159E-08

**Las cantidades presentadas en la tabla no incluyen impactos a corto plazo. Solamente incluye impactos a largo plazo.

7. Análisis de resultados

Con base en los resultados anteriores, en esta sección se revisarán cada una de las categorías de impacto que se están considerando para su análisis.

7.1. Impactos al agua dulce

En la categoría de impactos al agua dulce (*Freshwater total*), la gráfica (Figura 16) muestra que la disposición a relleno sanitario no controlado (*Unsanitary Landfill*) es el escenario con mayor impacto (3614.2 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (3517 PDF.m2.yr). La diferencia que existe entre los resultados anteriores es de aproximadamente 97.21 PDF.m2.yr. La Figura 16 muestra la suma de las categorías ecotoxicidad de agua dulce a largo plazo, eutrofización de agua dulce y acidificación de agua dulce.

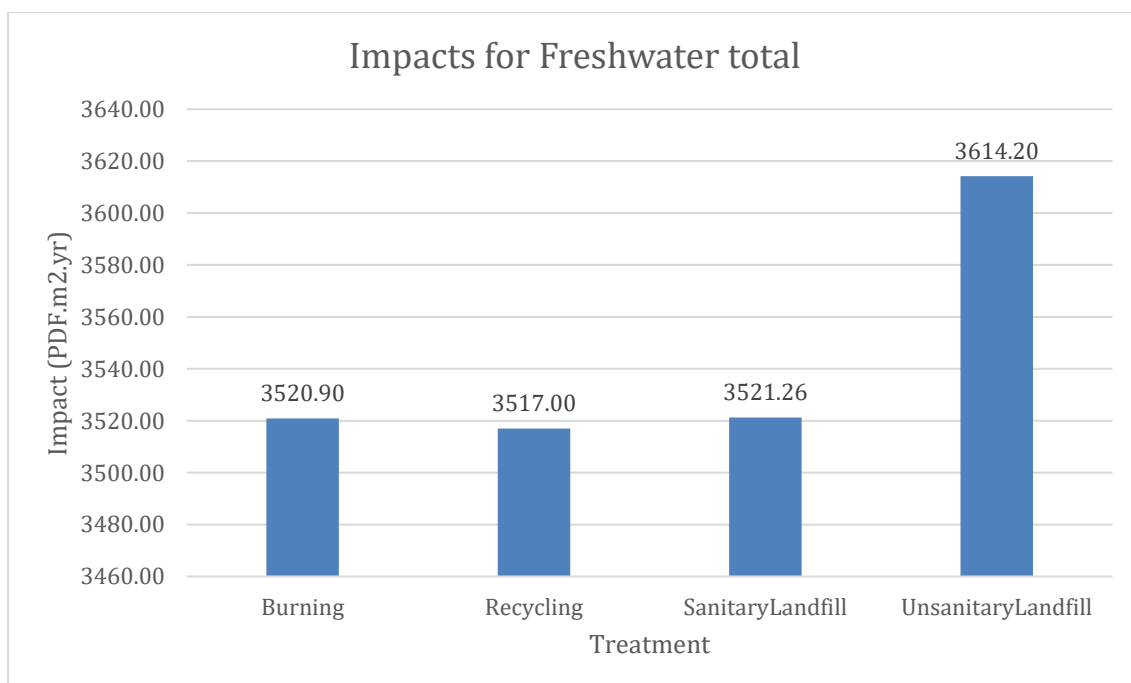


Figura 16. Gráfica comparativa para categoría de impactos al agua dulce (*Freshwater total*)

Al revisar a mayor profundidad (Tabla 12) el motivo por el cual la disposición a relleno sanitario no controlado está provocando un gran impacto al agua dulce, se encontró que la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo es la que presenta mayor aportación (3613.08 PDF.m2.yr), seguida de la categoría de acidificación en agua dulce (1.09 PDF.m2.yr)

Tabla 12. DETALLES SOBRE RESULTADO DE CATEGORÍA DE IMPACTO DE AGUA DULCE (*FRESHWATER TOTAL*) EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Agrupation	Impact category	Reference unit	Result_UnsanitaryLandfill
Freshwater total	Freshwater acidification	PDF.m2.yr	1.09
	Freshwater ecotoxicity, long term	PDF.m2.yr	3613.08
	Freshwater eutrophication	PDF.m2.yr	0.0275

Siguiendo, indagando en la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo para el tratamiento de residuos por relleno sanitario no controlado, se observa (Tabla 13) que sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 73.74 % de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 17.13 % de contribución a la categoría) y la producción de barras de soldadura de plomo estañado (con 3.11 % de contribución a la categoría).

Tabla 13. *Árbol de contribución a la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA*

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	USL ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	3613.08221	PDF.m2.yr
73.74%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	2664.29425	PDF.m2.yr
17.13%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	619.04953	PDF.m2.yr
03.11%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	112.34743	PDF.m2.yr
01.11%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	40.24584	PDF.m2.yr
00.93%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	33.74515	PDF.m2.yr
> 00.92%	Reciclaje aluminio R - MX	33.35494	PDF.m2.yr
00.25%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	8.96170	PDF.m2.yr
00.09%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	3.24482	PDF.m2.yr
00.03%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	0.94587	PDF.m2.yr
00.02%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	0.74403	PDF.m2.yr
> 00.01%	Desc EVA-TPT_UL - MX	0.48635	PDF.m2.yr
00.01%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	0.31278	PDF.m2.yr
> 00.01%	Desc laminado UL - MX	0.30951	PDF.m2.yr
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	0.24786	PDF.m2.yr
00.00%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	0.14479	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	0.08908	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	0.03063	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embl UL - MX	0.00046	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar UL - MX	3.40868E-9	PDF.m2.yr

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias químicas que una vez emitidas pueden alcanzar y afectar a los ecosistemas de agua dulce, como es nuestro caso, y de este modo tener efectos tóxicos en los seres vivos que se exponen a dichas sustancias a través de diferentes vías, causando múltiples consecuencias para su salud. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 14, son el aluminio, iones de cobre e iones de hierro.

Tabla 14. *Análisis de impacto de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA*

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Freshwater ecotoxicity, long term				3613.08221	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell	261:Manufacture of electronic components ...			2664.294...	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.96434 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	2282.350...	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.03839 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	210.18760	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.69027 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	134.30612	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3	242:Manufacture of basic precious and oth...			619.04953	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.05752 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	314.95312	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.12311 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	291.36585	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.04830 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	9.39838	PDF.m2.yr
market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry sol	202:Manufacture of other chemical product...			112.34743	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.03841 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	90.90225	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.00231 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	12.67518	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.03910 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	7.60788	PDF.m2.yr

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 15), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en un relleno sanitario no controlado, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos a las aguas subterráneas y su daño será más evidente en el largo plazo (96.15% de todos los impactos de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo). Por otro lado, en la misma Tabla 15, es más

claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (3507.96 PDF.m2.yr) ya abarca el 97.09% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 15 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo, si sus residuos son mandados a un relleno sanitario no controlado, es el aluminio, el cual tiene un impacto de 2764.88 PDF.m2.yr que representan el 76.52% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 15. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE A LARGO PLAZO DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Category	Sub-category	Reference unit	Aluminium	Copper, ion	Iron, ion	TOTAL	% Contribution to Freshwater ecotoxicity, long term
Emission to air	high population density	PDF.m2.yr	1.21			1.21	0.0334%
Emission to air	low population density	PDF.m2.yr	0.01098			0.01098	0.0003%
Emission to air	low population density, long-term	PDF.m2.yr	0.4517			0.4517	0.0125%
Emission to air	unspecified	PDF.m2.yr	15.75			15.75	0.4361%
Emission to soil	agricultural	PDF.m2.yr	1.42			1.42	0.0394%
Emission to soil	industrial	PDF.m2.yr	0.5969			0.5969	0.0165%
Emission to soil	unspecified	PDF.m2.yr	2.35			2.35	0.0650%
Emission to water	ground water	PDF.m2.yr	2.16	0.1649	6.65	8.97	0.2482%
Emission to water	ground water, long-term	PDF.m2.yr	2738.57	579.54	156.03	3474.13	96.15%
Emission to water	surface water	PDF.m2.yr	1.56			1.56	0.0432%
Emission to water	unspecified	PDF.m2.yr	0.7968	0.1665	0.5353	1.50	0.0415%
TOTAL			2764.88	579.87	163.21	3507.96	
% Contribution to Freshwater ecotoxicity, long term			76.52%	16.05%	4.52%	97.09%	

Buscando la fuente de este aluminio emitido a las aguas subterráneas y cuyo daño será más evidente a largo plazo, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo.

Tabla 16. Análisis de impacto de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Freshwater ecotoxicity, long term				2629.25201	PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER 202:Manufacture of other chemical produc...				1103.85006	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.39207 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	927.93365	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01930 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	105.64902	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.32554 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	63.34044	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER 261:Manufacture of electronic components...				876.06345	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.31259 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	739.81822	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01178 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	64.47195	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.24456 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	47.58414	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water	0.04513 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	8.78130	PDF.m2.yr
market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW 202:Manufacture of other chemical produc...				594.08439	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.21101 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	499.40710	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01038 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	56.85892	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.17521 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	34.09017	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 16, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de ecotoxicidad

en agua dulce a largo plazo y en la emisión de aluminio a aguas subterráneas (cuyo daño será más evidente a largo plazo), es la producción de las mencionadas obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino y a la utilización de un tipo de pasta de metalización que se está colocando tanto en la parte frontal como posterior de la celda y cuya elaboración requiere el uso de plomo, plata y químicos orgánicos entre los que se incluyen: óxido de etileno, formaldehído, metanol, metil ter-butil éter, fenol, propileno, estireno, tolueno líquido, urea, acetato de vinilo, cloruro de vinilo y xileno.

En el caso de la producción de *wafers*, al rastrear la mayor fuente de estos impactos en su producción, se llegó a la conclusión que su contribución a esta categoría se da principalmente por el uso de silicio grado solar (con pureza superior a 99.999999 %), el cual, implica primero producir silicio de calidad metalúrgica (con una pureza de 99%). Este silicio grado metalúrgico, según lo reportado por *Ecoinvent 3.8*, se produce por la reducción carbotérmica de arena de sílice en hornos de arco eléctrico utilizando coque de petróleo, carbón vegetal, astillas de madera y los electrodos de grafito del horno como agentes reductores (Jungbluth, Stucki, & Frischknecht, 2009). La generación de energía eléctrica necesaria para el proceso de producción de silicio grado metalúrgico y la actividad minera para la obtención de arena de sílice, es lo que especialmente hace que este proceso emita tanto aluminio a las aguas subterráneas. La producción eléctrica, al ser comúnmente producto de la quema de combustibles fósiles, provoca que el contaminante se ponga en contacto con el agua subterránea por la lixiviación de cenizas y material particulado que cae al suelo. Por su parte, la excavación que supone la actividad minera aumenta la posibilidad de que el aluminio, al ser el metal más abundante en la corteza terrestre, entre en contacto con el agua que se encuentra en el subsuelo.

Por otro lado, la pasta de metalización, a pesar de ser usada para mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y optimizar su proceso de producción, tiene componentes metálicos cuya obtención por actividad minera causan que se contaminen a largo plazo las aguas subterráneas con aluminio. Del mismo modo, se está suponiendo que se repetiría la situación, ya descrita, con la electricidad producida por la quema de combustible fósiles.

Tabla 17. Análisis de impacto de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
▼ Freshwater ecotoxicity, long term				189.78061	PDF.m2.yr
▼ P market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and oth...			180.61667	PDF.m2.yr
F Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01813 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	99.28776	PDF.m2.yr
F Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.03314 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	78.44380	PDF.m2.yr
F Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01094 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	2.12938	PDF.m2.yr
▼ P market for copper, cathode copper, cathode Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and oth...			6.53953	PDF.m2.yr
F Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.00218 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	5.16702	PDF.m2.yr
F Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.00017 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	0.94087	PDF.m2.yr
F Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.00204 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	0.39661	PDF.m2.yr

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 17, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo y en la emisión de aluminio a aguas subterráneas (cuyo daño será más evidente a largo plazo), es la producción de aleación de aluminio fundido y de cátodos de cobre. Igualmente, parece ser que aquello que está emitiendo el contaminante principal de la categoría a las aguas subterráneas, es la producción de energía (eléctrica y térmica) y la actividad minera para obtener los diferentes metales requeridos en los procesos.

Tabla 18. Análisis de impacto de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo, para la producción de soldadura de plomo estañado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Freshwater ecotoxicity, long term				1367.87772	PDF.m2.yr
tin production tin Cutoff, S - PE	243:Casting of metals / 2432:Casting of no...			1367.59846	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to water / ground water, long-term	0.46659 kg	2366.74523 PDF.m2.yr/kg	1104.30424	PDF.m2.yr
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.02877 kg	5475.32323 PDF.m2.yr/kg	157.51161	PDF.m2.yr
Iron, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.47191 kg	194.57066 PDF.m2.yr/kg	91.82019	PDF.m2.yr
Aluminium	Emission to air / unspecified	0.01065 kg	1049.81082 PDF.m2.yr/kg	11.18533	PDF.m2.yr
Zinc, ion	Emission to water / ground water, long-term	0.01016 kg	74.85716 PDF.m2.yr/kg	0.76061	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de soldadura de plomo estañado, se puede apreciar en la Tabla 18, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo y en la emisión de aluminio a aguas subterráneas (cuyo daño será más evidente a largo plazo), es la producción de estaño. Una vez más, el problema de emisión parece deberse a la generación de energía y la actividad minera; no obstante, en este caso, según la descripción de *Ecoinvent 3.8*, el proceso de fundición y reducción de estaño es alimentado con agua dulce subterránea. De esta agua, el 34% es evaporada durante el proceso, 61% se utiliza para el sistema de enfriamiento y 5% es utilizada para riego de jardines y cultivos para pienso. Esta extracción y uso de agua subterránea, se piensa que a la larga aumentarán sus probabilidades de ser contaminada con aluminio u otras sustancias.

7.2. Cambio climático, calidad de los ecosistemas

En la categoría de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas (*Climate change, ecosystem quality*) la gráfica (Figura 17) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (140.33 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (140 PDF.m2.yr). No obstante, la diferencia que tienen los resultados anteriores es muy pequeña, de aproximadamente 0.3293 PDF.m2.yr. La Figura 17 muestra solamente la categoría de impacto de cambio climático que afecta la calidad de los ecosistemas a largo plazo.

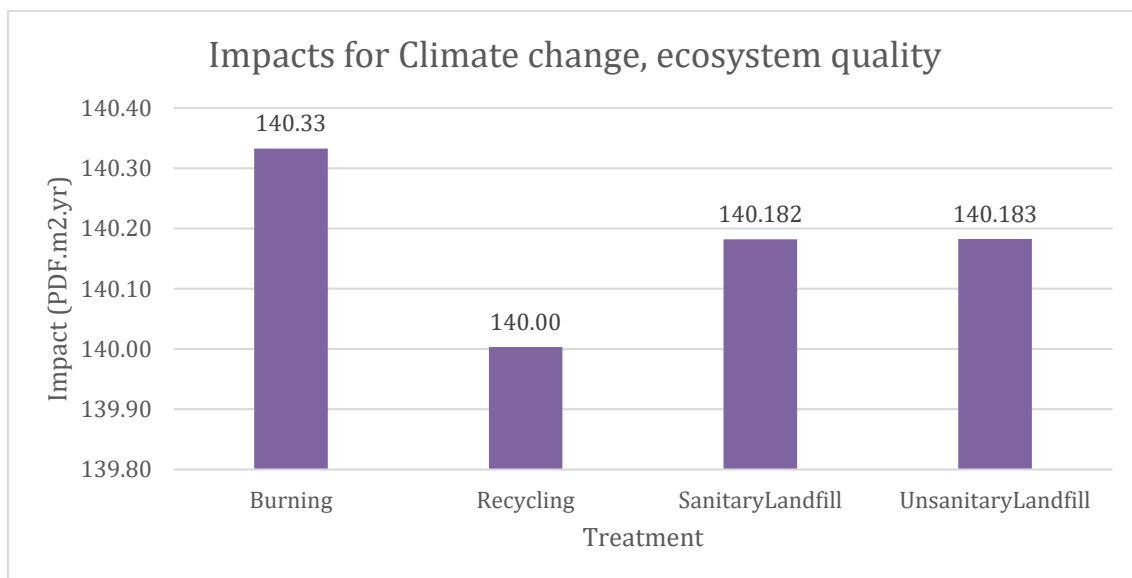


Figura 17. Gráfica comparativa para categoría de impacto Cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo (*Climate change, ecosystem quality, long term*)

Siguiendo, indagando en la categoría de cambio climático que afecta a los ecosistemas en el largo plazo para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 19) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 83.65% de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 9.56% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 3.67% de contribución a la categoría).

Tabla 19. *Árbol de contribución a la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo en el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA*

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	140.33262	PDF.m2.yr
83.65%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	117.38901	PDF.m2.yr
09.56%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	13.41778	PDF.m2.yr
03.67%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	5.14775	PDF.m2.yr
01.63%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	2.29273	PDF.m2.yr
00.61%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	0.85864	PDF.m2.yr
00.23%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	0.32099	PDF.m2.yr
00.17%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	0.23991	PDF.m2.yr
00.15%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	0.20426	PDF.m2.yr
00.13%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	0.18905	PDF.m2.yr
00.11%	Desc EVA-TPT_B	0.15242	PDF.m2.yr
00.04%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	0.06304	PDF.m2.yr
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	0.01953	PDF.m2.yr
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	0.01510	PDF.m2.yr
00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	0.01423	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	0.00604	PDF.m2.yr
00.00%	Desc laminado B	0.00189	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	0.00021	PDF.m2.yr
00.00%	Desc embl B	3.66184E-5	PDF.m2.yr
00.00%	Desc vidrio solar B	7.11878E-9	PDF.m2.yr

Como se muestra en la Tabla 20, durante las actividades antes mencionadas se liberan sustancias que contribuyen al cambio climático. Los principales contaminantes encontrados de este tipo son el dióxido de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles (dióxido de carbono fósil) y el tetrafluorometano (o R-14), los cuales, en algunos casos están siendo emitidas a zonas donde se concentran grandes poblaciones, como ciudades (*high population density*) y en otros casos, a zonas con poca población (*low population density*). El R-14 es particularmente un potente gas de efecto invernadero, ya que como se logra apreciar en la misma imagen, su factor de impacto (*Impact factor*) es significativamente mayor que el del dióxido de carbono fósil.

Tabla 20. *Análisis de impacto de la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA*

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, ecosystem quality, long term				140.33262	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			117.38901	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	149.91617 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	94.14735	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	22.01500 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	13.82542	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	7.61171 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	4.78015	PDF.m2.yr
Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / high population density	0.00022 kg	6280.00000 PDF.m2.yr/kg	1.37046	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			13.41778	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	13.86607 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	8.70789	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	3.28234 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	2.06131	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	3.10009 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	1.94686	PDF.m2.yr
Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / unspecified	6.25899E-5 kg	6280.00000 PDF.m2.yr/kg	0.39306	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			5.14775	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.30251 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	3.95798	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	1.09625 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.68844	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.74312 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.46668	PDF.m2.yr

De cualquier forma, al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 21), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en incineración, una gran parte de estos contaminantes están

siendo emitidos al aire en zonas con una baja densidad poblacional (75.46% de todos los impactos de la categoría de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo). Por otro lado, en la misma Tabla 21, es más claro ver que los dos contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (136.67 PDF.m2.yr) ya abarca el 97.39% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 21 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo al cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo, si sus residuos son mandados a incineración, es el dióxido de carbono fósil, el cual tiene un impacto de 134.87 PDF.m2.yr que representan el 96.11% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 21. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE A LARGO PLAZO DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Category	Sub-category	Reference unit	Carbon dioxide, fossil	Methane, tetrafluoro-, R-14	TOTAL	% Contribution to Climate change, ecosystem quality, long term
Emission to air	high population density	PDF.m2.yr	18.00	1.37	19.37	13.80%
Emission to air	low population density	PDF.m2.yr	105.89		105.89	75.46%
Emission to air	low population density, long-term	PDF.m2.yr	0.002338		0.002338	0.0017%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	PDF.m2.yr	0.0001056		0.0001056	0.0001%
Emission to air	unspecified	PDF.m2.yr	10.98	0.4252	11.41	8.13%
TOTAL			134.87	1.80	136.67	
% Contribution to Climate change, ecosystem quality, long term			96.11%	1.28%	97.39%	

Buscando las mayores fuentes de este dióxido de carbono fósil emitido al aire en zonas con baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo.

Tabla 22. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, ecosystem quality, long term				108.99460	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			87.78875	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	109.92781 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	69.03466	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	20.68559 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	12.99055	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.90559 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	4.33671	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			13.83948	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	11.45850 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	7.19594	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	10.20793 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	6.41058	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.23397 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.14693	PDF.m2.yr
photovoltaic cell production, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, U - CN-JS	261:Manufacture of electronic compon...			2.77680	PDF.m2.yr
F Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / high population density	0.00025 kg	6280.00000 PDF.m2.yr/kg	1.55512	PDF.m2.yr
F Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Emission to air / high population density	0.00012 kg	1.03000E4 PDF.m2.yr/kg	1.22168	PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			1.59373	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	2.01002 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	1.26229	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.24223 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.15212	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.23163 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.14546	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 22, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo, es la producción de obleas (o *wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, los mismos procesos finales de la producción de celdas fotovoltaicas (que según

Ecoinvent 3.8 son: limpieza, grabado de daños, grabado de texturas, recubrimiento de la cara posterior, dopaje con fósforo, grabado del cristal de fósforo, impresión de contactos eléctricos, limpieza y pruebas de calidad) y la producción de energía eléctrica que esta requiere.

Refiriéndonos específicamente a la emisión de dióxido de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles o dióxido de carbono fósil, por lo regular, su principal fuente será la producción de energía, ya sea térmica o eléctrica, como resultado de llevar a cabo estas combustiones. Las últimas etapas de producción de celdas fotovoltaicas, por sí mismas, no emiten dióxido de carbono fósil, sino que emiten otro tipo de contaminantes que contribuyen al cambio climático como tetrafluorometano (o R-14) y hexafluoruro de etano. Más bien, las emisiones de dióxido de carbono fósil de este proceso se le atribuyen, en mayor medida, a la producción de su propia demanda de electricidad y a la demanda eléctrica para la producción de la materia prima que requiere. Por otro lado, dentro de esa materia prima, se tiene a la producción de *wafers* que, además de requerir electricidad para el uso de equipos como sierras de hilo múltiple, emplean silicio grado solar y este a su vez utiliza silicio de calidad metalúrgica que, cómo se recordará, su producción involucra una reducción carbotérmica de arena de sílice utilizando coque de petróleo como combustible para generar energía térmica.

Tabla 23. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory re...	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, ecosystem quality, long term				4.22113	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and...			3.13061	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	3.17069 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	1.99119	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.92753 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.58249	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.56766 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.35649	PDF.m2.yr
F Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / unspecified	1.99797E-5 kg	6280.00000 PDF.m2.yr/kg	0.12547	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.72758	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.60241 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.37831	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.53666 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.33702	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.01230 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.00772	PDF.m2.yr
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious and...			0.28342	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.35828 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.22500	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.08511 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.05345	PDF.m2.yr

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 23, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 24. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas a largo plazo, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, ecosystem quality, long term				0.56984	PDF.m2.yr
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			0.43520	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.69300 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.43520	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.05079	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.04205 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.02641	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.03747 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.02353	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00086 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.00054	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			0.04031	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.03487 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.02190	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.02327 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.01461	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00513 kg	0.62800 PDF.m2.yr/kg	0.00322	PDF.m2.yr
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			0.01488	PDF.m2.yr
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			0.00880	PDF.m2.yr
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			0.00671	PDF.m2.yr
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			0.00664	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 24, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta la calidad de los ecosistemas es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de

energía eléctrica necesaria y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.3. Impactos al agua del mar

En la categoría de impactos al agua del mar (*Marine total*), la gráfica (Figura 18) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (33.38 PDF.m².yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (33.30 PDF.m².yr). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 0.08028 PDF.m².yr. La Figura 28 muestra la suma de las categorías acidificación de mares a largo plazo y eutrofización de mares.

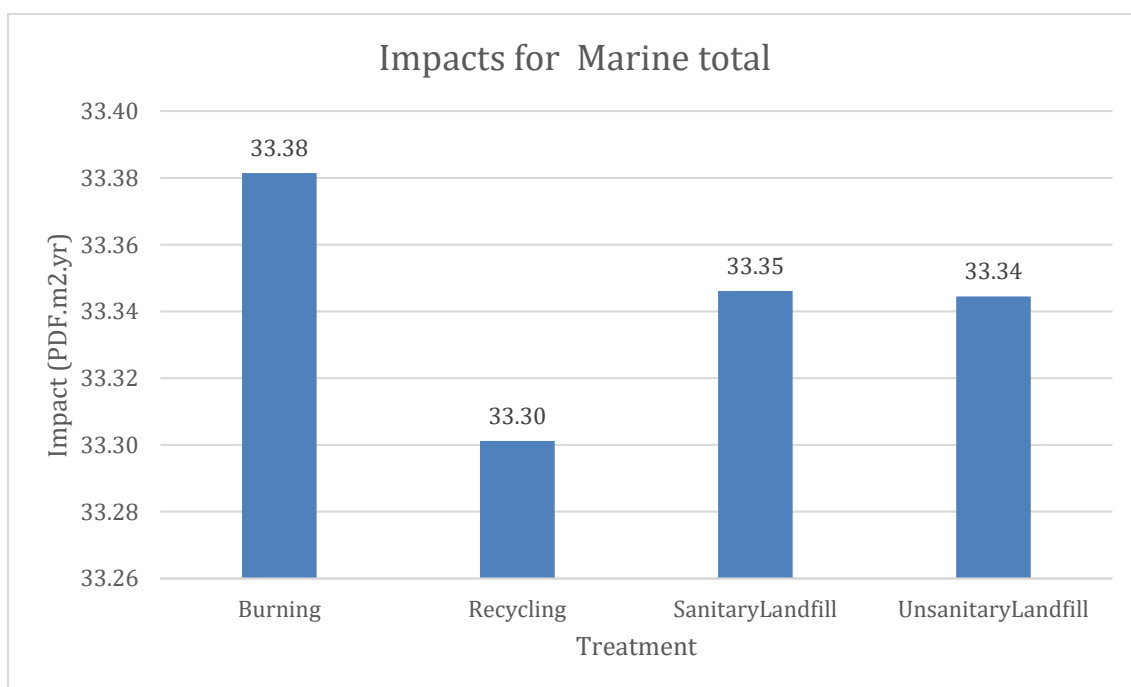


Figura 18. Gráfica comparativa para categoría de impactos al agua del mar (*Marine total*)

Al buscar el motivo (Tabla 25) por el cual la disposición a incineración está generando un gran impacto a los mares, se encontró que la categoría de acidificación de mares a largo plazo es la que presenta mayor aportación (32.91 PDF.m².yr). El aporte de la otra categoría es considerablemente más bajo en comparación con esta categoría.

Tabla 25. DETALLES SOBRE RESULTADO DE CATEGORÍA DE IMPACTO DE MARES (*MARINE TOTAL*) EN INCINERACIÓN

Agrupation	Impact category	Reference unit	Result_Burning
Marine, total	Marine acidification, long term	PDF.m ² .yr	32.91
	Marine eutrophication	PDF.m ² .yr	0.4723

Siguiendo, indagando en la categoría de acidificación de mares a largo plazo para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 26) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 83.6 % de contribución a la categoría), la producción AlMg₃ que se usa en los perfiles del

panel solar (con 9.45% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 3.77% de contribución a la categoría).

Tabla 26. Árbol de contribución a la categoría de impacto de acidificación de mares a largo plazo en el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	32.90911	PDF.m2.yr
83.60%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	27.51119	PDF.m2.yr
09.45%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	3.10963	PDF.m2.yr
03.77%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	1.24207	PDF.m2.yr
01.66%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	0.54643	PDF.m2.yr
00.63%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	0.20607	PDF.m2.yr
00.23%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	0.07661	PDF.m2.yr
00.18%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	0.05763	PDF.m2.yr
00.15%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	0.04845	PDF.m2.yr
00.14%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	0.04548	PDF.m2.yr
> 00.11%	Desc EVA-TPT_B	0.03675	PDF.m2.yr
00.05%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	0.01511	PDF.m2.yr
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	0.00466	PDF.m2.yr
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	0.00362	PDF.m2.yr
> 00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	0.00343	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	0.00145	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc laminado B	0.00046	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	4.86911E-5	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embli B	8.79786E-6	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar B	1.71442E-9	PDF.m2.yr

Como se muestra en la Tabla 27, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias que una vez emitidas pueden afectar a los mares al contribuir a su acidificación. El principal contaminante encontrado de este tipo es el dióxido de carbono fósil.

Tabla 27. Análisis de impacto de la categoría de acidificación de mares a largo plazo para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Marine acidification, long term				32.90911	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			27.51119	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	149.91617 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	22.78726	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	22.01500 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	3.34628	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	7.61171 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	1.15698	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			3.10963	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	13.86607 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	2.10764	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	3.28234 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.49892	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	3.10009 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.47121	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			1.24207	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.30251 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.95798	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	1.09625 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.16663	PDF.m2.yr
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.74312 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.11295	PDF.m2.yr

Al sumar los impactos de la sustancia anteriormente identificada (Tabla 28), se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la acidificación de los mares a largo plazo, si sus residuos son mandados a incineración, es el dióxido de carbono fósil, el cual tiene un impacto de 32.64 PDF.m2.yr que representan el 99.19 % de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 28 se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en incineración, una gran parte de este contaminante está siendo emitido al aire en zonas con baja densidad poblacional (77.88% de todos los impactos de la categoría de acidificación de mares a largo plazo).

Tabla 28. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA DE ACIDIFICACIÓN DE MARES A LARGO PLAZO DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Carbon dioxide, fossil	TOTAL	% Contribution to Marine acidification, long term
Emission to air	high population density	PDF.m2.yr	4.36	4.36	13.24%
Emission to air	low population density	PDF.m2.yr	25.63	25.63	77.88%
Emission to air	low population density, long-term	PDF.m2.yr	0.000566	66	0.0017%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	PDF.m2.yr	2.556E-05	2.556E-05	0.0001%
Emission to air	unspecified	PDF.m2.yr	2.66	2.66	8.08%
TOTAL			32.64		
% Contribution to Marine acidification, long term			99.19%		

Buscando la fuente de este dióxido de carbono fósil, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de acidificación de mares a largo plazo.

Tabla 29. Análisis de impacto de la categoría de acidificación de mares a largo plazo, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Marine acidification, long term				25.44821	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			21.04831	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	109.92781 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	16.70903	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	20.68559 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	3.14421	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.90559 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	1.04965	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			3.33507	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	11.45850 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	1.74169	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	10.20793 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	1.55161	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.23397 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.03556	PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			0.38018	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	2.01002 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.30552	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.24223 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.03682	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.23163 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.03521	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 29, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce a largo plazo y en la emisión de aluminio a aguas subterráneas (cuyo daño será más evidente a largo plazo), es la producción de obleas (o *wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la producción de energía eléctrica requerida en las etapas finales de la producción de celdas fotovoltaicas y la utilización de la ya mencionada pasta de metalización en la parte frontal de la celda.

Tabla 30. Análisis de impacto de la categoría de acidificación de mares a largo plazo, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory re...	Impact factor	Impact result	Unit
Marine acidification, long term				0.97907	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and...			0.71659	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	3.17069 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.48194	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.92753 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.14098	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.56766 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.08628	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.17533	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.60241 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.09157	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.53666 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.08157	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.01230 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00187	PDF.m2.yr
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious and...			0.06824	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.35828 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.05446	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.08511 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.01294	PDF.m2.yr

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 30, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de acidificación de mares a largo plazo y en la emisión de dióxido de carbono fósil en zonas de baja densidad poblacional, es la producción de aleación

de aluminio fundido, la producción de energía eléctrica necesaria para la producción de aluminio 6061 anodizado y la producción de magnesio por electrólisis.

Tabla 31. Análisis de impacto de la categoría de acidificación de mares a largo plazo, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Marine acidification, long term				0.13766	PDF.m2.yr
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			0.10534	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.69300 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.10534	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.01224	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.04205 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00639	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.03747 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00569	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00086 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00013	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			0.00967	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.03487 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00530	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.02327 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00354	PDF.m2.yr
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00513 kg	0.15200 PDF.m2.yr/kg	0.00078	PDF.m2.yr
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			0.00358	PDF.m2.yr
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			0.00212	PDF.m2.yr
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			0.00158	PDF.m2.yr
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			0.00158	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 31, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta la calidad de los ecosistemas es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.4. Acidificación del terreno

En la categoría de acidificación del terreno (*Terrestrial acidification*), la gráfica (Figura 19) muestra que la disposición a relleno sanitario no controlado (*Unsanitary Landfill*) es el escenario con mayor impacto (11.595 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (11.58 PDF.m2.yr). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 0.01322 PDF.m2.yr.

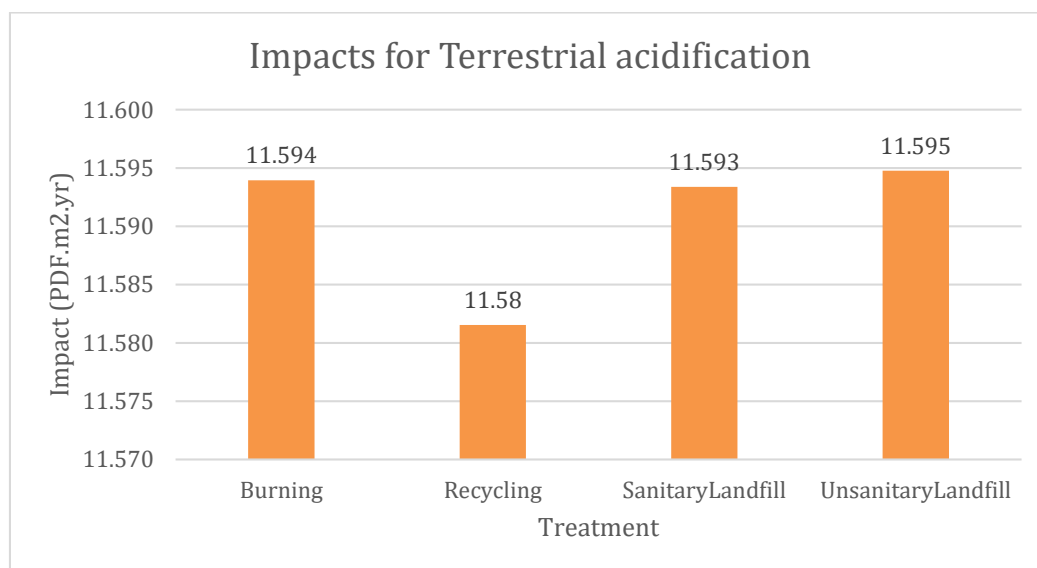


Figura 19. Gráfica comparativa para categoría de impacto Acidificación del terreno (*Terrestrial acidification*)

Indagando más a fondo en esta categoría se observa (Tabla 32) que las tres actividades en el tratamiento de residuos por medio de relleno sanitario no controlado que más están provocando la acidificación del terreno son: la producción de celdas solares (con 77.94% de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 11.27% de contribución a la categoría) y de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 6.89% de contribución a la categoría).

Tabla 32. *Árbol de contribución a la categoría de impacto de acidificación del terreno para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA*

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	USL ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	11.59477	PDF.m2.yr
77.94%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	9.03691	PDF.m2.yr
11.27%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	1.30659	PDF.m2.yr
06.89%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	0.79946	PDF.m2.yr
02.31%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	0.26776	PDF.m2.yr
00.57%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	0.06665	PDF.m2.yr
00.54%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	0.06225	PDF.m2.yr
00.15%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	0.01767	PDF.m2.yr
00.13%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	0.01481	PDF.m2.yr
00.10%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	0.01156	PDF.m2.yr
00.05%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	0.00551	PDF.m2.yr
> 00.01%	Desc EVA-TPT_UL - MX	0.00158	PDF.m2.yr
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	0.00137	PDF.m2.yr
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	0.00112	PDF.m2.yr
> 00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	0.00094	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	0.00053	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	2.24365E-5	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc laminado UL - MX	2.03411E-5	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embl UL - MX	9.82435E-7	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar UL - MX	2.38778E-10	PDF.m2.yr

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias químicas que incrementan el proceso de acidificación de los terrenos. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 33, son el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y amoníaco.

Tabla 33 *Análisis de impacto de la categoría de acidificación del terreno para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA*

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Terrestrial acidification				11.59477	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell	261:Manufacture of electronic components ...			9.03691	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.38718 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	4.97100	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.33402 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	1.79318	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.08721 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	1.11967	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.06423 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.34479	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.04925 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.26439	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.02047 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.26286	PDF.m2.yr
F Ammonia	Emission to air / unspecified	0.00545 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.17221	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3	242:Manufacture of basic precious and oth...			1.30659	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.04354 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.55898	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.04119 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.22110	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.01595 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.20482	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.01541 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.19781	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.01247 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.06695	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00678 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.03639	PDF.m2.yr
F Ammonia	Emission to air / unspecified	0.00047 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.01499	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff,	231:Manufacture of glass and glass produc...			0.79946	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.03355 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.43069	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.03095 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.16613	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00613 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.07872	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00345 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.04427	PDF.m2.yr
F Ammonia	Emission to air / high population density	0.00134 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.04217	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00398 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.02136	PDF.m2.yr

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 34), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en un relleno sanitario no controlado, una gran parte de estos contaminantes están

siendo emitidos al aire en zonas donde existen una densidad de población baja (68.32% de todos los impactos de la categoría de acidificación del terreno). Por otro lado, en la misma Tabla 34, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (11.56 PDF.m2.yr) ya abarca el 99.69% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 34 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la acidificación del terreno, si sus residuos son mandados a un relleno sanitario no controlado, es el dióxido de azufre, el cual tiene un impacto de 8.18 PDF.m2.yr que representan el 70.53% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 34. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA DE ACIDIFICACIÓN DEL TERRENO DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Category	Sub-category	Reference unit	Sulfur dioxide	Nitrogen oxides	Ammonia	TOTAL	% Contribution to Terrestrial acidification
Emission to air	high population density	PDF.m2.yr	1.46	0.3529	0.0935	1.91	16.45%
Emission to air	low population density	PDF.m2.yr	5.80	2.08	0.0444	7.92	68.32%
Emission to air	low population density, long-term	PDF.m2.yr	0.000354 4	4.982E-05	4.363E-05	0.0004478	0.0039%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	PDF.m2.yr	5.820E-07	0.0003499		0.00035047 3	0.0030%
Emission to air	unspecified	PDF.m2.yr	0.9168	0.6053	0.2067	1.73	14.91%
TOTAL			8.18	3.04	0.3446	11.56	
% Contribution to Terrestrial acidification			70.53%	26.19%	2.97%	99.69%	

Buscando la fuente de este dióxido de azufre emitido al aire en zonas de baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de acidificación del terreno.

Tabla 35. Análisis de impacto de la categoría de acidificación del terreno, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Terrestrial acidification				8.52898	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			6.75992	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.31333 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	4.02283	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.20758 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	1.11438	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06310 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.81008	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.04048 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.21730	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.03950 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.21203	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.01354 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.17390	PDF.m2.yr
F Ammonia	Emission to air / unspecified	0.00256 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.08098	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			1.15153	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06094 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.78235	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.03768 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.20229	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00754 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.09682	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01151 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.06181	PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			0.28843	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00716 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.09192	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01155 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.06201	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.01110 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.05960	PDF.m2.yr
F Ammonia	Emission to air / unspecified	0.00151 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.04761	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00085 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.01094	PDF.m2.yr
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00077 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00995	PDF.m2.yr
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00056 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00302	PDF.m2.yr
market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW	202:Manufacture of other chemical pro...			0.15539	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 35, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de acidificación del terreno y en la emisión de dióxido de azufre al aire en zonas de baja densidad poblacional, es la producción

de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la utilización de pasta de metalización en la parte frontal de la celda y la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 36. Análisis de impacto de la categoría de acidificación del terreno, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory re...	Impact factor	Impact result	Unit
Terrestrial acidification				0.40277	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and...			0.32644	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00997 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.12798	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00467 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.05998	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00444 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.05694	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01014 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.05445	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00241 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.01294	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00181 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00970	PDF.m2.yr
Ammonia	Emission to air / unspecified	0.00011 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.00336	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.06054	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00320 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.04113	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00198 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.01063	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00040 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00509	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00061 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00326	PDF.m2.yr
market for copper, cathode copper, cathode Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and...			0.00546	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00037 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00477	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	4.98867E-5 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00027	PDF.m2.yr
Ammonia	Emission to air / unspecified	7.98359E-6 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.00025	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	5.01509E-6 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	6.43885E-5	PDF.m2.yr

Si siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 36, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de acidificación del terreno y en la emisión de dióxido de azufre al aire en zonas de baja densidad poblacional, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de cátodos de cobre y la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 37. Análisis de impacto de la categoría de acidificación del terreno, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Terrestrial acidification				0.09162	PDF.m2.yr
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			0.06942	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00404 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.05187	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00327 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.01755	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			0.01091	PDF.m2.yr
Ammonia	Emission to air / high population density	0.00017 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.00526	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00018 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00232	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00016 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00210	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	8.10597E-5 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00044	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	5.90815E-5 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00032	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	4.12799E-5 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00022	PDF.m2.yr
Ammonia	Emission to air / unspecified	4.08175E-6 kg	31.58728 PDF.m2.yr/kg	0.00013	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			0.00423	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00022 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00287	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00014 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00074	PDF.m2.yr
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	2.76783E-5 kg	12.83896 PDF.m2.yr/kg	0.00036	PDF.m2.yr
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	4.22539E-5 kg	5.36848 PDF.m2.yr/kg	0.00023	PDF.m2.yr
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			0.00318	PDF.m2.yr
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			0.00165	PDF.m2.yr
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			0.00107	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 37, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta la calidad de los ecosistemas es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de energía eléctrica necesaria y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.5. Uso de suelo

En la categoría de uso de suelo (*Land total*), la gráfica (Figura 20) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (9.1076 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (9.10 PDF.m2.yr). No obstante, se puede apreciar que, entre el escenario con mayor y menor impacto, hay una diferencia de apenas 0.008372 PDF.m2.yr.

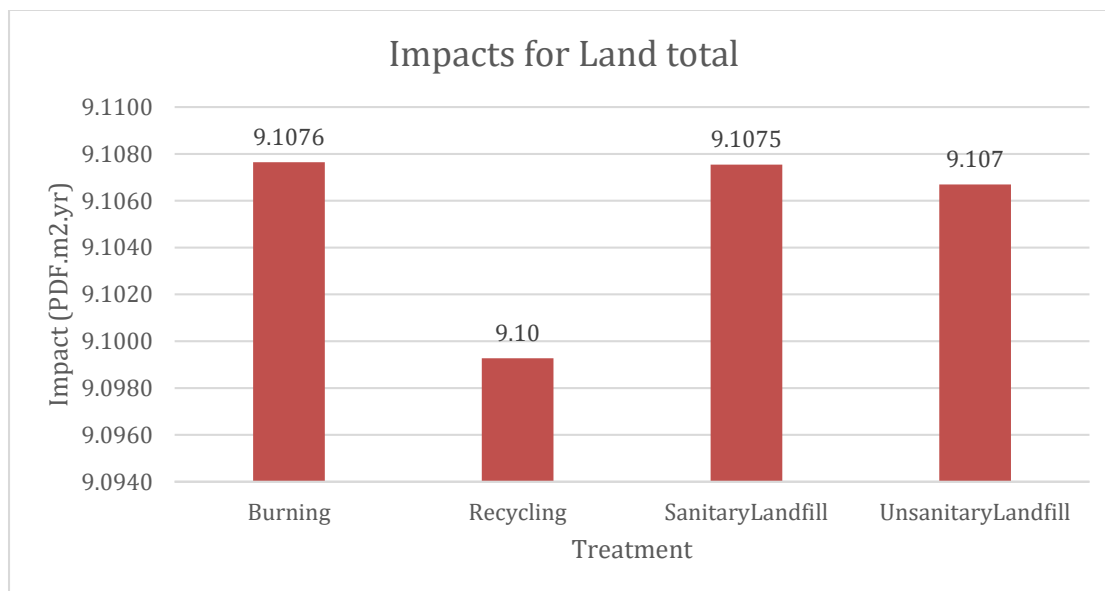


Figura 20. Gráfica comparativa para categoría de impacto Uso de suelo (*Land total*)

Al examinar más de cerca el escenario de disposición a incineración (Tabla 38) para indagar sobre el motivo por el cual está generando un gran impacto en el uso de suelo, se encontró que la categoría de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad es la que presenta mayor aportación (7.66 PDF.m2.yr).

Tabla 38. DETALLES SOBRE RESULTADO DE CATEGORÍA DE IMPACTO DE USO DE SUELO (*LAND TOTAL*) EN INCINERACIÓN

Agrupations	Impact category	Reference unit	Result_Burning
Land total	Land occupation, biodiversity	PDF.m2.yr	1.45
	Land transformation, biodiversity	PDF.m2.yr	7.66

Siguiendo, indagando en la categoría transformación de suelo que afecta a la biodiversidad para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 39) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 79.96 % de contribución a la categoría), la producción de $AlMg_3$ que se usa en los perfiles del panel solar (con 9.36% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 4.73% de contribución a la categoría).

Tabla 39. Árbol de contribución a la categoría de impacto de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad en el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category: Land transformation, biodiversity

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	7.65961	PDF.m2.yr
79.96%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	6.12443	PDF.m2.yr
09.36%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	0.71677	PDF.m2.yr
04.73%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	0.36260	PDF.m2.yr
03.18%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	0.24342	PDF.m2.yr
01.39%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	0.10625	PDF.m2.yr
00.60%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	0.04590	PDF.m2.yr
00.50%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	0.03835	PDF.m2.yr
00.11%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	0.00842	PDF.m2.yr
00.09%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	0.00667	PDF.m2.yr
00.03%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	0.00263	PDF.m2.yr
00.02%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	0.00147	PDF.m2.yr
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	0.00086	PDF.m2.yr
> 00.01%	Desc EVA-TPT_B	0.00086	PDF.m2.yr
> 00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	0.00071	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	0.00018	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc laminado B	7.99948E-5	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	1.22316E-5	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embl B	1.25646E-7	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar B	3.68326E-9	PDF.m2.yr

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas, el suelo es transformado para la posible construcción de instalaciones adecuadas para la producción de los distintos elementos que componen a los paneles fotovoltaicos. Entre lo más destacado (Tabla 40), se tiene transformaciones de suelo para extracción de minerales que se usan en la fabricación de componentes para paneles solares, creación de lagos artificiales, sitios que funcionan como vertederos, tierras cultivables (sin especificar el uso que se les da), caminos y carreteras que forman parte de las rutas de transporte de los distintos componentes y sus materiales (red de trabajo).

Tabla 40. Análisis de impacto de la categoría de transformación del suelo que afecta a la biodiversidad para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Land transformation, biodiversity				7.65961	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			6.12443	PDF.m2.yr
F Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.02303 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	3.89169	PDF.m2.yr
F Transformation, to lake, artificial	Resource / land	0.01140 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	1.92675	PDF.m2.yr
F Transformation, to dump site	Resource / land	0.00640 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	1.06209	PDF.m2.yr
F Transformation, to arable land, unspecified use	Resource / land	0.00773 m2	54.00000 PDF.m2.yr/m2	0.41717	PDF.m2.yr
F Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	0.00248 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.41175	PDF.m2.yr
F Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.01024 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-1.73045	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			0.71677	PDF.m2.yr
F Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00228 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.38497	PDF.m2.yr
F Transformation, to lake, artificial	Resource / land	0.00147 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.24778	PDF.m2.yr
F Transformation, to dump site	Resource / land	0.00102 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.16873	PDF.m2.yr
F Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	0.00021 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.03493	PDF.m2.yr
F Transformation, to dump site, residual material landfill	Resource / land	0.00019 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.03122	PDF.m2.yr
F Transformation, from dump site, residual material landfill	Resource / land	0.00019 m2	-166.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.03121	PDF.m2.yr
F Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.00095 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.16114	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			0.36260	PDF.m2.yr
F Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00270 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.45581	PDF.m2.yr
F Transformation, to forest, unspecified	Resource / land	0.00097 m2	37.00000 PDF.m2.yr/m2	0.03579	PDF.m2.yr
F Transformation, to arable land, unspecified use	Resource / land	0.00053 m2	54.00000 PDF.m2.yr/m2	0.02874	PDF.m2.yr
F Transformation, to dump site	Resource / land	9.57472E-5 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.01589	PDF.m2.yr
F Transformation, from wetland, inland (non-use)	Resource / land	0.00025 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.04250	PDF.m2.yr
F Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.00094 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.15841	PDF.m2.yr

Al sumar los impactos de cada tipo de transformación (Tabla 41), la principal modificación del suelo provocada por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo al daño de la biodiversidad, si sus residuos son mandados a incineración, es la transformación para la extracción de minerales con un impacto de 4.86 PDF.m2.yr que representan el 63.48% de toda la categoría.

Tabla 41. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA TRANSFORMACIÓN DEL SUELO QUE AFECTA LA BIODIVERSIDAD DE TIPOS DE TRANSFORMACIÓN DE SUELO PROVOCADAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS POR INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Transformation, to mineral extraction site	Transformation, to lake, artificial	Transformation, to dump site	Transformation, to traffic area, road network	Transformation, to arable land, unspecified use
Resource	land	PDF.m2.yr	4.86	2.22	1.29	0.4691	0.7290
% Contribution to Land transformation, biodiversity			63.48%	28.95%	16.88%	6.12%	9.52%

Buscando aquello que está transformando tanto el suelo para la extracción de minerales, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de transformación del suelo que afecta a la biodiversidad.

Tabla 42. Análisis de impacto de la categoría de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact r... Unit
Land transformation, biodiversity				5.27155 PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufact...			3.97574 PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.01194 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	2.01769 PDF.m2.yr
Transformation, to lake, artificial	Resource / land	0.00539 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.91155 PDF.m2.yr
Transformation, to dump site	Resource / land	0.00308 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.51163 PDF.m2.yr
Transformation, to arable land, unspecified use	Resource / land	0.00793 m2	54.00000 PDF.m2.yr/m2	0.42841 PDF.m2.yr
Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	0.00255 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.42376 PDF.m2.yr
Transformation, to dump site, residual material landfill	Resource / land	0.00091 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.15097 PDF.m2.yr
Transformation, to permanent crop	Resource / land	0.00198 m2	40.00000 PDF.m2.yr/m2	0.07929 PDF.m2.yr
Transformation, to forest, unspecified	Resource / land	0.00197 m2	37.00000 PDF.m2.yr/m2	0.07289 PDF.m2.yr
Transformation, to dump site, inert material landfill	Resource / land	0.00028 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.04615 PDF.m2.yr
Transformation, from dump site, inert material landfill	Resource / land	0.00028 m2	-166.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.04615 PDF.m2.yr
Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Resource / land	0.00374 m2	-19.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.07107 PDF.m2.yr
Transformation, from wetland, inland (non-use)	Resource / land	0.00049 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.08238 PDF.m2.yr
Transformation, from dump site, residual material landfill	Resource / land	0.00090 m2	-166.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.14888 PDF.m2.yr
Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.00199 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.33584 PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric p...			0.86048 PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00500 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.84486 PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufact...			0.19335 PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00663 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	1.12116 PDF.m2.yr
Transformation, to dump site	Resource / land	0.00044 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.07244 PDF.m2.yr
Transformation, to heterogeneous, agricultural	Resource / land	0.00118 m2	22.00000 PDF.m2.yr/m2	0.02605 PDF.m2.yr
Transformation, to lake, artificial	Resource / land	0.00015 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.02451 PDF.m2.yr
Transformation, to arable land, unspecified use	Resource / land	0.00030 m2	54.00000 PDF.m2.yr/m2	0.01640 PDF.m2.yr
Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	1.48653E-5 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00247 PDF.m2.yr
Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.00634 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-1.07117 PDF.m2.yr
market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW	202:Manufact...			0.10414 PDF.m2.yr
photovoltaic cell factory construction photovoltaic cell factory Cutoff, S - RoW	429:Construct...			0.06437 PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 42, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de transformación de suelo que afecta la biodiversidad y modifica el suelo para la extracción de minerales, es la producción de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la utilización de pasta de metalización en la parte frontal de la celda y la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 43. Análisis de impacto de la categoría de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Land transformation, biodiversity				0.23622	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufact...			0.17396	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00060 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.10111	PDF.m2.yr
Transformation, to lake, artificial	Resource / land	0.00039 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.06531	PDF.m2.yr
Transformation, to dump site	Resource / land	0.00023 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.03829	PDF.m2.yr
Transformation, to dump site, residual material landfill	Resource / land	5.33850E-5 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00886	PDF.m2.yr
Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	5.14011E-5 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00853	PDF.m2.yr
Transformation, to forest, unspecified	Resource / land	0.00013 m2	37.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00496	PDF.m2.yr
Transformation, to arable land, unspecified use	Resource / land	8.55822E-5 m2	54.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00462	PDF.m2.yr
Transformation, from dump site, residual material landfill	Resource / land	5.33635E-5 m2	-166.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.00886	PDF.m2.yr
Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	0.00029 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.04902	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric p...			0.04524	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	0.00026 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.04442	PDF.m2.yr
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufact...			0.01061	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	6.13383E-5 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.01037	PDF.m2.yr
Transformation, to dump site	Resource / land	6.69240E-7 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00011	PDF.m2.yr

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 43, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad y en la modificación del suelo para la extracción de minerales, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de energía eléctrica necesaria para la producción de aluminio 6061 anodizado y la producción de magnesio por electrólisis.

Tabla 44. Análisis de impacto de la categoría de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Land transformation, biodiversity				0.02783	PDF.m2.yr
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufact...			0.01347	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	7.80820E-5 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.01320	PDF.m2.yr
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarryin...			0.00499	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	4.20598E-5 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00711	PDF.m2.yr
Transformation, to lake, artificial	Resource / land	2.79609E-6 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00047	PDF.m2.yr
Transformation, to forest, unspecified	Resource / land	3.81602E-6 m2	37.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00014	PDF.m2.yr
Transformation, to traffic area, road network	Resource / land	6.65411E-7 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00011	PDF.m2.yr
Transformation, to dump site	Resource / land	3.07034E-7 m2	166.00000 PDF.m2.yr/m2	5.09676E-5	PDF.m2.yr
Transformation, from mineral extraction site	Resource / land	3.67582E-6 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.00062	PDF.m2.yr
Transformation, from wetland, inland (non-use)	Resource / land	1.36132E-5 m2	-169.00000 PDF.m2.yr/m2	-0.00230	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric p...			0.00316	PDF.m2.yr
Transformation, to mineral extraction site	Resource / land	1.83480E-5 m2	169.00000 PDF.m2.yr/m2	0.00310	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufact...			0.00237	PDF.m2.yr
natural gas, high pressure, import from NL natural gas, high pressure Cutoff, S - AT	493:Transport...			0.00164	PDF.m2.yr
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarryin...			0.00128	PDF.m2.yr
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construct...			0.00086	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 44, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de transformación de suelo que afecta a la biodiversidad es la producción de fuelóleo pesado y de arena de sílice, así como la producción de la energía eléctrica necesaria para el proceso.

7.6. Disponibilidad de agua

En la categoría de disponibilidad de agua (*Water availability, total*), la gráfica (Figura 21) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (0.0137775 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (0.013777 PDF.m2.yr). No obstante, se puede apreciar que los resultados de todos los escenarios son cercanos y que, entre el escenario con mayor y menor impacto, hay una diferencia de apenas 4.615E-06 PDF.m2.yr.

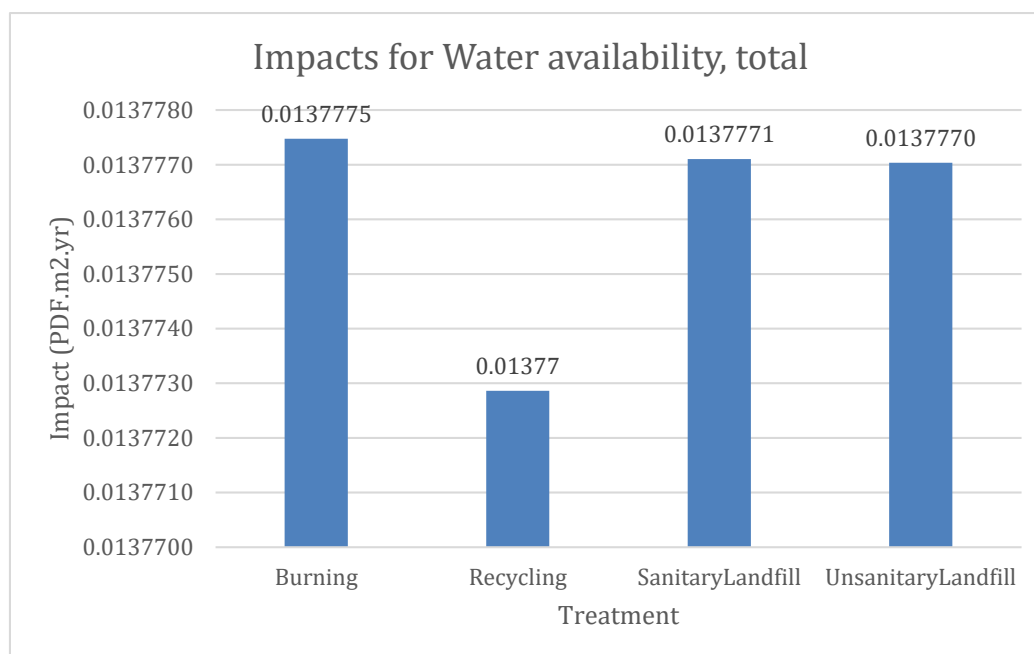


Figura 21. Gráfica comparativa para categoría de impacto Disponibilidad de agua (*Water availability, total*)

Al revisar en mayor profundidad (Tabla 45) el motivo por el cual la disposición a incineración está provocando un gran impacto en la disponibilidad de agua, se encontró que la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres es la que presenta mayor aportación (0.01291 PDF.m2.yr).

Tabla 45. DETALLES SOBRE RESULTADO DE CATEGORÍA DE IMPACTO DE DISPONIBILIDAD DE AGUA (*WATER AVAILABILITY, TOTAL*) EN INCINERACIÓN

Agrupations	Impact category	Reference unit	Result_Burning
Water availability, total	Water availability, freshwater ecosystem	PDF.m2.yr	0.0008704
	Water availability, terrestrial ecosystem	PDF.m2.yr	0.01291

Siguiendo, indagando en la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 46) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 89.12% de contribución a la categoría), a la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 4.8% de contribución a la categoría) y a la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 4.61% de contribución a la categoría).

Tabla 46. Árbol de contribución a la categoría de impacto de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category: Water availability, terrestrial ecosystem

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	0.01291	PDF.m2.yr
89.12%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	0.01150	PDF.m2.yr
04.80%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	0.00062	PDF.m2.yr
04.61%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	0.00060	PDF.m2.yr
00.87%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	0.00011	PDF.m2.yr
00.23%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	2.91829E-5	PDF.m2.yr
00.19%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	2.49829E-5	PDF.m2.yr
00.04%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	5.39575E-6	PDF.m2.yr
00.04%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	5.16611E-6	PDF.m2.yr
00.04%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	5.01987E-6	PDF.m2.yr
00.04%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	4.55174E-6	PDF.m2.yr
00.02%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	2.12394E-6	PDF.m2.yr
00.00%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	3.71099E-7	PDF.m2.yr
> 00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	2.97997E-7	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc EVA-TPT_B	2.17667E-7	PDF.m2.yr
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	1.72508E-7	PDF.m2.yr
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	5.96880E-8	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc laminado B	6.24378E-9	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embl B	4.86171E-11	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar B	2.43317E-13	PDF.m2.yr

Se debe notar que, gracias a las actividades antes mencionadas el agua disponible para los ecosistemas se ve reducida debido a su uso para la producción de distintos elementos que componen a los paneles solares. Por lo que el impacto de esta categoría, como se ve en la Tabla 47, en *IMPACTWorld+ (Continental Latin America_Damage 1.431)* se mide tomando en cuenta al agua (en este caso subterránea) como recurso natural, en la calidad óptima para desempeñar sus funciones en los ecosistemas, y que queda disponible por área una vez que ha sido satisfecha la demanda de los seres humanos y los ecosistemas acuáticos (Boulay, y otros, 2017). En otras palabras, calcula el daño potencial de privar a los ecosistemas terrestres del agua necesaria para su consumo, la cual, como se considera que sólo proviene del subsuelo, no hay más tipos de fuentes que se contemplen en esta categoría.

Tabla 47. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, terrestrial ecosystem				0.01291	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			0.01150	PDF.m2.yr
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.52762 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.01150	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			0.00062	PDF.m2.yr
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.02841 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.00062	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			0.00060	PDF.m2.yr
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.02730 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.00060	PDF.m2.yr

Buscando la razón por la que toda esta agua subterránea está siendo consumida, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres.

Tabla 48. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, terrestrial ecosystem				0.01092	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture ...			0.00715	PDF.m2.yr
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.32793 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.00715	PDF.m2.yr
water production, completely softened water, completely softened Cutoff, S - RER	360:Water collecti...			0.00344	PDF.m2.yr
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.15794 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.00344	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 48, que aquellos procesos, cuyo consumo de agua subterránea causa que haya menor disponibilidad de este recurso

para los ecosistemas terrestres, son la producción de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino y la producción de agua completamente blanda que se utiliza en el proceso.

Tabla 49. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, terrestrial ecosystem				0.00014	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture ...			0.00013	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	0.00577 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	0.00013	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric powe...			4.71846E-6	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	0.00022 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	4.71846E-6	PDF.m2.yr
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture ...			1.97106E-6	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	9.04157E-5 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	1.97106E-6	PDF.m2.yr
manganese production manganese Cutoff, S - RoW	242:Manufacture ...			1.61146E-6	PDF.m2.yr
silicon production, metallurgical grade silicon, metallurgical grade Cutoff, S - NO	242:Manufacture ...			1.55924E-6	PDF.m2.yr
chromium production chromium Cutoff, S - RER	242:Manufacture ...			1.53681E-6	PDF.m2.yr

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 49, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 50. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, terrestrial ecosystem				3.64067E-5	PDF.m2.yr
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of...			3.09018E-5	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	0.00142 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	3.09018E-5	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture ...			2.03263E-6	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	9.32400E-5 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	2.03263E-6	PDF.m2.yr
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of...			1.96959E-6	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	9.03480E-5 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	1.96959E-6	PDF.m2.yr
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction...			7.80767E-7	PDF.m2.yr
Water, well, in ground	Resource / in water	3.58150E-5 m3	0.02180 PDF.m2.yr/m3	7.80767E-7	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 50, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de disponibilidad de agua para ecosistemas terrestres es la producción de arena de sílice, la producción de cal molida envasada y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.7. Radiación ionizante, calidad de los ecosistemas

En la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas (*Ionizing radiation, ecosystem quality*), la gráfica (Figura 22) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (2.17812E-07 PDF.m2.yr), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (2.176E-07 PDF.m2.yr). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 1.709E-10 PDF.m2.yr.

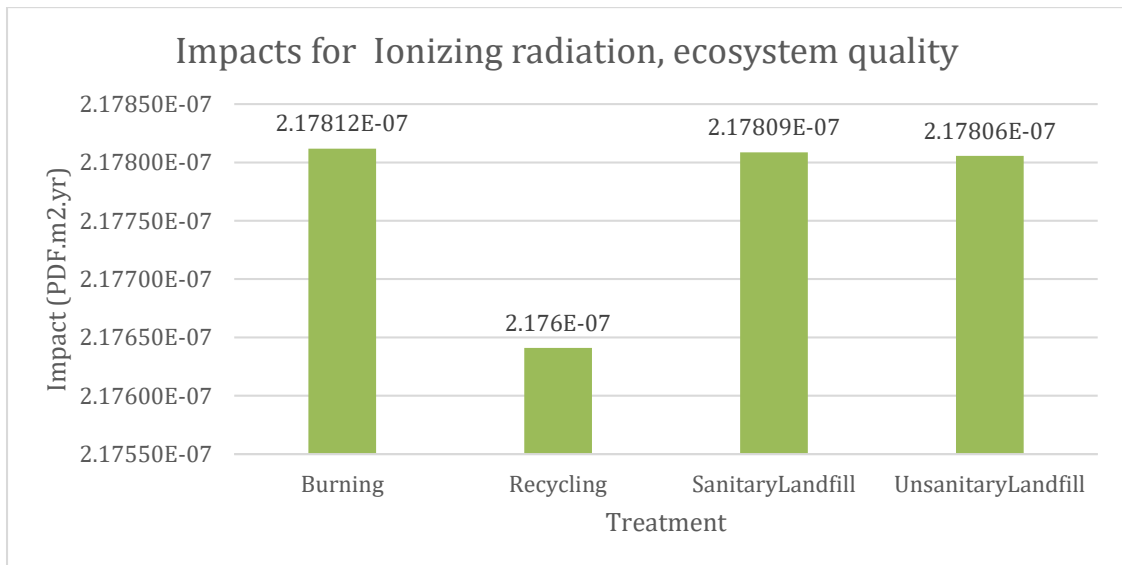


Figura 22. Gráfica comparativa para categoría de impacto Radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas (Ionizing radiation, ecosystem quality)

Siguiendo, indagando en la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 51) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 89.75% de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 5.19% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 2.18% de contribución a la categoría).

Tabla 51. Árbol de contribución a la categoría de impacto de categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category: ionizing radiation, ecosystem quality

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	2.17812E-7	PDF.m2.yr
89.75%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	1.95497E-7	PDF.m2.yr
05.19%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	1.13102E-8	PDF.m2.yr
02.18%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	4.73754E-9	PDF.m2.yr
01.78%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	3.87026E-9	PDF.m2.yr
00.47%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	1.03117E-9	PDF.m2.yr
00.25%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	5.38743E-10	PDF.m2.yr
00.21%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	4.66045E-10	PDF.m2.yr
00.10%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	2.20457E-10	PDF.m2.yr
00.03%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	6.11741E-11	PDF.m2.yr
00.01%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	2.66231E-11	PDF.m2.yr
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	1.72136E-11	PDF.m2.yr
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	1.41790E-11	PDF.m2.yr
> 00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	9.65460E-12	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc EVA-TPT_B	6.59975E-12	PDF.m2.yr
> 00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	4.30259E-12	PDF.m2.yr
> 00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	3.80267E-13	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc laminado B	3.77366E-13	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc embi B	9.17375E-16	PDF.m2.yr
> 00.00%	Desc vidrio solar B	1.66672E-17	PDF.m2.yr

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias que emiten cierto tipo de energía que en magnitudes considerables pueden afectar gravemente a los ecosistemas. Los principales contaminantes

encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 52, son el carbono-14 (o radiocarbono), hidrógeno-3 (o tritio) y antimonio-124.

Tabla 52. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Ionizing radiation, ecosystem quality				2.17812E-7	PDF.m2.yr
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			1.95497E-7	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.89952 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	1.74508E-7	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	254.23463 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	7.83043E-9	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	0.04308 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	5.47086E-9	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to water / surface water	0.00474 kBq	4.73000E-7 PDF.m2.yr/kBq	2.23999E-9	PDF.m2.yr
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			1.13102E-8	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.05342 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	1.03638E-8	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	11.53046 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	3.55138E-10	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	0.00189 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	2.40082E-10	PDF.m2.yr
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			4.73754E-9	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.02370 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	4.59796E-9	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	1.66249 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	5.12048E-11	PDF.m2.yr

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 53), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar a incineración, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire en zonas con baja densidad poblacional (89.71% de todos los impactos de la categoría de radiación ionizante que afecta a la calidad de los ecosistemas). Por otro lado, en la misma Tabla 53, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (2.120E-07 PDF.m2.yr) ya abarca el 97.32% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 53 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la radiación ionizante que afecta a la calidad de los ecosistemas, si sus residuos son mandados a incineración, es el carbono-14, el cual tiene un impacto de 1.977E-07 PDF.m2.yr que representan el 90.79% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 53. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA RADIACIÓN IONIZANTE QUE AFECTA LA CALIDAD DE LOS ECOSISTEMAS DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Carbon-14	Hydrogen-3, Tritium	Antimony-124	TOTAL	% Contribution to Ionizing radiation, ecosystem quality
Emission to air	low population density	PDF.m2.yr	1.954E-07	3.183E-11	1.041E-15	1.954E-07	89.71%
Emission to water	surface water	PDF.m2.yr	2.384E-09	8.370E-09	5.825E-09	1.658E-08	7.61%
TOTAL			1.977E-07	8.402E-09	5.825E-09	2.120E-07	
% Contribution to Ionizing radiation, ecosystem quality			90.79%	3.86%	2.67%	97.32%	

Buscando la fuente de este carbono – 14 emitido al aire en zonas de baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas.

Tabla 54. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Ionizing radiation, ecosystem quality				3.01111E-7	PDF.m2.yr
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compo...			2.79042E-7	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	1.33747 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	2.59470E-7	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	219.57262 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	6.76284E-9	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	0.02900 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	3.68259E-9	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			1.30390E-8	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.06702 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	1.30012E-8	PDF.m2.yr
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pr...			3.51423E-9	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.01633 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	3.16716E-9	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	4.32066 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	1.33076E-10	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	0.00075 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	9.53709E-11	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to water / surface water	8.27869E-5 kBq	4.73000E-7 PDF.m2.yr/kBq	3.91582E-11	PDF.m2.yr

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en Tabla 54, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas y en la emisión de carbono-14 al aire en zonas de baja densidad poblacional, es la producción de la producción de obleas (o *wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la producción de energía eléctrica requerida en las etapas finales de la producción de celdas fotovoltaicas y la utilización de la ya mencionada pasta de metalización en la parte frontal de la celda.

Tabla 55. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Ionizing radiation, ecosystem quality				2.53309E-9	PDF.m2.yr
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			1.66332E-9	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00793 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	1.53865E-9	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	1.56321 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	4.81470E-11	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	0.00027 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	3.39846E-11	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			6.85498E-10	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00352 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	6.83511E-10	PDF.m2.yr
chromium production chromium Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious an...			1.01449E-10	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00049 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	9.54058E-11	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	0.06609 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	2.03569E-12	PDF.m2.yr

Si siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 55, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas y en la emisión de carbono-14 al aire en zonas con baja densidad poblacional, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de energía eléctrica para el proceso y la producción de cromo.

Tabla 56. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas, para la producción de producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory res...	Impact factor	Impact result	Unit
Ionizing radiation, ecosystem quality				4.29041E-10	PDF.m2.yr
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum...			2.82700E-10	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00145 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	2.82185E-10	PDF.m2.yr
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate	201:Manufacture of basic chemicals, fe...			5.20574E-11	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00025 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	4.89010E-11	PDF.m2.yr
Hydrogen-3, Tritium	Emission to water / surface water	0.03696 kBq	3.08000E-11 PDF.m2.yr/kBq	1.13822E-12	PDF.m2.yr
Antimony-124	Emission to water / surface water	5.34903E-6 kBq	1.27000E-7 PDF.m2.yr/kBq	6.79326E-13	PDF.m2.yr
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, r	351:Electric power generation, transmi...			4.78556E-11	PDF.m2.yr
Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00025 kBq	1.94000E-7 PDF.m2.yr/kBq	4.77168E-11	PDF.m2.yr

Por último, en la producción de película de producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 56, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta la calidad de los ecosistemas y en la emisión de carbono-14 al aire en zonas con baja densidad poblacional, es la producción de energía eléctrica que se requiere para el proceso, la producción de fuelóleo pesado y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado

7.8. Cambio climático, salud humana

En la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana (*Climate change, human health*), la gráfica (Figura 23) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (0.000639 DALY), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (0.000637 DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 1.501E-06 DALY. La Figura # muestra solamente la categoría de impacto de cambio climático que afecta la salud humana a largo plazo.

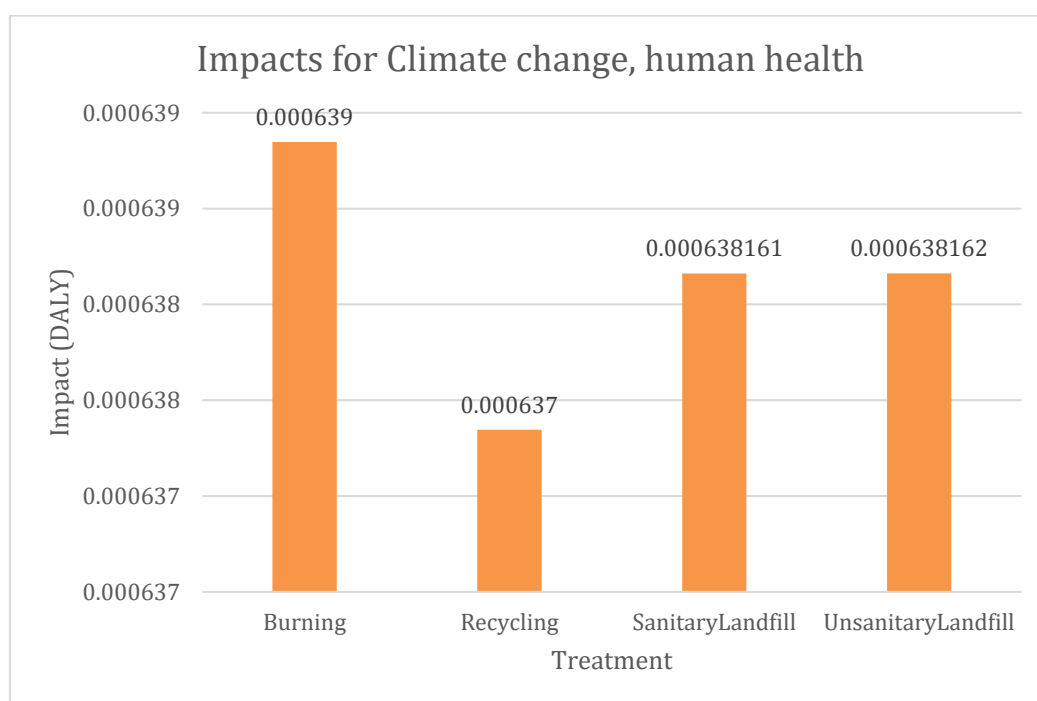


Figura 23. Gráfica comparativa para categoría de impacto Cambio climático que afecta a la salud humana (*Climate change, human health, total*)

Siguiendo, indagando en la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana en el largo plazo para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 57) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 83.65% de contribución a la categoría), la producción de $AlMg_3$ que se usa en los perfiles del panel solar (con 9.56% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 3.67% de contribución a la categoría).

Tabla 57. Árbol de contribución a la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category Climate change, human health, long term

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	0.00064	DALY
83.65%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	0.00053	DALY
09.56%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	6.10792E-5	DALY
03.67%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	2.34389E-5	DALY
01.63%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	1.04256E-5	DALY
00.61%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	3.90765E-6	DALY
00.23%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	1.46125E-6	DALY
00.17%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	1.09188E-6	DALY
00.15%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	9.29991E-7	DALY
00.13%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	8.60100E-7	DALY
> 00.11%	Desc EVA-TPT_B	6.94119E-7	DALY
00.04%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	2.86907E-7	DALY
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	8.88623E-8	DALY
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	6.87312E-8	DALY
> 00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	6.47855E-8	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	2.74715E-8	DALY
> 00.00%	Desc laminado B	8.62395E-9	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	9.60095E-10	DALY
> 00.00%	Desc embl B	1.66751E-10	DALY
> 00.00%	Desc vidrio solar B	3.24124E-14	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias químicas que una vez emitidas pueden alcanzar y afectar a la salud humana al contribuir con el cambio climático. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 58, son el dióxido de carbono fósil y el tetrafluorometano (o R-14).

Tabla 58. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, human health, long term				0.00064	DALY
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			0.00053	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	149.91617 kg	2.86000E-6 DALY/kg	0.00043	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	22.01500 kg	2.86000E-6 DALY/kg	6.29629E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	7.61171 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.17695E-5	DALY
F Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / high population density	0.00022 kg	0.02860 DALY/kg	6.24125E-6	DALY
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			6.10792E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	13.86607 kg	2.86000E-6 DALY/kg	3.96570E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	3.28234 kg	2.86000E-6 DALY/kg	9.38750E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	3.10009 kg	2.86000E-6 DALY/kg	8.86627E-6	DALY
F Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / unspecified	6.25899E-5 kg	0.02860 DALY/kg	1.79007E-6	DALY
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			2.34389E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.30251 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.80252E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	1.09625 kg	2.86000E-6 DALY/kg	3.13526E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.74312 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.12533E-6	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 59), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en incineración, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire en zonas con baja densidad poblacional (75.48% de todos los impactos de la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo). Por otro lado, en la misma Tabla 59, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (0.0006224 DALY) ya abarca el 97.43% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 59 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo al cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo, si sus residuos son mandados a incineración, es el dióxido de carbono fósil, el cual tiene un impacto de 0.0006142 DALY que representan el 96.15 % de todos los impactos de la categoría.

Tabla 59. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA DE CAMBIO CLIMÁTICO QUE AFECTA LA SALUD HUMANA DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Carbon dioxide, fossil	Methane, tetrafluoro-, R-14	TOTAL	% Contribution to Climate change, human health, long term
Emission to air	high population density	DALY	8.197E-05	6.241E-06	8.821E-05	13.81%
Emission to air	low population density	DALY	0.0004822		0.0004822	75.48%
Emission to air	low population density, long-term	DALY	1.065E-08		1.065E-08	0.0017%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	DALY	4.808E-10		4.808E-10	0.0001%
Emission to air	unspecified	DALY	5.001E-05	1.936E-06	5.194E-05	8.13%
TOTAL			0.0006142	8.178E-06	0.0006224	
% Contribution to Climate change, human health, long term			96.15%	1.28%	97.43%	

Buscando la fuente de este dióxido de carbono fósil que está siendo emitido al aire en zonas con baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo.

Tabla 60. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, human health, long term				0.00050	DALY
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			0.00040	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	109.92781 kg	2.86000E-6 DALY/kg	0.00031	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	20.68559 kg	2.86000E-6 DALY/kg	5.91608E-5	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.90559 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.97500E-5	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			6.30176E-5	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	11.45850 kg	2.86000E-6 DALY/kg	3.27713E-5	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	10.20793 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.91947E-5	DALY
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.23397 kg	2.86000E-6 DALY/kg	6.69141E-7	DALY
photovoltaic cell production, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, U - CN-JS	261:Manufacture of electronic compon...			1.26687E-5	DALY
Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / high population density	0.00025 kg	0.02860 DALY/kg	7.08222E-6	DALY
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Emission to air / high population density	0.00012 kg	0.04710 DALY/kg	5.58653E-6	DALY
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			7.25530E-6	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 60, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo y en la emisión de dióxido de carbono fósil, es la producción de obleas (o *wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, los mismos procesos finales para la producción de celdas fotovoltaicas (que aunque no emite carbono fósil, sí emiten otros contaminantes que contribuyen a la categoría y en zonas de alta densidad poblacional) y la producción de energía eléctrica que esta requiere.

Tabla 61. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, human health, long term				1.92164E-5	DALY
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			1.42514E-5	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	3.17069 kg	2.86000E-6 DALY/kg	9.06816E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population dens...	0.92753 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.65274E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.56766 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.62350E-6	DALY
F Methane, tetrafluoro-, R-14	Emission to air / unspecified	1.99797E-5 kg	0.02860 DALY/kg	5.71420E-7	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			3.31302E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population dens...	0.60241 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.72289E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.53666 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.53485E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.01230 kg	2.86000E-6 DALY/kg	3.51788E-8	DALY
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious an...			1.28998E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.35828 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.02467E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population dens...	0.08511 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.43412E-7	DALY

Seguindo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 61, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 62. Análisis de impacto de la categoría de cambio climático que afecta a la salud humana a largo plazo, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Climate change, human health, long term				2.59488E-6	DALY
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			1.98198E-6	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.69300 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.98198E-6	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage	351:Electric power generation, transmi...			2.31287E-7	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.04205 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.20277E-7	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.03747 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.07150E-7	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00086 kg	2.86000E-6 DALY/kg	2.45588E-9	DALY
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			1.83519E-7	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.03487 kg	2.86000E-6 DALY/kg	9.97199E-8	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.02327 kg	2.86000E-6 DALY/kg	6.65434E-8	DALY
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.00513 kg	2.86000E-6 DALY/kg	1.46756E-8	DALY
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			6.77498E-8	DALY
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			4.00840E-8	DALY
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			3.04856E-8	DALY
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			3.02461E-8	DALY

Por último, en la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 62, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.9. Disponibilidad de agua, salud humana

En la categoría de disponibilidad de agua que afecta a la salud humana (*Water availability, human health*), la gráfica (Figura 24) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (0.0004859 DALY), mientras que el escenario de disposición a relleno sanitario no controlado (*Recycling*) es el que menor impacto genera (0.0004856 DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 2.116E-07 DALY.

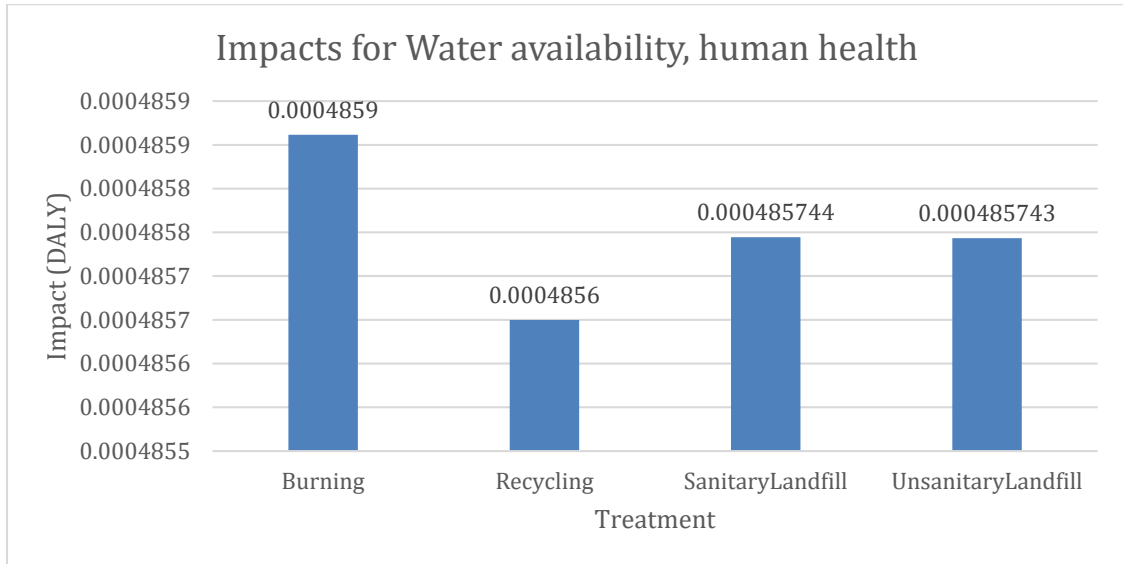


Figura 24. Gráfica comparativa para categoría de impacto Disponibilidad de agua que afecta a la salud humana (Water availability, human health)

Siguiendo, indagando en la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 63) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 96.95% de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 1.88% de contribución a la categoría) y la producción de película de fluoruro de polivinilo o Tedlar, que conforma al TPT y este, a su vez forma parte de los componentes del encapsulante de paneles solares (con 0.5% de contribución a la categoría).

Tabla 63. Árbol de contribución a la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category Water availability, human health

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	0.00049	DALY
96.95%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	0.00047	DALY
01.88%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	9.12993E-6	DALY
00.50%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	2.42742E-6	DALY
00.37%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	1.78989E-6	DALY
00.12%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	5.85734E-7	DALY
00.06%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	2.68073E-7	DALY
00.03%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	1.67574E-7	DALY
00.03%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	1.25166E-7	DALY
> 00.02%	Desc EVA-TPT_B	1.17264E-7	DALY
00.02%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	9.81673E-8	DALY
00.01%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	4.13155E-8	DALY
00.01%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	3.93923E-8	DALY
00.00%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	7.95572E-9	DALY
> 00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	7.88475E-9	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	5.64161E-9	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	1.19422E-9	DALY
> 00.00%	Desc laminado B	9.18446E-10	DALY
> 00.00%	Desc embl B	1.21843E-11	DALY
> 00.00%	Desc vidrio solar B	2.18176E-15	DALY

Se debe notar que, gracias a las actividades antes mencionadas el agua disponible para el consumo humano que no representa un peligro para la salud humana se ve reducida debido a su uso para la producción de distintos

elementos que componen a los paneles solares. Entre lo más destacado (Tabla 64), se tiene menos disponibilidad de agua apta para consumo humano en el subsuelo, ríos y lagos.

Tabla 64. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, human health				0.00049	DALY
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			0.00047	DALY
Water, river	Resource / in water	2.69324 m3	0.00017 DALY/m3	0.00045	DALY
Water, well, in ground	Resource / in water	0.52762 m3	3.49000E-5 DALY/m3 ¹	1.84141E-5	DALY
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			9.12993E-6	DALY
Water, river	Resource / in water	0.04819 m3	0.00017 DALY/m3	8.02805E-6	DALY
Water, well, in ground	Resource / in water	0.02730 m3	3.49000E-5 DALY/m3	9.52921E-7	DALY
Water, lake	Resource / in water	0.00089 m3	0.00017 DALY/m3	1.48952E-7	DALY

Al sumar los impactos de cada uno de los sitios anteriormente identificados (Tabla 65), la principal zona afectada por la manufactura de paneles solares en la que la escasez de agua apta para consumo humano será más evidente (menor disponibilidad), si sus residuos son mandados a incineración, es en ríos, con un impacto de 4.6107E-04 DALY que representan el 94.88% de toda la categoría.

Tabla 65. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA DISPONIBILIDAD DE AGUA QUE AFECTA LA SALUD HUMANA DE SITIOS PRIVADOS DE AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Water, lake	Water, river	Water, well, in ground
Resource	in water	DALY	4.232E-06	4.610E-04	2.066E-05
% Contribution to Water availability, human health			0.8709%	94.88%	4.25%

Buscando la razón por la que toda esta agua de río está siendo consumida, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de disponibilidad que afecta a la salud humana.

Tabla 66. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, human health				0.00051	DALY
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			0.00049	DALY
Water, river	Resource / in water	2.88364 m3	0.00017 DALY/m3	0.00048	DALY
Water, well, in ground	Resource / in water	0.32793 m3	3.49000E-5 DALY/m3 ¹	1.14447E-5	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmis...			7.80272E-6	DALY
Water, river	Resource / in water	0.04594 m3	0.00017 DALY/m3	7.65370E-6	DALY
Water, well, in ground	Resource / in water	0.00412 m3	3.49000E-5 DALY/m3	1.43683E-7	DALY
water production, completely softened water, completely softened Cutoff, S - RER	360:Water collection, treatment and su...			5.55232E-6	DALY
Water, well, in ground	Resource / in water	0.15794 m3	3.49000E-5 DALY/m3	5.51216E-6	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 66, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de disponibilidad de agua que afecta a la salud humana y en el agotamiento del agua adecuada para consumo humana (especialmente la proveniente de ríos), es la producción de las mencionadas obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la producción de energía eléctrica para el proceso y la producción de agua completamente blanda que se necesita para este mismo proceso.

Tabla 67. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, human health				2.65307E-6	DALY
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			1.91944E-6	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.01013 m3	0.00017 DALY/m3	1.68732E-6	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.00577 m3	3.49000E-5 DALY/m3	2.01425E-7	DALY
F Water, lake	Resource / in water	0.00018 m3	0.00017 DALY/m3	3.06936E-8	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			4.10212E-7	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.00242 m3	0.00017 DALY/m3	4.02378E-7	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.00022 m3	3.49000E-5 DALY/m3	7.55386E-9	DALY
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious an...			2.26589E-7	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.00134 m3	0.00017 DALY/m3	2.23344E-7	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	9.04157E-5 m3	3.49000E-5 DALY/m3	3.15551E-9	DALY
chromium production chromium Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious an...			3.70816E-8	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.00021 m3	0.00017 DALY/m3	3.43533E-8	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	7.04961E-5 m3	3.49000E-5 DALY/m3	2.46031E-9	DALY

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 67, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de cambio climático que afecta a la calidad de los ecosistemas, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 68. Análisis de impacto de la categoría de disponibilidad de agua que afecta la salud humana, para la producción de película de fluoruro de polivinilo o Tedlar, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Water availability, human health				1.14296E-5	DALY
titanium dioxide production, sulfate process titanium dioxide Cutoff, S - RoW	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers ...			5.83740E-6	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.02785 m3	0.00017 DALY/m3	4.64026E-6	DALY
F Water, lake	Resource / in water	0.00421 m3	0.00017 DALY/m3	7.01987E-7	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.01419 m3	3.49000E-5 DALY/m3	4.95151E-7	DALY
polyvinylfluoride production, dispersion polyvinylfluoride, dispersion Cutoff, S - US	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers ...			4.79893E-6	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.02688 m3	0.00017 DALY/m3	4.47776E-6	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.00850 m3	3.49000E-5 DALY/m3	2.96801E-7	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission an...			7.23728E-7	DALY
F Water, river	Resource / in water	0.00426 m3	0.00017 DALY/m3	7.09906E-7	DALY
F Water, well, in ground	Resource / in water	0.00038 m3	3.49000E-5 DALY/m3	1.33271E-8	DALY

Por último, en la producción de película de fluoruro de polivinil o Tedlar, se puede apreciar en la Tabla 68, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de disponibilidad de agua que afecta a la salud humana y en el consumo de agua adecuada para consumo humano, es la producción de fluoruro de polivinilo, la producción de energía eléctrica que se requiere para el proceso y la producción dióxido de titanio por proceso del sulfato.

7.10. Toxicidad humana

En la categoría de toxicidad humana (*Human toxicity total*), la gráfica (Figura 25) muestra que la disposición a relleno sanitario no controlado (*Unsanitary Landfill*) es el escenario con mayor impacto (0.00114 DALY), mientras que el escenario de disposición a incineración (*Sanitary Landfill*) es el que menor impacto genera (0.00008546 DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 0.001055DALY.

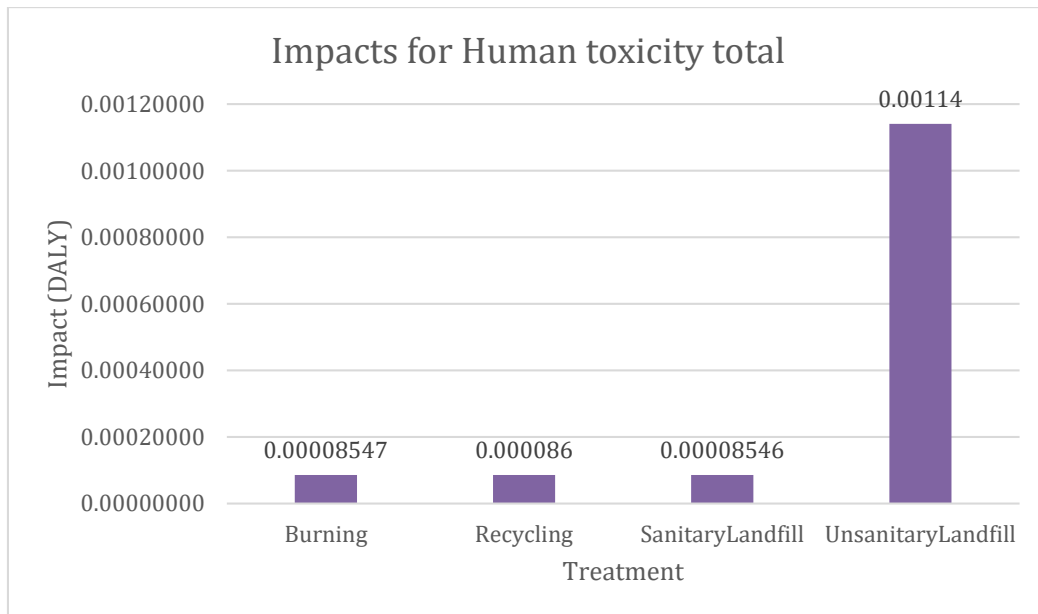


Figura 25. Gráfica comparativa para categoría de impacto Toxicidad humana (Human toxicity total)

Al revisar en mayor profundidad (Tabla 69) el motivo por el cual la disposición a relleno sanitario no controlado está provocando un gran impacto en la salud humana por la emisión de sustancias nocivas, se encontró que la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas es la que presenta mayor aportación (0.001136 DALY).

Tabla 69. DETALLES SOBRE RESULTADO DE CATEGORÍA DE IMPACTO DE TOXICIDAD HUMANA (HUMAN TOXICITY TOTAL) EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Agrupations	Impact category	Reference unit	Result_UnsanitaryLandfill
Human toxicity total	Human toxicity cancer, long term	DALY	4.527E-06
	Human toxicity non-cancer, long term	DALY	0.001136

Siguiendo, indagando en la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas para el tratamiento de residuos por relleno sanitario no controlado, se observa que (Tabla 70) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 6.85% de contribución a la categoría) la producción de $AlMg_3$ que se usa en los perfiles del panel solar (con 0.34% de contribución) y el posible descarte un laminado que no cumpla con los requisitos necesarios para continuar con las demás etapas del proceso (con 0.28% de contribución a la categoría). No obstante, como se ve en la Tabla 71, la misma actividad de manufactura de paneles solares que se lleva a cabo en nuestro país está provocando importantes impactos a la salud humana, con 92.21% de contribución a los impactos totales de la categoría, principalmente por las emisiones de plata (que proviene de los residuos de celdas fotovoltaicas descartadas) y plomo (que proviene de los residuos de tiras de conexión y cintas de interconexión) a suelos que pueden ser cultivables.

Tabla 70. Árbol de contribución a la categoría de impacto de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLC

Impact category Human toxicity non-cancer, long term

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	USL ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	0.00114	DALY
06.85%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	7.78310E-5	DALY
00.34%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	3.89507E-6	DALY
00.28%	Desc laminado UL - MX	3.17974E-6	DALY
00.08%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	9.23961E-7	DALY
00.06%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	6.39909E-7	DALY
00.05%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	5.51949E-7	DALY
00.01%	Desc EVA-TPT_UL - MX	1.68494E-7	DALY
00.01%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	1.34842E-7	DALY
00.00%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	4.85713E-8	DALY
00.00%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	2.06347E-8	DALY
00.00%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	1.98181E-8	DALY
00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	7.66719E-9	DALY
00.00%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	5.15087E-9	DALY
00.00%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	4.71519E-9	DALY
00.00%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	2.20844E-9	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	1.50310E-9	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	2.00434E-10	DALY
00.00%	Desc embil UL - MX	5.90119E-11	DALY
00.00%	Desc vidrio solar UL - MX	1.14113E-13	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias tóxicas que una vez emitidas pueden alcanzar y afectar seriamente a la salud humana. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 71, son plomo, mercurio, arsénico y plata.

Tabla 71. Análisis de impacto de la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Human toxicity non-cancer, long term				0.00114	DALY
USL ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	5_PANEL SOLAR_UnsaLandfill_31 10 2023			0.00105	DALY
F Silver	Emission to soil / agricultural	0.00668 kg	0.11760 DALY/kg	0.00079	DALY
F Lead	Emission to soil / agricultural	0.00261 kg	0.09917 DALY/kg	0.00026	DALY
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell	261:Manufacture of electronic components ...			7.78310E-5	DALY
F Silver	Emission to air / high population density	0.00068 kg	0.04184 DALY/kg	2.84814E-5	DALY
F Lead	Emission to air / high population density	0.00069 kg	0.03522 DALY/kg	2.42006E-5	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	3.95040E-6 kg	3.24465 DALY/kg	1.28176E-5	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	0.00011 kg	0.03670 DALY/kg	4.21523E-6	DALY
F Mercury	Emission to air / unspecified	5.13676E-7 kg	3.17932 DALY/kg	1.63314E-6	DALY
F Barium	Emission to water / ground water, long-term	0.01734 kg	6.30000E-5 DALY/kg	1.09214E-6	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	3.54419E-5 kg	0.02660 DALY/kg	9.42704E-7	DALY
F Lead	Emission to water / ground water, long-term	0.01193 kg	7.82000E-5 DALY/kg	9.33021E-7	DALY
F Mercury	Emission to air / high population density	2.85603E-7 kg	3.11399 DALY/kg	8.89366E-7	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 72), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en un relleno sanitario no controlado, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos a suelos para agricultura (91.85% de todos los impactos de la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas). Por otro lado, en la misma Tabla 72, es más claro ver que los cuatro contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (1.128E-03 DALY) ya abarca el 98.86% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 72 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, si sus residuos son mandados a un relleno sanitario no controlado, es la plata (que proviene de los residuos de celdas

fotovoltaicas descartadas), la cual tiene un impacto de 8.164E-04 DALY que representan el 71.57% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 72. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA TOXICIDAD HUMANA A LARGO PLAZO SIN CONSIDERAR SUSTANCIAS CANCERÍGENAS DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Category	Sub-category	Reference unit	Silver	Lead	Mercury	Arsenic	TOTAL	% Contribution to Human toxicity non-cancer, long term
Emission to air	high population density	DALY	2.848E-05	2.432E-05	1.222E-06	5.292E-08	5.402E-05	4.74%
Emission to air	low population density	DALY	4.254E-11	5.850E-06	1.467E-05	1.229E-06	2.052E-05	1.80%
Emission to air	low population density, long-term	DALY	4.633E-09	2.280E-07	9.537E-08	8.407E-08	3.280E-07	0.0288%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	DALY		3.960E-11	1.223E-14		3.961E-11	0.0000%
Emission to air	unspecified	DALY	6.736E-12	9.538E-07	2.531E-06	3.439E-08	3.485E-06	0.3055%
Emission to soil	agricultural	DALY	7.879E-04	2.597E-04	4.711E-08	4.069E-09	1.048E-03	91.85%
Emission to soil	forestry	DALY		3.191E-12			3.191E-12	0.0000%
Emission to soil	industrial	DALY	3.443E-12	1.626E-09	1.417E-09	8.510E-09	3.046E-09	0.0003%
Emission to soil	unspecified	DALY	4.625E-11	1.884E-10	3.582E-10	1.633E-08	5.929E-10	0.0001%
Emission to water	ground water	DALY		2.429E-10	9.328E-10		1.176E-09	0.0001%
Emission to water	ground water, long-term	DALY		1.093E-06	4.857E-07		1.579E-06	0.1384%
Emission to water	ocean	DALY		1.981E-24			1.981E-24	0.0000%
Emission to water	surface water	DALY		3.725E-09	6.740E-08		7.113E-08	0.0062%
Emission to water	unspecified	DALY		2.010E-09	1.583E-09		3.593E-09	0.0003%
TOTAL			8.164E-04	2.921E-04	1.913E-05	1.376E-06	1.128E-03	
% Contribution to Human toxicity non-cancer, long term			71.57%	25.61%	1.68%	0.1207%	98.86%	

Buscando la fuente de esta plata emitida a suelos para agricultura, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas.

Tabla 73. Análisis de impacto de la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Human toxicity non-cancer, long term				8.36242E-5	DALY
market for photovoltaic cell production, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, U - CN-JS	261:Manufacture of electronic compon...			5.95263E-5	DALY
F Silver	Emission to air / high population density	0.00077 kg	0.04184 DALY/kg	3.23191E-5	DALY
F Lead	Emission to air / high population density	0.00077 kg	0.03522 DALY/kg	2.72072E-5	DALY
market for single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			1.81197E-5	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	3.03236E-6 kg	3.24465 DALY/kg	9.83893E-6	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	7.08287E-5 kg	0.03670 DALY/kg	2.59919E-6	DALY
F Mercury	Emission to air / unspecified	4.99133E-7 kg	3.17932 DALY/kg	1.58690E-6	DALY
F Mercury	Emission to air / high population density	3.00429E-7 kg	3.11399 DALY/kg	9.35535E-7	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	2.45707E-5 kg	0.02660 DALY/kg	6.53545E-7	DALY
F Barium	Emission to water / ground water, long...	0.00431 kg	6.30000E-5 DALY/kg	2.71822E-7	DALY
F Mercury	Emission to water / ground water, long...	2.45578E-5 kg	0.01027 DALY/kg	2.52187E-7	DALY
F Lead	Emission to air / low population densit...	5.46112E-6 kg	0.04320 DALY/kg	2.35921E-7	DALY
F Lead	Emission to air / unspecified	6.44031E-6 kg	0.03596 DALY/kg	2.31579E-7	DALY
F Cadmium	Emission to air / low population density	7.07397E-6 kg	0.03216 DALY/kg	2.27511E-7	DALY
F Lead	Emission to air / high population density	5.21683E-6 kg	0.03522 DALY/kg	1.83730E-7	DALY
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			2.84713E-6	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	1.75773E-5 kg	0.03670 DALY/kg	6.45032E-7	DALY
F Lead	Emission to water / ground water, long...	0.00774 kg	7.82000E-5 DALY/kg	6.05629E-7	DALY
F Barium	Emission to water / ground water, long...	0.00939 kg	6.30000E-5 DALY/kg	5.91846E-7	DALY
F Lead	Emission to air / unspecified	6.73479E-6 kg	0.03596 DALY/kg	2.42168E-7	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	5.78733E-8 kg	3.24465 DALY/kg	1.87778E-7	DALY
F Mercury	Emission to water / ground water, long...	1.44882E-5 kg	0.01027 DALY/kg	1.48782E-7	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	3.90186E-6 kg	0.02660 DALY/kg	1.03784E-7	DALY
F Cadmium, ion	Emission to water / ground water, long...	0.00015 kg	0.00060 DALY/kg	9.28122E-8	DALY
F Silver, ion	Emission to water / ground water, long...	0.00033 kg	0.00014 DALY/kg	4.65554E-8	DALY
F Cadmium	Emission to air / low population density	1.34771E-6 kg	0.03216 DALY/kg	4.33447E-8	DALY
F Mercury	Emission to air / unspecified	1.07532E-8 kg	3.17932 DALY/kg	3.41879E-8	DALY
F Zinc, ion	Emission to water / ground water, long...	0.00891 kg	3.82000E-6 DALY/kg	3.40407E-8	DALY
market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW	202:Manufacture of other chemical pro...			1.53513E-6	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 73, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, es la producción de las mismas celdas fotovoltaicas en sus últimas etapas, la producción de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino y el uso de una pasta de metalización en la parte frontal de la celda.

Tabla 74. Análisis de impacto de la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Human toxicity non-cancer, long term				1.12647E-6	DALY
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			9.51150E-7	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	9.24935E-8 kg	3.24465 DALY/kg	3.00109E-7	DALY
F Mercury	Emission to air / unspecified	7.09261E-8 kg	3.17932 DALY/kg	2.25497E-7	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	3.91584E-6 kg	0.03670 DALY/kg	1.43699E-7	DALY
F Lead	Emission to air / unspecified	2.32404E-6 kg	0.03596 DALY/kg	8.35673E-8	DALY
F Mercury	Emission to air / high population dens...	2.21167E-8 kg	3.11399 DALY/kg	6.88712E-8	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	9.56207E-7 kg	0.02660 DALY/kg	2.54338E-8	DALY
F Lead	Emission to water / ground water, lon...	0.00029 kg	7.82000E-5 DALY/kg	2.26264E-8	DALY
F Lead	Emission to air / high population dens...	6.33356E-7 kg	0.03522 DALY/kg	2.23060E-8	DALY
F Barium	Emission to water / ground water, lon...	0.00018 kg	6.30000E-5 DALY/kg	1.14808E-8	DALY
market for copper, cathode copper, cathode Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			8.33873E-8	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	1.41860E-6 kg	0.03670 DALY/kg	5.20583E-8	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	5.58508E-7 kg	0.02660 DALY/kg	1.48555E-8	DALY
F Cadmium	Emission to air / low population density	1.95446E-7 kg	0.03216 DALY/kg	6.28589E-9	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	1.22825E-9 kg	3.24465 DALY/kg	3.98522E-9	DALY
F Lead	Emission to water / ground water, lon...	2.67927E-5 kg	7.82000E-5 DALY/kg	2.09519E-9	DALY
F Barium	Emission to water / ground water, lon...	2.82589E-5 kg	6.30000E-5 DALY/kg	1.78031E-9	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			3.16187E-8	DALY
F Lead	Emission to air / high population dens...	2.67999E-7 kg	0.03522 DALY/kg	9.43857E-9	DALY
F Mercury	Emission to air / low population density	2.51398E-9 kg	3.24465 DALY/kg	8.15698E-9	DALY
F Mercury	Emission to air / high population dens...	1.51701E-9 kg	3.11399 DALY/kg	4.72395E-9	DALY
F Lead	Emission to air / low population density	7.61205E-8 kg	0.03670 DALY/kg	2.79338E-9	DALY
F Arsenic	Emission to air / high population dens...	5.28852E-8 kg	0.02553 DALY/kg	1.35019E-9	DALY
F Mercury	Emission to air / unspecified	3.17395E-10 kg	3.17932 DALY/kg	1.00910E-9	DALY
F Cadmium	Emission to air / high population dens...	2.59663E-8 kg	0.03087 DALY/kg	8.01669E-10	DALY
F Arsenic	Emission to air / low population density	2.88646E-8 kg	0.02660 DALY/kg	7.67757E-10	DALY
F Vanadium	Emission to air / high population dens...	7.60284E-6 kg	8.22000E-5 DALY/kg	6.24953E-10	DALY
F Barium	Emission to water / surface water	7.66984E-6 kg	6.30000E-5 DALY/kg	4.83200E-10	DALY
F Cadmium	Emission to air / low population density	1.15495E-8 kg	0.03216 DALY/kg	3.71453E-10	DALY
cast iron production cast iron Cutoff, S - RER	241:Manufacture of basic iron and ste...			2.95337E-8	DALY

Si siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 74, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de toxicidad humana a largo plazo sin

considerar sustancias cancerígenas, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de cátodos de cobre y la producción de la energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 75. Análisis de impacto de la categoría de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, para el tratamiento por relleno sanitario no controlado de un descarte de laminado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Human toxicity non-cancer, long term				0.00182	DALY
Desc laminado UL - MX	5_PANEL SOLAR_UnsaLandfill_31 ...			0.00181	DALY
Silver	Emission to soil / agricultural	0.01248 kg	0.11760 DALY/kg	0.00147	DALY
Lead	Emission to soil / agricultural	0.00340 kg	0.09917 DALY/kg	0.00034	DALY
Copper	Emission to soil / agricultural	0.05560 kg	0.00015 DALY/kg	8.06632E-6	DALY
treatment of waste plastic, mixture, unsanitary landfill, hyperarid ir	382:Waste treatment and disposal...			2.20584E-6	DALY
treatment of waste glass, unsanitary landfill, hyperarid ir	382:Waste treatment and disposal...			1.35792E-6	DALY
treatment of waste polyethylene terephthalate, unsanitary landfill, hyperarid ir	382:Waste treatment and disposal...			7.98735E-9	DALY

Por último, al tener en cuenta la posibilidad de llevar un laminado que ha sido descartado por no cumplir con los requisitos necesarios a un relleno sanitario no controlado, se puede apreciar en la Tabla 75, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de toxicidad humana a largo plazo sin considerar sustancias cancerígenas, es principalmente por la emisión a suelos para agricultura de sustancias (como plata, plomo y cobre) que se emplean como materias primas de algunos componentes de los paneles fotovoltaicos, y que al ser descartado un laminado pasan a ser residuos. Se menciona especialmente los residuos de celdas fotovoltaicas, las tiras de conexión y las cintas de conexión, ya que contienen cantidades importantes de las sustancias antes mencionadas. Llama la atención que al considerar, según la información recolectada durante las visitas, que la frecuencia con la que se descarta un laminado por lo regular es de uno cada dos meses, su repercusión a la salud humana haya sido así de importante. Se piensa que una situación similar se podría presentar al llevar un panel fotovoltaico completo a un relleno sanitario no controlado después de su vida útil o que haya sufrido daños. Más adelante se puede apreciar que el tratamiento por relleno sanitario no controlado para EVA, vidrio templado de bajo contenido de hierro y de PET empleado como componente del encapsulante TPT, también tiene impactos en la categoría que se está revisando, en ese orden de importancia, aunque en menor magnitud con respecto al posible descarte de un laminado.

7.11. Formación de partículas

En la categoría de formación de partículas (*Particulate matter formation*), la gráfica (Figura 26) muestra que la disposición a relleno sanitario no controlado (*Unsanitary Landfill*) es el escenario con mayor impacto (0.0001473 DALY), mientras que el escenario de disposición a relleno sanitario (*Sanitary Landfill*) es el que menor impacto genera (0.000144619 DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 2.638E-06 DALY.

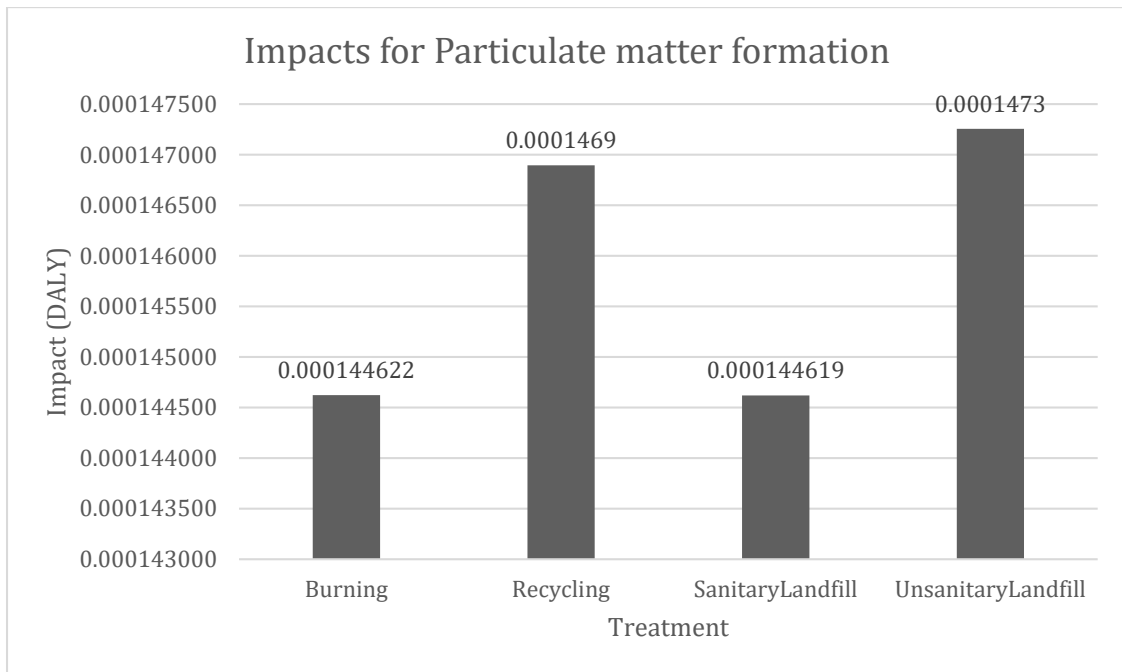


Figura 26. Gráfica comparativa para categoría de impacto Formación de partículas (Particulate matter formation)

Siguiendo, indagando en la categoría de formación de partículas para el tratamiento de residuos por relleno sanitario no controlado, se observa que (Tabla 76) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 74.53% de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 16.07% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 4.48% de contribución a la categoría).

Tabla 76. Árbol de contribución a la categoría de impacto de formación de partículas para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA

Impact category

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	USL ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	0.00015	DALY
74.53%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	0.00011	DALY
16.07%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	2.36691E-5	DALY
04.48%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	6.59216E-6	DALY
01.63%	Desc EVA-TPT_UL - MX	2.40404E-6	DALY
01.42%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	2.09762E-6	DALY
00.96%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	1.40960E-6	DALY
00.38%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	5.65902E-7	DALY
00.16%	Desc laminado UL - MX	2.34270E-7	DALY
00.11%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	1.68404E-7	DALY
00.10%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	1.47382E-7	DALY
00.07%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	1.08292E-7	DALY
00.04%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	5.72402E-8	DALY
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	1.88695E-8	DALY
00.01%	Reciclaje aluminio R - MX	1.16599E-8	DALY
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	1.06890E-8	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	4.98879E-9	DALY
00.00%	Desc embi UL - MX	1.74534E-9	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	2.44771E-10	DALY
00.00%	Desc vidrio solar UL - MX	1.01944E-11	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se forman partículas que a futuro pueden causar daños al

a salud tanto a humana como de otros seres vivos. Las principales formaciones encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 77, son partículas menores a 2.5 um, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

Tabla 77. Análisis de impacto de la categoría de formación de partículas para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de relleno sanitario no controlado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Particulate matter formation				0.00015	DALY
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell	261:Manufacture of electronic components ...			0.00011	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.18524 kg	0.00020 DALY/kg	3.70482E-5	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.02128 kg	0.00120 DALY/kg	2.55408E-5	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.38718 kg	6.20000E-5 DALY/kg	2.40052E-5	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00629 kg	0.00120 DALY/kg	7.54293E-6	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.08721 kg	7.70000E-5 DALY/kg	6.71510E-6	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.33402 kg	1.30000E-5 DALY/kg	4.34228E-6	DALY
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3	242:Manufacture of basic precious and oth...			2.36691E-5	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00905 kg	0.00120 DALY/kg	1.08641E-5	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.00361 kg	0.00120 DALY/kg	4.33139E-6	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.04354 kg	6.20000E-5 DALY/kg	2.69933E-6	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.01281 kg	0.00020 DALY/kg	2.56137E-6	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.01595 kg	7.70000E-5 DALY/kg	1.22839E-6	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.01541 kg	6.90000E-5 DALY/kg	1.06308E-6	DALY
market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff,	231:Manufacture of glass and glass produc...			6.59216E-6	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.03355 kg	6.90000E-5 DALY/kg	2.31463E-6	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00180 kg	0.00120 DALY/kg	2.16225E-6	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.00038 kg	0.00120 DALY/kg	4.57725E-7	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.03095 kg	1.40000E-5 DALY/kg	4.33243E-7	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00613 kg	6.20000E-5 DALY/kg	3.80145E-7	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00345 kg	7.70000E-5 DALY/kg	2.65483E-7	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.00127 kg	0.00020 DALY/kg	2.54607E-7	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las partículas anteriormente identificadas (Tabla 78), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en un relleno sanitario no controlado, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire en zonas con baja densidad poblacional (50.645% de todos los impactos de la categoría de formación de partículas). Por otro lado, en la misma Tabla 78, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (1.458E-04 DALY) ya abarca el 99.04% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 78 se puede decir que la mayor formación provocada por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la formación de partículas, si sus residuos son mandados a un relleno sanitario no controlado, son las partículas menores a 2.5 um, las cuales tienen un impacto de 9.648E-05 DALY que representan el 65.52% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 78. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA FORMACIÓN DE PARTÍCULAS DE FORMACIONES PROVOCADAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN RELLENO SANITARIO NO CONTROLADO

Category	Sub-category	Reference unit	Particulates, < 2.5 um	Nitrogen oxides	Sulfur dioxide	TOTAL	% Contribution to Particulate matter formation
Emission to air	high population density	DALY	3.096E-05	1.052E-06	8.759E-06	4.077E-05	27.68%
Emission to air	low population density	DALY	4.154E-05	5.032E-06	2.800E-05	7.458E-05	50.64%
Emission to air	low population density, long-term	DALY	3.108E-06	1.299E-10	1.905E-09	3.110E-06	2.11%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	DALY	1.024E-11	9.125E-10	3.128E-12	9.258E-10	0.0006%
Emission to air	unspecified	DALY	2.088E-05	1.578E-06	4.927E-06	2.738E-05	18.60%
TOTAL			9.648E-05	7.663E-06	4.169E-05	1.458E-04	
% Contribution to Particulate matter formation			65.52%	5.20%	28.31%	99.04%	

Buscando la fuente de estas partículas menores a 2.5 um emitidas al aire en zonas con baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de formación de partículas.

Tabla 79. Análisis de impacto de la categoría de formación de partículas para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Particulate matter formation				8.19936E-5	DALY
P single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic compon...			6.58784E-5	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.31333 kg	6.20000E-5 DALY/kg	1.94265E-5	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.09104 kg	0.00020 DALY/kg	1.82076E-5	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.00847 kg	0.00120 DALY/kg	1.01642E-5	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00581 kg	0.00120 DALY/kg	6.97630E-6	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06310 kg	7.70000E-5 DALY/kg	4.85838E-6	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.20758 kg	1.30000E-5 DALY/kg	2.69852E-6	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.01354 kg	6.90000E-5 DALY/kg	9.34585E-7	DALY
P electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			7.76988E-6	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06094 kg	7.70000E-5 DALY/kg	4.69204E-6	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.00134 kg	0.00120 DALY/kg	1.60801E-6	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.03768 kg	1.60000E-5 DALY/kg	6.02885E-7	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00754 kg	6.20000E-5 DALY/kg	4.67566E-7	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01151 kg	1.30000E-5 DALY/kg	1.49666E-7	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.00069 kg	0.00020 DALY/kg	1.37492E-7	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	6.63593E-5 kg	0.00120 DALY/kg	7.96311E-8	DALY
P photovoltaic cell production, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, U - CN-JS	261:Manufacture of electronic compon...			3.19604E-6	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	0.00266 kg	0.00120 DALY/kg	3.19524E-6	DALY
P market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical pro...			2.28115E-6	DALY
P market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW	202:Manufacture of other chemical pro...			1.22920E-6	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 79, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de formación de partículas, es la producción de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la producción de las mismas celdas fotovoltaicas en las últimas etapas de su proceso y la producción de energía eléctrica necesaria para este proceso.

Tabla 80. Análisis de impacto de la categoría de formación de partículas, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Particulate matter formation				4.04299E-6	DALY
P market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious an...			3.50891E-6	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population dens...	0.00090 kg	0.00120 DALY/kg	1.07517E-6	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00997 kg	6.20000E-5 DALY/kg	6.18042E-7	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	0.00236 kg	0.00020 DALY/kg	4.71135E-7	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00039 kg	0.00120 DALY/kg	4.65587E-7	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population dens...	0.00444 kg	7.70000E-5 DALY/kg	3.41501E-7	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00467 kg	6.90000E-5 DALY/kg	3.22372E-7	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01014 kg	1.30000E-5 DALY/kg	1.31845E-7	DALY
P electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmi...			4.08486E-7	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population dens...	0.00320 kg	7.70000E-5 DALY/kg	2.46675E-7	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population dens...	7.04484E-5 kg	0.00120 DALY/kg	8.45381E-8	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population dens...	0.00198 kg	1.60000E-5 DALY/kg	3.16955E-8	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00040 kg	6.20000E-5 DALY/kg	2.45813E-8	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00061 kg	1.30000E-5 DALY/kg	7.86837E-9	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	3.61419E-5 kg	0.00020 DALY/kg	7.22839E-9	DALY
F Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	3.48871E-6 kg	0.00120 DALY/kg	4.18645E-9	DALY

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 80, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de formación de partículas, es la producción de aleación de aluminio fundido y la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 81. Análisis de impacto de la categoría de formación de partículas, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Particulate matter formation				7.01948E-7	DALY
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			5.45340E-7	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00404 kg	6.90000E-5 DALY/kg	2.78760E-7	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	0.00018 kg	0.00120 DALY/kg	2.20800E-7	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00327 kg	1.40000E-5 DALY/kg	4.57800E-8	DALY
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			6.96163E-8	DALY
Ammonia	Emission to air / high population density	0.00017 kg	0.00013 DALY/kg	2.16375E-8	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00018 kg	7.70000E-5 DALY/kg	1.39420E-8	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	9.71754E-6 kg	0.00120 DALY/kg	1.16610E-8	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00016 kg	6.20000E-5 DALY/kg	1.01651E-8	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	2.38235E-5 kg	0.00020 DALY/kg	4.76471E-9	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	2.26542E-6 kg	0.00120 DALY/kg	2.71850E-9	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	8.10597E-5 kg	1.60000E-5 DALY/kg	1.29696E-9	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population densit...	7.94653E-7 kg	0.00120 DALY/kg	9.53583E-10	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	5.90815E-5 kg	1.30000E-5 DALY/kg	7.68060E-10	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage	351:Electric power generation, transmis...			2.85169E-8	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00022 kg	7.70000E-5 DALY/kg	1.72207E-8	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	4.91810E-6 kg	0.00120 DALY/kg	5.90171E-9	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00014 kg	1.60000E-5 DALY/kg	2.21270E-9	DALY
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	2.76783E-5 kg	6.20000E-5 DALY/kg	1.71606E-9	DALY
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	4.22539E-5 kg	1.30000E-5 DALY/kg	5.49301E-10	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	2.52312E-6 kg	0.00020 DALY/kg	5.04623E-10	DALY
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	2.43551E-7 kg	0.00120 DALY/kg	2.92261E-10	DALY
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			1.97820E-8	DALY
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			1.39499E-8	DALY
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			1.13781E-8	DALY
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			1.05416E-8	DALY

Por último, en la producción de soldadura de vidrio de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 81, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de formación de partículas es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.12. Radiación ionizante, salud humana

En la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana (*Ionizing radiation, human health*) la gráfica (Figura 27) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (5.28893E-07 DALY), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (5.285E-07 DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 3.589E-10 DALY.

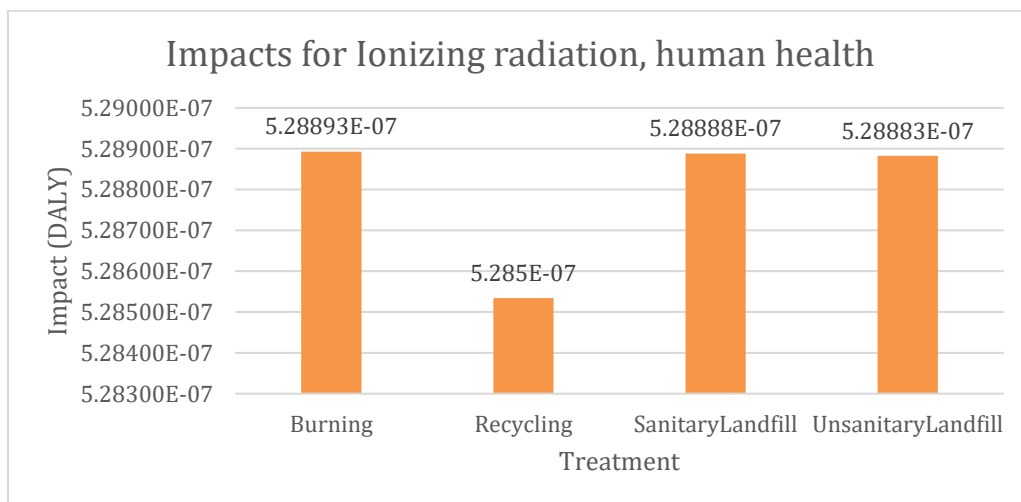


Figura 27. Gráfica comparativa para categoría de impacto Radiación ionizante que afecta la salud humana (*Ionizing radiation, human health*)

Siguiendo, indagando en la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana para el tratamiento de residuos por relleno sanitario no controlado, se observa que (Tabla 82) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 90.55 % de contribución a la categoría), la producción de AlMg₃ que se usa en los perfiles del panel solar (con 5.03% de contribución a la categoría) y la producción de película de fluoruro de polivinilo o Tedlar, que conforma al TPT y este, a su vez forma parte de los componentes del encapsulante de paneles fotovoltaicos (con 1.96% de contribución a la categoría).

Tabla 82. Árbol de contribución a la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta la salud humana para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	5.28893E-7	DALY
90.55%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	4.78930E-7	DALY
05.03%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	2.66221E-8	DALY
01.96%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	1.03492E-8	DALY
01.43%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	7.56113E-9	DALY
00.49%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	2.56646E-9	DALY
00.23%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	1.22856E-9	DALY
00.17%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	8.84443E-10	DALY
00.09%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	4.66865E-10	DALY
00.03%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	1.33834E-10	DALY
00.01%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	4.49989E-11	DALY
00.01%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	3.97246E-11	DALY
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	2.70859E-11	DALY
> 00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	1.72255E-11	DALY
> 00.00%	Desc EVA-TPT_B	1.05688E-11	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	9.16195E-12	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	9.19739E-13	DALY
> 00.00%	Desc laminado B	4.85770E-13	DALY
> 00.00%	Desc embl B	1.48981E-15	DALY
> 00.00%	Desc vidrio solar B	2.08829E-17	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias que emiten cierto tipo de energía que en magnitudes considerables pueden afectar gravemente a la salud humana. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 83, son el radón-222 y carbono-14

Tabla 83. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Human toxicity non-cancer, short term				5.05922E-5	DALY
Marine acidification, long term				32.90911	PDF.m2.yr
Land transformation, biodiversity				7.65961	PDF.m2.yr
Climate change, ecosystem quality, short term				43.82851	PDF.m2.yr
Photochemical oxidant formation				3.43196E-8	DALY
Human toxicity cancer, short term				5.92396E-5	DALY
Ozone layer depletion				6.96304E-8	DALY
Climate change, human health, short term				0.00020	DALY
ionizing radiation, human health				5.28893E-7	DALY
market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			4.78930E-7	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long...	1.16948E4 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	2.79507E-7	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.89952 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.88900E-7	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	327.52050 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	7.82774E-9	DALY
market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other ...			2.66221E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long...	619.39032 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	1.48034E-8	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.05342 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.12185E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	17.46726 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	4.17467E-10	DALY
market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:...			1.03492E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long...	259.68886 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	6.20656E-9	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.01867 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	3.92116E-9	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	7.26064 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	1.73529E-10	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 84), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en incineración, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire, en zonas con baja densidad poblacional y su daño será más evidente en el largo plazo (57.85% de todos los

impactos de la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana). Por otro lado, en la misma Tabla 84, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (5.260E-07 DALY) ya abarca el 99.46% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 84 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la radiación ionizante que afecta a la salud, si sus residuos son mandados a incineración es el radón-222, el cual tiene un impacto de 3.146E-07 DALY que representan el 59.48% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 84. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA RADIACIÓN IONIZANTE QUE AFECTA LA SALUD HUMANA DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Radon-222	Carbon-14	TOTAL	% Contribution to ionizing radiation, human health
Emission to air	high population density	DALY	1.750E-13		1.750E-13	0.00003%
Emission to air	low population density	DALY	8.572E-09	2.115E-07	2.200E-07	41.61%
Emission to air	low population density, long-term	DALY	3.060E-07		3.060E-07	57.85%
Emission to air	unspecified	DALY	7.940E-15		7.940E-15	0.000002%
TOTAL			3.146E-07	2.115E-07	5.260E-07	
% Contribution to ionizing radiation, human health			59.48%	39.98%	99.46%	

Buscando la fuente de este radón-222 emitido al aire en zonas con baja densidad poblacional y cuyo daño será más evidente en el largo plazo, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta a la salud humana.

Tabla 85. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
> Freshwater eutrophication				0.03042	PDF.m2.yr
> Freshwater ecotoxicity, long term				2629.25201	PDF.m2.yr
> Water availability, terrestrial ecosystem				0.01092	PDF.m2.yr
> Freshwater ecotoxicity, short term				2.88888	PDF.m2.yr
> Terrestrial acidification				8.52898	PDF.m2.yr
> Marine acidification, short term				2.76242	PDF.m2.yr
> Water availability, human health				0.00051	DALY
> Human toxicity non-cancer, long term				8.36242E-5	DALY
> Human toxicity non-cancer, short term				5.45974E-5	DALY
> Marine acidification, long term				25.44821	PDF.m2.yr
> Land transformation, biodiversity				5.27155	PDF.m2.yr
> Climate change, ecosystem quality, short term				33.14301	PDF.m2.yr
> Photochemical oxidant formation				2.67097E-8	DALY
> Human toxicity cancer, short term				3.88445E-5	DALY
> Ozone layer depletion				7.04243E-8	DALY
> Climate change, human health, short term				0.00015	DALY
> Ionizing radiation, human health				8.87099E-7	DALY
▼ P single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic components and b...			8.50272E-7	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	2.30433E4 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	5.50734E-7	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	1.33747 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	2.80870E-7	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	643.09712 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	1.53700E-8	DALY
▼ P electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			1.47925E-8	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.06702 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.40734E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	28.79074 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	6.88099E-10	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 85, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta a la salud humana, es la producción de obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino y la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso.

Tabla 86. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
> ☒ Marine acidification, long term				0.97907	PDF.m2.yr
> ☒ Land transformation, biodiversity				0.23622	PDF.m2.yr
> ☒ Climate change, ecosystem quality, short term				1.30410	PDF.m2.yr
> ☒ Photochemical oxidant formation				8.74630E-10	DALY
> ☒ Human toxicity cancer, short term				6.30897E-6	DALY
> ☒ Ozone layer depletion				9.55707E-10	DALY
> ☒ Climate change, human health, short term				6.02733E-6	DALY
> ☒ Ionizing radiation, human health				4.56565E-9	DALY
▼ P market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non...			3.28811E-9	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00793 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.66555E-9	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	64.68766 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	1.54604E-9	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	1.85090 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	4.42366E-11	DALY
▼ P electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			7.77684E-10	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00352 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	7.39883E-10	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	1.51362 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	3.61754E-11	DALY
▼ P chromium production chromium Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non...			3.22999E-10	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	8.89388 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	2.12564E-10	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00049 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.03274E-10	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	0.24824 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	5.93299E-12	DALY
▼ P magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious and other non...			5.13867E-11	DALY

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 86, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta a la salud humana, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción de cromo.

Tabla 87. Análisis de impacto de la categoría de radiación ionizante que afecta la salud humana, para la producción de película de fluoruro de polivinilo o Tedlar (componente del encapsulante TPT), mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
> ☒ Terrestrial acidification				0.95726	PDF.m2.yr
> ☒ Marine acidification, short term				0.21893	PDF.m2.yr
> ☒ Water availability, human health				1.14296E-5	DALY
> ☒ Human toxicity non-cancer, long term				2.20390E-6	DALY
> ☒ Human toxicity non-cancer, short term				1.30942E-6	DALY
> ☒ Marine acidification, long term				2.01698	PDF.m2.yr
> ☒ Land transformation, biodiversity				0.39344	PDF.m2.yr
> ☒ Climate change, ecosystem quality, short term				3.38709	PDF.m2.yr
> ☒ Photochemical oxidant formation				2.00533E-9	DALY
> ☒ Human toxicity cancer, short term				1.88089E-6	DALY
> ☒ Ozone layer depletion				4.18737E-9	DALY
> ☒ Climate change, human health, short term				1.56717E-5	DALY
> ☒ Ionizing radiation, human health				4.11077E-8	DALY
▼ P polyvinylfluoride production, dispersion polyvinylfluoride, dispersion Cutoff, S - US	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers an...			3.81433E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	960.10302 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	2.29465E-8	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.06849 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.43833E-8	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	26.80238 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	6.40577E-10	DALY
▼ P electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			1.37205E-9	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00622 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	1.30536E-9	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	2.67044 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	6.38234E-11	DALY
▼ P titanium dioxide production, sulfate process titanium dioxide Cutoff, S - RoW	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers an...			1.30775E-9	DALY
F Carbon-14	Emission to air / low population density	0.00343 kBq	2.10000E-7 DALY/kBq	7.20795E-10	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	23.56476 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	5.63198E-10	DALY
F Radon-222	Emission to air / low population density	0.66483 kBq	2.39000E-11 DALY/kBq	1.58894E-11	DALY

Por último, en la producción de película Tedlar, se puede apreciar en la Tabla 87, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de radiación ionizante que afecta a la salud humana, es la producción de fluoruro de polivinilo, la producción de energía eléctrica que se requiere para el proceso y la producción de dióxido de titanio por proceso del sulfato.

7.13. Agotamiento de la capa de ozono

En la categoría de agotamiento de la capa de ozono (*Ozone layer depletion*), la gráfica (Figura 28) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto (6.9630E-08 DALY), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera (6.464E-08 DALY). Existe muy poca diferencia entre los impactos de todos los tratamientos, de hecho, la diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo 4.994E-09 DALY.

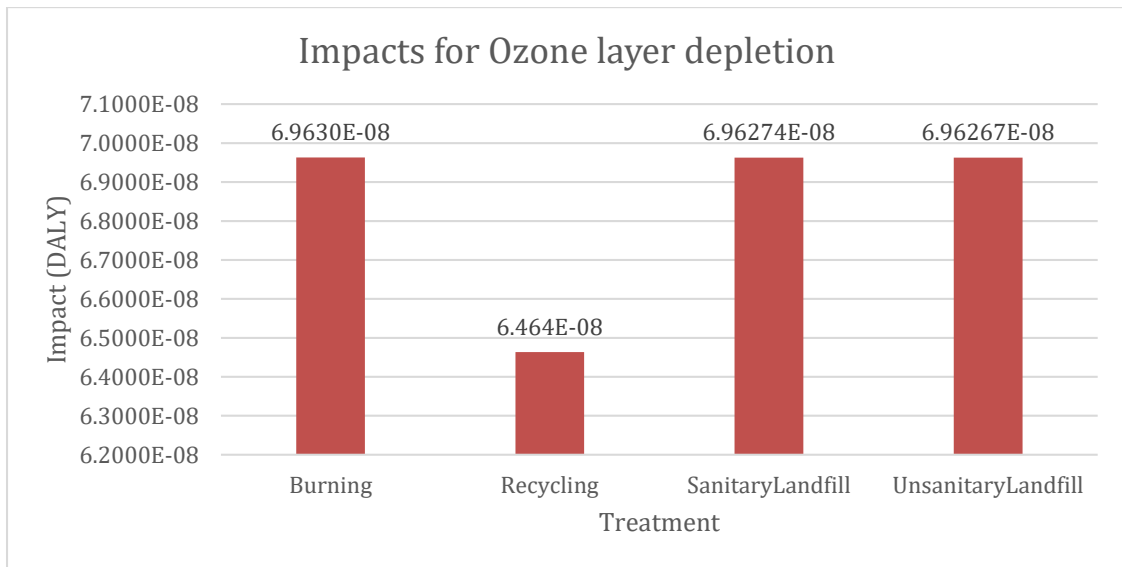


Figura 28. Gráfica comparativa para categoría de impacto Agotamiento de la capa de ozono (Ozone layer depletion)

Si siguiendo, indagando en la categoría de agotamiento de la capa de ozono para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 88) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 82.34 % de contribución a la categoría); la producción de polietilentereftalato o PET (con 9.59% de contribución a la categoría), que conforma al TPT y este, a su vez forma parte de los componentes del encapsulante de paneles solares (también, en menor cantidad, es usado para producir fleje de PET 5/8); y la producción de $AlMg_3$ que se usa en los perfiles del panel solar (con 2.81% de contribución a la categoría).

Tabla 88. Árbol de contribución a la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category:

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	6.96304E-8	DALY
82.34%	market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	5.73355E-8	DALY
9.59%	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	6.67682E-9	DALY
03.41%	market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	2.37665E-9	DALY
02.81%	market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	1.95733E-9	DALY
01.14%	market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	7.90595E-10	DALY
00.25%	market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	1.76059E-10	DALY
00.18%	market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	1.25034E-10	DALY
00.14%	market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	9.49654E-11	DALY
00.09%	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	6.39528E-11	DALY
00.03%	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	1.77755E-11	DALY
00.01%	market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	6.05128E-12	DALY
> 00.01%	Desc EVA-TPT_B	3.86197E-12	DALY
> 00.00%	Reciclaje aluminio R - MX	2.59165E-12	DALY
00.00%	market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	1.85507E-12	DALY
00.00%	market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	1.06307E-12	DALY
> 00.00%	Desc laminado B	1.48713E-13	DALY
00.00%	market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	7.31486E-14	DALY
> 00.00%	Desc embl B	6.64127E-16	DALY
> 00.00%	Desc vidrio solar B	6.11245E-18	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias químicas que una vez emitidas pueden alcanzar y debilitar la capa de ozono. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 89, son el tetracloruro de metano, el trifluorbromometano (o halón 1301), el

bromoclorodifluorometano (o halón 1211), el clorodifluorometano (o HCFC-22), el diclorodifluorometano (o CFC-12) y el bromometano (o halón 1001).

Tabla 89. Análisis de impacto de la categoría de agotamiento de la capa de ozono para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
▼ Ozone layer depletion				6.96304E-8	DALY
▼ P market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			5.73355E-8	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	1.04594E-5 kg	0.00241 DALY/kg	2.52072E-8	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	4.23686E-7 kg	0.03170 DALY/kg	1.34308E-8	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / high population density	4.58976E-6 kg	0.00176 DALY/kg	8.07798E-9	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	3.26586E-7 kg	0.01580 DALY/kg	5.16006E-9	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / high population density	2.28464E-5 kg	0.00018 DALY/kg	4.15804E-9	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	5.56970E-6 kg	0.00018 DALY/kg	1.01369E-9	DALY
▼ P market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers ...			6.67682E-9	DALY
F Methane, bromo-, Halon 1001	Emission to air / unspecified	3.70205E-6 kg	0.00179 DALY/kg	6.62666E-9	DALY
▼ P market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			2.37665E-9	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	3.97382E-8 kg	0.03170 DALY/kg	1.25970E-9	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	2.96198E-8 kg	0.01580 DALY/kg	4.67992E-10	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	1.84600E-6 kg	0.00018 DALY/kg	3.35971E-10	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	1.24153E-7 kg	0.00241 DALY/kg	2.99210E-10	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 90), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar en incineración, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire en zonas con alta densidad poblacional (54.48% de todos los impactos de la categoría de agotamiento de la capa de ozono). Por otro lado, en la misma Tabla 90, es más claro ver que los seis contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (6.934E-08 DALY) ya abarca el 99.58% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 90 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo al agotamiento de la capa de ozono, si sus residuos son mandados a incineración, es el tetracloruro de metano, el cual tiene un impacto de 2.559E-08 DALY que representan el 36.76% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 90. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Catego ry	Sub- category	Referen ce unit	Methane , tetrachlo ro-, R-10	Methane, bromotrifu oro-, Halon 1301	Methane, bromochlorodifi uoro-, Halon 1211	Methane, chlorodiflu oro-, HCFC- 22	Methane, dichlorodiflu oro-, CFC-12	Metha ne, bromo , Halon 1001	TOTAL	% Contrib ion to Ozone layer depletion
Emissi on to air	high populati on density	DALY	2.558E- 08	3.508E-12		4.159E-09	8.189E-09	1.166E -25	3.793 E-08	54.48%
Emissi on to air	low populati on density	DALY		1.685E-08	6.514E-09	1.401E-09	7.670E-13		2.477 E-08	35.57%
Emissi on to air	unspecifi ed	DALY	1.352E- 11			5.733E-26	3.484E-15	6.627E -09	6.641 E-09	9.54%
TOTAL			2.559E- 08	1.686E-08	6.514E-09	5.560E-09	8.190E-09	6.627E -09	6.934 E-08	
% Contribution to Ozone layer depletion			36.76%	24.21%	9.35%	7.98%	11.76%	9.52%	99.58 %	

Buscando la fuente de este tetracloruro de metano (R-10) emitido al aire en zonas con alta densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono.

Tabla 91. Análisis de impacto de la categoría de agotamiento de la capa de ozono, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
[-] Ozone layer depletion				7.04243E-8	DALY
[-] market for tetrafluoroethylene tetrafluoroethylene Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers an...			3.52878E-8	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	9.12997E-6 kg	0.00241 DALY/kg	2.20032E-8	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / high population density	4.93432E-6 kg	0.00176 DALY/kg	8.68440E-9	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / high population density	2.45801E-5 kg	0.00018 DALY/kg	4.47357E-9	DALY
[-] single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic components and b...			2.64632E-8	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	3.11335E-7 kg	0.03170 DALY/kg	9.86933E-9	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	5.53128E-7 kg	0.01580 DALY/kg	8.73942E-9	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	2.41168E-6 kg	0.00241 DALY/kg	5.81215E-9	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	6.62333E-6 kg	0.00018 DALY/kg	1.20545E-9	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / high population density	2.72632E-7 kg	0.00176 DALY/kg	4.79833E-10	DALY
[-] electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			6.64334E-9	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	1.66606E-7 kg	0.03170 DALY/kg	5.28141E-9	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	8.21980E-8 kg	0.01580 DALY/kg	1.29873E-9	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 91, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono, es la producción de las mencionadas obleas (*wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, la producción de la energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción de tetrafluoroetileno.

Tabla 92. Análisis de impacto de la categoría de agotamiento de la capa de ozono, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
[-] Ozone layer depletion				9.55707E-10	DALY
[-] market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non...			5.09288E-10	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	9.44849E-9 kg	0.03170 DALY/kg	2.99517E-10	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	6.39977E-9 kg	0.01580 DALY/kg	1.01116E-10	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	3.89684E-8 kg	0.00241 DALY/kg	9.39139E-11	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	6.44212E-8 kg	0.00018 DALY/kg	1.17247E-11	DALY
[-] electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			3.49260E-10	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	8.75898E-9 kg	0.03170 DALY/kg	2.77660E-10	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	4.32140E-9 kg	0.01580 DALY/kg	6.82781E-11	DALY
[-] magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious and other non...			7.65282E-11	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	3.77350E-9 kg	0.01580 DALY/kg	5.96213E-11	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	4.46473E-10 kg	0.03170 DALY/kg	1.41532E-11	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	1.34807E-8 kg	0.00018 DALY/kg	2.45348E-12	DALY
[-] chromium production chromium Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non...			1.11112E-11	DALY

Si siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 92, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 93. Análisis de impacto de la categoría de agotamiento de la capa de ozono, para la producción de polietileno tereftalato o PET (componente del encapsulante TPT y fleje), mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
[-] Ozone layer depletion				4.75335E-8	DALY
[-] market for purified terephthalic acid purified terephthalic acid Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and...			4.73933E-8	DALY
F Methane, bromo-, Halon 1001	Emission to air / unspecified	2.63685E-5 kg	0.00179 DALY/kg	4.71996E-8	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	4.06503E-9 kg	0.03170 DALY/kg	1.28861E-10	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	1.37905E-8 kg	0.00241 DALY/kg	3.32351E-11	DALY
F Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	1.72771E-9 kg	0.01580 DALY/kg	2.72978E-11	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	1.46272E-8 kg	0.00018 DALY/kg	2.66215E-12	DALY
F Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / unspecified	4.32331E-10 kg	0.00241 DALY/kg	1.04192E-12	DALY
F Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Emission to air / low population density	3.06912E-10 kg	0.00053 DALY/kg	1.62357E-13	DALY
F Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Emission to air / high population density	9.07264E-11 kg	0.00176 DALY/kg	1.59679E-13	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / high population density	6.49902E-11 kg	0.00176 DALY/kg	1.14383E-13	DALY
F Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Emission to air / low population density, long-term	5.42039E-11 kg	0.00176 DALY/kg	9.53988E-14	DALY
F Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Emission to air / unspecified	3.37837E-11 kg	0.00176 DALY/kg	5.94593E-14	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / high population density	3.20054E-10 kg	0.00018 DALY/kg	5.82498E-14	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / low population density	2.50280E-12 kg	0.00176 DALY/kg	4.40493E-15	DALY
F Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	Emission to air / unspecified	3.37837E-11 kg	7.30000E-5 DALY/kg	2.46621E-15	DALY
F Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	Emission to air / high population density	8.06121E-13 kg	0.00176 DALY/kg	1.41877E-15	DALY
F Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / high population density	1.33753E-15 kg	0.03170 DALY/kg	4.23996E-17	DALY
F Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / unspecified	9.20538E-15 kg	0.00176 DALY/kg	1.62015E-17	DALY
F Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Emission to air / unspecified	9.44861E-15 kg	0.00053 DALY/kg	4.99831E-18	DALY
F Methane, bromo-, Halon 1001	Emission to air / high population density	2.92250E-24 kg	0.00179 DALY/kg	5.23127E-27	DALY
F Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / unspecified	1.41287E-23 kg	0.00018 DALY/kg	2.57142E-27	DALY
[-] electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and di...			4.26142E-11	DALY
[-] heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW heat, district or industrial, natural gas	353:Steam and air conditioning supply / 3530:Ste...			4.01257E-11	DALY

Por último, en la producción de PET (componente del encapsulante TPT y fleje), se puede apreciar en la Tabla 93, que aquello que provoca que este tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de agotamiento

de la capa de ozono, se debe a la producción de energía tanto eléctrica como térmica (conseguida a partir de gas natural en calderas de condensación modulantes) que se necesita para el proceso productivo de PET y de manera considerable se tiene el uso de ácido tereftálico purificado como materia prima, puesto que su producción provoca el 99.5913% de todos los impactos de esta categoría para el PET.

7.14. Formación de oxidantes fotoquímicos

En la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos (*Photochemical oxidant formation*), la gráfica (Figura 29) muestra que la disposición a incineración (*Burning*) es el escenario con mayor impacto ($3.4320\text{E-}08$ DALY), mientras que el escenario de disposición a reciclaje (*Recycling*) es el que menor impacto genera ($3.428\text{E-}08$ DALY). La diferencia de impacto que existe entre el escenario de mayor y el de menor impacto es de sólo $4.41\text{E-}11$ DALY.

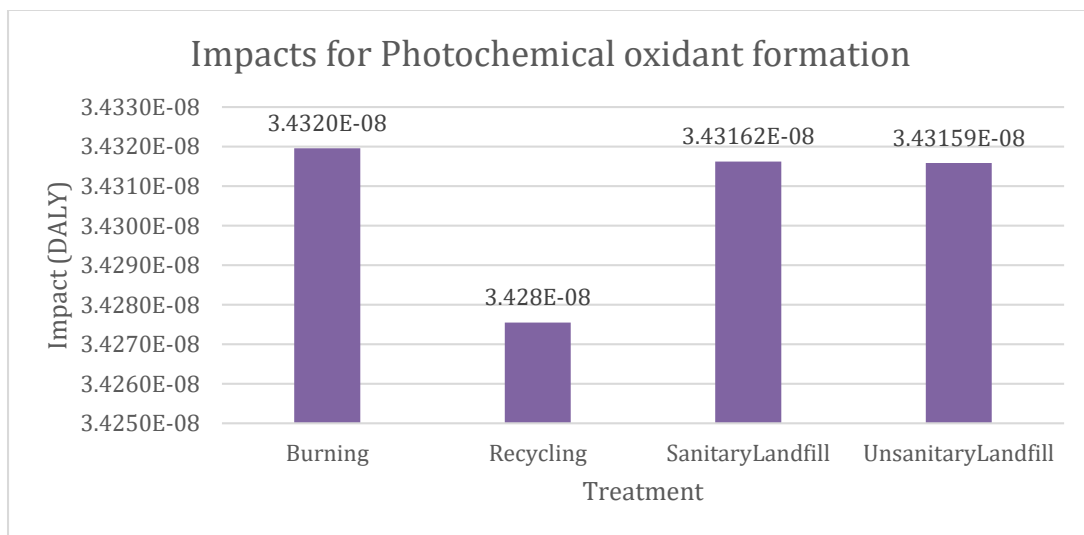


Figura 29. Gráfica comparativa para categoría de impacto Formación de oxidantes fotoquímicos (*Photochemical oxidant formation*)

Siguiendo, indagando en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos para el tratamiento de residuos por incineración, se observa que (Tabla 94) sus impactos se deben principalmente a tres actividades: la producción de celdas solares (con 82.67% de contribución a la categoría), la producción de AlMg_3 que se usa en los perfiles del panel solar (con 9.2% de contribución a la categoría) y la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro (con 4.95% de contribución a la categoría).

Tabla 94. Árbol de contribución a la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos para el tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Impact category

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P B ENSAMBLE panel solar 1 m2 - MX	3.43196E-8	DALY
82.67%	P market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, S - GLO	2.83709E-8	DALY
09.20%	P market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLO	3.15609E-9	DALY
04.95%	P market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	1.69923E-9	DALY
01.62%	P market for polyvinylfluoride, film polyvinylfluoride, film Cutoff, S - GLO	5.55155E-10	DALY
00.60%	P market for ethylvinylacetate, foil ethylvinylacetate, foil Cutoff, S - GLO	2.06555E-10	DALY
00.52%	P market for solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry solder, bar, Sn63Pb37, for electronics industry Cutoff, S - GLO	1.77223E-10	DALY
00.16%	P market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous polyethylene terephthalate, granulate, amorphous Cutoff, S - GLO	5.40001E-11	DALY
00.11%	P market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, S - GLO	3.90976E-11	DALY
00.09%	P market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - MX	2.95411E-11	DALY
00.04%	P market for silicone product silicone product Cutoff, S - RoW	1.50539E-11	DALY
00.01%	P market for packaging film, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - GLO	4.46179E-12	DALY
00.01%	P market for containerboard, fluting medium containerboard, fluting medium Cutoff, S - RoW	4.19418E-12	DALY
> 00.01%	P Desc EVA-TPT_B	4.01443E-12	DALY
> 00.01%	P Reciclaje aluminio R - MX	2.29687E-12	DALY
00.00%	P market for flux, for wave soldering flux, for wave soldering Cutoff, S - GLO	1.65801E-12	DALY
> 00.00%	P Desc laminado B	1.02337E-13	DALY
00.00%	P market for computer, laptop computer, laptop Cutoff, S - GLO	4.80925E-14	DALY
> 00.00%	P Desc embl B	1.52451E-15	DALY
> 00.00%	P Desc vidrio solar B	3.45284E-18	DALY

Se debe notar que, en las actividades antes mencionadas se liberan sustancias químicas que una vez emitidas pueden promover la formación de oxidantes fotoquímicos. Los principales contaminantes encontrados de este tipo, como se muestra en la Tabla 95, son los óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) y dióxido de azufre.

Tabla 95. Análisis de impacto de la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos para tratamiento de residuos de manufactura de paneles solares por medio de incineración, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Photochemical oxidant formation				3.43196E-8	DALY
P market for photovoltaic cell, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer	261:Manufacture of electronic components an...			2.83709E-8	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.33402 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.30268E-8	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / high population density	0.17810 kg	3.90000E-8 DALY/kg	6.94591E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.06423 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.50479E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.04925 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.92067E-9	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.03111 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.21333E-9	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.38718 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.16154E-9	DALY
P market for aluminium alloy, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - GLC	242:Manufacture of basic precious and other ...			3.15609E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.04119 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.60623E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.01247 kg	3.90000E-8 DALY/kg	4.86346E-10	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.00716 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.79297E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00678 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.64328E-10	DALY
F Carbon monoxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.08328 kg	2.00000E-9 DALY/kg	1.66552E-10	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.04354 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.30613E-10	DALY
P market for solar glass, low-iron solar glass, low-iron Cutoff, S - GLO	231:Manufacture of glass and glass products ...			1.69923E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.03095 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.20689E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00398 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.55177E-10	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.03355 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.00636E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00186 kg	3.90000E-8 DALY/kg	7.25476E-11	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	0.00144 kg	3.90000E-8 DALY/kg	5.61103E-11	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.00131 kg	3.90000E-8 DALY/kg	5.12739E-11	DALY

Al sumar los impactos de cada una de las sustancias anteriormente identificadas (Tabla 96), se puede notar que, al llevar los residuos a tratar a incineración, una gran parte de estos contaminantes están siendo emitidos al aire en zonas con baja densidad poblacional (52.55% de todos los impactos de la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos). Por otro lado, en la misma Tabla 96, es más claro ver que los tres contaminantes identificados se encuentran entre los que mayor aportan a los impactos de la categoría actual, ya que su suma de impacto (3.325E-08 DALY) ya abarca el 96.89% de todos los impactos de la categoría. Además, con base en la misma Tabla 96 se puede decir que el mayor contaminante emitido por la manufactura de paneles solares que más está contribuyendo a la formación de oxidantes fotoquímicos, si sus residuos son mandados a incineración, con los óxidos de

nitrógeno, el cual tiene un impacto de 2.206E-08 DALY que representan el 64.28% de todos los impactos de la categoría.

Tabla 96. SUMA DE IMPACTOS AMBIENTALES EN CATEGORÍA FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS DE SUSTANCIAS EMITIDAS POR LA MANUFACTURA DE PANELES SOLARES, SI LOS RESIDUOS SON TRATADOS EN INCINERACIÓN

Category	Sub-category	Reference unit	Nitrogen oxides	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Sulfur dioxide	TOTAL	% Contribution to Photochemical oxidant formation
Emission to air	high population density	DALY	2.566E-09	7.027E-09	3.413E-10	9.935E-09	28.95%
Emission to air	low population density	DALY	1.509E-08	1.583E-09	1.355E-09	1.803E-08	52.55%
Emission to air	low population density, long-term	DALY	3.621E-13	4.102E-14	8.282E-14	4.859E-13	0.0014%
Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	DALY	2.542E-12	3.643E-16	1.360E-16	2.542E-12	0.0074%
Emission to air	unspecified	DALY	4.398E-09	6.687E-10	2.142E-10	5.280E-09	15.39%
TOTAL			2.206E-08	9.279E-09	1.911E-09	3.325E-08	
% Contribution to Photochemical oxidant formation			64.28%	27.04%	5.57%	96.89%	

Buscando la fuente de estos óxidos de nitrógeno emitidos al aire en zonas con baja densidad poblacional, se revisaron los tres procesos que más están contribuyendo a la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos.

Tabla 97. Análisis de impacto de la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, para producción de celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Photochemical oxidant formation				2.67097E-8	DALY
single-Si wafer production, photovoltaic single-Si wafer, photovoltaic Cutoff, S - RER	261:Manufacture of electronic components and b...			1.47450E-8	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.20758 kg	3.90000E-8 DALY/kg	8.09557E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.04048 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.57860E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.03950 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.54034E-9	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.02916 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.13712E-9	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.31333 kg	3.00000E-9 DALY/kg	9.39990E-10	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	0.00800 kg	3.90000E-8 DALY/kg	3.11929E-10	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / high population density	0.00669 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.60845E-10	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06310 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.89287E-10	DALY
photovoltaic cell production, single-Si wafer photovoltaic cell, single-Si wafer Cutoff, U - CN-JS	261:Manufacture of electronic components and b...			7.55001E-9	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / high population density	0.19354 kg	3.90000E-8 DALY/kg	7.54806E-9	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			2.37582E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.03768 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.46953E-9	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01151 kg	3.90000E-8 DALY/kg	4.48997E-10	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.06094 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.82807E-10	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.00322 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.25397E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00076 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.96409E-11	DALY
market for metallization paste, front side metallization paste, front side Cutoff, S - RER	202:Manufacture of other chemical products / 20...			1.05943E-9	DALY
market for metallization paste, back side metallization paste, back side Cutoff, S - RoW	202:Manufacture of other chemical products / 20...			5.70561E-10	DALY

En el caso de la producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas de silicio, se puede apreciar en la Tabla 97, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, es la producción de obleas (o *wafers* en el idioma inglés) de silicio monocristalino, los mismos procesos finales para la producción de celdas fotovoltaicas y la producción de energía eléctrica que esta requiere.

Tabla 98. Análisis de impacto de la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, para producción de aluminio 6061 anodizado, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Photochemical oxidant formation				8.74630E-10	DALY
market for aluminium, cast alloy aluminium, cast alloy Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non...			7.07400E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.01014 kg	3.90000E-8 DALY/kg	3.95536E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00241 kg	3.90000E-8 DALY/kg	9.40230E-11	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00181 kg	3.90000E-8 DALY/kg	7.04432E-11	DALY
F Carbon monoxide, fossil	Emission to air / unspecified	0.02401 kg	2.00000E-9 DALY/kg	4.80189E-11	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00997 kg	3.00000E-9 DALY/kg	2.99053E-11	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.00050 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.93165E-11	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00467 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.40162E-11	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00444 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.33052E-11	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	0.00027 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.06254E-11	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - KW	351:Electric power generation, transmission and ...			1.24904E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00198 kg	3.90000E-8 DALY/kg	7.72577E-11	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00061 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.36051E-11	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00320 kg	3.00000E-9 DALY/kg	9.61070E-12	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	0.00017 kg	3.90000E-8 DALY/kg	6.59250E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	3.99567E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.55831E-12	DALY
magnesium production, electrolysis magnesium Cutoff, S - RoW	242:Manufacture of basic precious and other non...			1.96943E-11	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	0.00030 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.18025E-11	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	5.34570E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.08482E-12	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	5.09416E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.98672E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	2.10613E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	8.21390E-13	DALY
F Ethane	Emission to air / low population density	8.66146E-5 kg	8.00000E-9 DALY/kg	6.92917E-13	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	9.75335E-6 kg	3.90000E-8 DALY/kg	3.80381E-13	DALY
F Carbon monoxide, fossil	Emission to air / low population density	0.00016 kg	2.00000E-9 DALY/kg	3.26720E-13	DALY
F Propane	Emission to air / low population density	2.02513E-5 kg	1.20000E-8 DALY/kg	2.43016E-13	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	7.47515E-5 kg	3.00000E-9 DALY/kg	2.24254E-13	DALY
F Butane	Emission to air / low population density	9.47280E-6 kg	2.30000E-8 DALY/kg	2.17874E-13	DALY

Siguiendo con la producción de aluminio 6061 anodizado, se puede apreciar en la Tabla 98, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, es la producción de aleación de aluminio fundido, la producción de la energía eléctrica que necesita el proceso y la producción de magnesio por medio de electrólisis.

Tabla 99. Análisis de impacto de la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, para la producción de vidrio templado de bajo contenido de hierro, mostrado por openLCA

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
Photochemical oxidant formation				1.77965E-10	DALY
flat glass production, uncoated flat glass, uncoated Cutoff, U - RoW	231:Manufacture of glass and glass pr...			1.41700E-10	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	0.00327 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.27530E-10	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	0.00404 kg	3.00000E-9 DALY/kg	1.21200E-11	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	5.00000E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.95000E-12	DALY
soda production, solvay process soda ash, light, crystalline, heptahydrate Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fer...			9.34388E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	8.10597E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	3.16133E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	5.90815E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.30418E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	4.12799E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.60992E-12	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00018 kg	3.00000E-9 DALY/kg	5.43194E-13	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	0.00016 kg	3.00000E-9 DALY/kg	4.91857E-13	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	1.08270E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	4.22254E-13	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	7.53932E-6 kg	3.90000E-8 DALY/kg	2.94034E-13	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / high population density	2.42280E-6 kg	3.90000E-8 DALY/kg	9.44893E-14	DALY
electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage	351:Electric power generation, transmis...			8.71971E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	0.00014 kg	3.90000E-8 DALY/kg	5.39346E-12	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	4.22539E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.64790E-12	DALY
F Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	0.00022 kg	3.00000E-9 DALY/kg	6.70936E-13	DALY
F NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	1.18008E-5 kg	3.90000E-8 DALY/kg	4.60231E-13	DALY
F Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	2.78943E-6 kg	3.90000E-8 DALY/kg	1.08788E-13	DALY
market for heavy fuel oil heavy fuel oil Cutoff, S - RoW	192:Manufacture of refined petroleum ...			8.43524E-12	DALY
silica sand production silica sand Cutoff, S - DE	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			3.13095E-12	DALY
lime production, milled, packed lime, packed Cutoff, S - Europe without Switzerland	081:Quarrying of stone, sand and clay ...			2.42149E-12	DALY
flat glass factory construction flat glass factory Cutoff, S - RoW	429:Construction of other civil engineer...			2.41876E-12	DALY

Por último, en la producción de soldadura de vidrio de bajo contenido de hierro, se puede apreciar en la Tabla 99, que aquello que provoca que esta tenga un impacto considerable en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, es la producción de vidrio plano sin revestimiento, la producción de energía eléctrica necesaria para el proceso y la producción por medio del método Solvay de carbonato de sodio (o ceniza de sosa) cristalino, ligero y heptohidratado.

7.15. Análisis global

Al integrar toda la información obtenida de los análisis por agrupación de categorías de impacto, se observa que en la manufactura de paneles fotovoltaicos la mayor parte de los impactos ambientales a largo plazo a los ecosistemas afectan al agua dulce; mientras que la mayor parte de los impactos provocados a la salud humana a largo plazo se relacionan con la toxicidad a la que se exponen las personas. Recordando la tabla comparativa (Tabla 11) presentada en el quinto capítulo de este trabajo, el formato condicional muestra que, en todos los escenarios de tratamiento de residuos, la agrupación de categorías de agua dulce (*Freshwater total*) presentó siempre los mayores valores en cuanto a daño a los ecosistemas. Esta misma Tabla 11 deja ver que las otras dos agrupaciones de categorías de impacto relacionadas a los ecosistemas, que le siguen al agua dulce, tienen que ver con el cambio climático (*Climate change, ecosystem quality*) y el daño a los mares (*Marine total*), en ese orden de mayor a menor contribución. Igualmente, la Tabla 11 muestra como la agrupación de categorías de impacto de toxicidad humana (*Human toxicity total*) obtuvo los mayores impactos a la salud humana en todos los tipos de tratamiento, seguida por cambio climático (*Climate change, human health*) y disponibilidad de agua que afecta a la salud humana (*Water availability, human health*), en ese orden de mayor a menor contribución.

Tabla 100. RESUMEN DE ANÁLISIS DE IMPACTO INDIVIDUALES

IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM										
AGRUPATION	REFERENCE UNIT	TREATMENT WITH MOST IMPACTS	AMOUNT OF IMPACT FOR AGRUPATION	IMPACT CATEGORY WITH MOST IMPACTS OF THE AGRUPATION	AMOUNT OF IMPACT FOR IMPACT CATEGORY	FLOW WITH MOST CONTRIBUTION TO THE IMPACT CATEGORY	THE FLOW IS MORE AN/A	MOST EMISSIONS ARE FROM/RELEASE TO	AMOUNT OF IMPACT FOR REPRESENTATIVE FLOW	% CONTRIBUTION FOR IMPACT CATEGORY OF REPRESENTATIVE FLOW
Freshwater total	PDF.m2.yr	Unsanitary landfill	3614.20	Freshwater ecotoxicity, long term	3613.08	Aluminium	Emission to water	ground water, long-term	2764.88	76.52%
Climate change, ecosystem quality	PDF.m2.yr	Burning	140.33	Climate change, ecosystem quality, long term	140.33	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	134.87	96.11%
Marine total	PDF.m2.yr	Burning	33.38	Marine acidification, long term	32.91	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	32.64	99.19%
Terrestrial acidification	PDF.m2.yr	Unsanitary landfill	11.59	Terrestrial acidification	11.59	Sulfur dioxide	Emission to air	low population density	8.18	70.52%
Land total	PDF.m2.yr	Burning	9.11	Land transformation, biodiversity	7.66	Transformation, to mineral extraction site	Resource	land	4.86	63.48%
Water availability, total	PDF.m2.yr	Burning	0.01378	Water availability, terrestrial ecosystem	0.01291	Water, well, in ground	Resource	in water	0.01291	100.00%
Ionizing radiation, ecosystem quality	PDF.m2.yr	Burning	2.178E-07	Ionizing radiation, ecosystem quality	2.178E-07	Carbon-14	Emission to air	low population density	1.977E-07	90.79%
IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH										
AGRUPATION	REFERENCE UNIT	TREATMENT WITH MOST IMPACTS	AMOUNT OF IMPACT FOR AGRUPATION	IMPACT CATEGORY WITH MOST IMPACTS OF THE AGRUPATION	AMOUNT OF IMPACT FOR IMPACT CATEGORY	FLOW WITH MOST CONTRIBUTION TO THE IMPACT CATEGORY	THE FLOW IS MORE AN/A	MOST EMISSIONS ARE FROM/RELEASE TO	AMOUNT OF IMPACT FOR REPRESENTATIVE FLOW	% CONTRIBUTION FOR IMPACT CATEGORY OF REPRESENTATIVE FLOW
Human toxicity total	DALY	Unsanitary landfill	0.001141	Human toxicity non-cancer, long term	0.001432	Silver	Emission to soil	agricultural	0.0008164	71.86%
Climate change, human health	DALY	Burning	0.0006388	Climate change, human health, long term	0.0006388	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	0.0006142	96.15%
Water availability, human health	DALY	Burning	0.0004859	Water availability, human health	0.0004859	Water, river	Resource	in water	0.0004610	94.88%

Particulate matter formation	DALY	Unsanitar y landfill	0.0001473	Particulate matter formation	0.0001473	Particulates , < 2.5 um	Emission to air	low population density	9.648E-05	65.52%
Ionizing radiation, human health	DALY	Burning	5.289E-07	Ionizing radiation, human health	5.289E-07	Radon-222	Emission to air	low population density, long-term	3.146E-07	59.47%
Ozone layer depletion	DALY	Burning	6.963E-08	Ozone layer depletion	6.963E-08	Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air	high population density	2.559E-08	36.76%
Photochemical oxidant formation	DALY	Burning	3.432E-08	Photochemical oxidant formation	3.432E-08	Nitrogen oxides	Emission to air	low population density	2.206E-08	64.28%

**Las cantidades presentadas en la tabla, no incluyen impactos a corto plazo. Solamente incluye impactos a largo plazo.

Indagando más a fondo en cada agrupación de categorías de impacto que afectan a los ecosistemas, y conjuntando toda esta información en la Tabla 100, se observa que el agua dulce (*Freshwater total*) está siendo afectada a largo plazo por la manufactura de paneles solares debido, principalmente, a que aumenta su ecotoxicidad, ya que la categoría de impacto de eco toxicidad en el agua dulce (*Freshwater ecotoxicity, long term*) es la más alta en esta agrupación de categorías. Además, el tipo de agua dulce que está siendo más afectada es aquella que se encuentra en el subsuelo (agua subterránea) y cuyo daño será más evidente en el largo plazo (*ground water, long-term*). En el caso de los mares (*Marine total*), el daño que pueden sufrir se relaciona, sobre todo, a su acidificación a largo plazo (*Marine acidification, long term*). Más adelante, aunque no en la misma magnitud que las categorías anteriores, podemos ver que en el largo plazo se afecta a la biodiversidad por la transformación del suelo (*Land transformation, biodiversity*) para hacer espacio a los sitios en donde se lleva a cabo la manufactura, ya que esta fue la categoría de impacto que dominó en la agrupación de uso de suelo (*Land total*). También se observa en la agrupación de disponibilidad de agua (*Water availability, total*), que la manufactura provoca una disminución del agua con la calidad que requieren los ecosistemas terrestres, sobre todo de agua subterránea (*Water, well, in ground*), ya que esta fue la categoría que mayores impactos ambientales presenta de esa agrupación (*Water availability, terrestrial ecosystem*). En cuanto a las categorías de impacto que afectan a la salud humana, se resalta que, en la agrupación de toxicidad humana (*Human toxicity total*), los mayores impactos se concentran en una categoría de toxicidad humana en la que a largo plazo no se consideran detonantes de cáncer (*Human toxicity non-cancer, long term*). Ha esta categoría de impacto le siguen la de cambio climático (*Climate change, human health, long term*) y la de disponibilidad de agua (*Water availability, human health*) que a largo plazo tendrán un impacto en la salud humana.

Del mismo modo, la Tabla 100 permite discutir acerca de los mayores flujos elementales que están siendo emitidos en cada categoría de impacto, ya que casi todas estas sustancias identificadas contribuyen a más del 50% de los impactos totales de cada categoría (a excepción del R-10 que sólo contribuye en un 36.76% a *Ozone layer depletion*). Empezando con aquellos flujos elementales que afectan a los ecosistemas, se destaca que la manufactura de paneles solares tiene especial potencial para: contaminar con aluminio el agua dulce del subsuelo (sobre todo en el largo plazo) con 76.52% de aportación a la categoría; liberar al aire dióxido de carbono fósil en zonas con baja densidad poblacional, contribuyendo así al cambio climático y a la acidificación de los mares a largo plazo en un 96.11% y 99.19% respectivamente; emitir al aire dióxido de azufre en zonas con baja densidad poblacional, que favorece la acidificación del suelo en un 70.52% y; aunque en muy poca medida, se emite Carbono-14 en zonas con baja densidad poblacional, lo que desencadena radiación ionizante que puede afectar la calidad de los ecosistemas con un 90.79% de aportación a la categoría. También, la primera sección de la Tabla 100, muestra que el suelo está siendo mayoritariamente transformado para áreas de extracción minera, lo cual, llegará a afectar la biodiversidad de los ecosistemas (*Land transformation, biodiversity*) con un 63.48% de

aportación a los impactos totales de la categoría. Ahora, hablando sobre aquellos contaminantes de la manufactura que dañan la salud humana, hay especial potencial para: favorecer al cambio climático que afectará en el largo plazo la salud humana por la emisión al aire de dióxido de carbono fósil en zonas con baja densidad poblacional con un 96.15% de aportación a la categoría de impacto; también de emitir a suelos agrícolas plata, que es tóxico para el ser humano con un 57.02% de aportación; liberar al aire partículas con diámetro menores a 2.5 micras en zonas con baja densidad poblacional con un 65.52% de aportación; tetrafluorometano (o R-10) en zonas con alta densidad poblacional, que debilita la capa de ozono; óxidos de nitrógeno en zonas con baja densidad poblacional, que promueven la formación de oxidantes fotoquímicos, con un 64.28% de aportación; y radón-222 que, si bien es emitido en pequeñas cantidades en zonas con baja densidad poblacional, en el largo plazo provoca radiación ionizante que afecta la salud humana con un 59.47% de aportación. Asimismo, se deja ver que, la salud de las personas se podrá ver afectada por la disminución de agua apta para consumo humano (*Water availability, human health*), sobre todo de fuentes como ríos (*Water, river*) con una aportación del 94.88% a los impactos totales de la categoría. También la Tabla 100 nos ayuda identificar flujos elementales emitidos por la manufactura de paneles fotovoltaicos que más impactan a los ecosistemas, que es el aluminio; y a la salud humana, que es la plata.

Tabla 101. IMPACTOS AL ECOSISTEMA Y LA SALUD HUMANA POR TIPO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

WASTE TREATMENT	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	NUMBER OF IMPACT CATEGORIES IN WHICH IT HAS THE MOST IMPACTS
Unsanitary landfill	3808.43	0.002412	4
Burning	3715.32	0.001355	10
Sanitary landfill	3715.48	0.001355	0
Recycling	3710.98	0.001356	0

***Las cantidades presentadas en la tabla, no incluyen impactos a corto plazo. Solamente incluye impactos a largo plazo.*

Siguiendo con los escenarios de tratamiento de residuos de la manufactura de paneles solares, la Tabla 101 sintetiza su situación en cuanto impactos a los ecosistemas y a la salud humana. Se hace evidente que la disposición a relleno sanitario no controlado es el tratamiento de residuos que más impacta tanto a los ecosistemas como a la salud humana, mientras que la disposición a relleno sanitario controlado es el tratamiento con menores impactos a la salud humana y el reciclaje el que tiene menor impacto al medio ambiente. Por su parte, la incineración, a pesar de no ser el tratamiento con mayores impactos a los ecosistemas o a la salud humana, en varias categorías resultó ser el escenario cuyos impactos ambientales superaron a los demás tratamientos. Observando la Tabla 100 y la Tabla 101, en diez agrupaciones de categorías de impacto contra cuatro agrupaciones de categorías, la incineración superó los impactos ambientales del relleno sanitario no controlado. La razón por la que la incineración no resultó ser el tratamiento con los impactos ambientales más altos hacia los ecosistemas o a la salud humana, se debe a que, en el mismo proceso de ensamble de paneles solares, se tienen residuos de celdas fotovoltaicas (rotas o rechazadas durante el proceso), tiras de conexión y cintas de interconexión. De ser llevados a un relleno sanitario no controlado (y no a incinerar) estos residuos supondrían emisiones directas hacia el suelo de sustancias como plomo, estaño, cobre o plata; siendo aún más grave si estos son suelos para la agricultura, puesto que así aumenta la posibilidad de contacto con los seres humanos.

Tabla 102. IMPACTO EN EL ECOSISTEMA Y LA SALUD HUMANA POR PROCESO REPRESENTATIVO

TREATMENT	REPRESENTATIVE PROCESSES	photovoltaic cell, single-Si wafer	aluminium alloy, AlMg3	solar glass, low-iron	polyvinylfluoride, film	solder bar, Sn63Pb37	PV panel assembling	TOTAL
BURNING	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	2826.91	637.89	47.93	37.01	112.87	7.518E-13	3662.60
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	76.09%	17.17%	1.29%	1.00%	3.04%	0.00%	98.58%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	0.001195	9.793E-05	3.249E-05	1.553E-05	4.085E-06	3.690E-20	0.1345%
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	88.15%	7.23%	2.40%	1.15%	0.3014%	0.00%	99.22%
RECYCLING	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	2826.91	637.89	47.93	37.01	112.87	7.518E-13	3662.60
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	76.18%	17.19%	1.29%	1.00%	3.04%	0.00%	98.70%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	0.1195%	9.793E-05	3.249E-05	1.553E-05	4.085E-06	3.690E-20	0.1345%
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	88.10%	7.22%	2.40%	1.15%	0.3012%	0.00%	99.17%
SANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	2826.91	637.89	47.93	37.01	112.87	7.518E-13	3662.60
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	76.08%	17.17%	1.29%	1.00%	3.04%	0.00%	98.58%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	0.1195%	9.793E-05	3.249E-05	1.553E-05	4.085E-06	3.690E-20	0.1345%
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	88.20%	7.23%	2.40%	1.15%	0.3016%	0.00%	99.28%
UNSANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	2826.91	637.89	47.9272	37.0071	112.87	94.53	3757.13
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	74.23%	16.75%	1.26%	0.9717%	2.96%	2.48%	98.65%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	0.1195%	9.793E-05	3.249E-05	1.553E-05	4.085E-06	0.1052%	0.2397%
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	49.53%	4.06%	1.35%	0.6439%	0.1693%	43.60%	99.35%

**Las cantidades presentadas en la tabla, no incluyen impactos a corto plazo. Solamente incluye impactos a largo plazo.

En la Tabla 102 podemos corroborar lo que fuimos observando a través de los análisis individuales por categoría de impacto. Una vez más, los procesos involucrados en la manufactura de paneles fotovoltaicos que más impactos ambientales provocaron tanto al ecosistema como a la salud humana, son los seis que en ella se presentan: ensamble de paneles, producción de celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, AlMg₃, vidrio templado de bajo contenido de hierro, soldadura de plomo estañado y TPT. Como se ve, la mayoría de ellos se asocia a la producción de algún componente o materia prima para los paneles fotovoltaicos (a excepción del mismo ensamble del panel), por lo que sus impactos ambientales son los mismos sin importar el tipo de tratamiento al que serán llevados los residuos. También, el que sean procesos representativos o clave en el impacto ambiental de la manufactura de paneles fotovoltaicos se comprueba en la Tabla 102, ya que, al sumar sus impactos, en todos los tipos de tratamiento de residuos, estos representaron entre el 98.58% y el 98.7% de los impactos totales a los ecosistemas y entre el 99.17% y el 99.35% de los impactos totales a la salud humana. Del mismo modo, revisando categoría por categoría, estos seis procesos, normalmente se encontraban hasta arriba en los análisis de openLCA, dentro del grupo de los procesos que mayores impactos generaban tanto a las categorías de impacto al ecosistema como a las categorías de impacto a la salud humana.

La producción de celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino es especialmente preocupante (ver Tabla 102). Por sí solo, el proceso productivo está provocando entre el 74.23% y el 76.18% de todos impactos al ecosistema

y entre el 49.53% y el 88.20% de todos los impactos a la salud humana, independientemente del tratamiento de residuos que se esté empleando. A esta materia prima le sigue la producción de AlMg₃ que está provocando entre 16.75% y el 17.19% de todos impactos al ecosistema y entre el 4.06% y el 7.23% de todos los impactos a la salud humana. Otra cosa por destacar es que el mismo ensamble de paneles fotovoltaicos; dados los residuos de celdas rotas, tiras y cintas de conexión emitidos directamente a los suelos agrícolas, es el segundo proceso con los mayores impactos a la salud humana en el escenario de relleno sanitario no controlado (43.6% de aportación).

Estas observaciones también se pueden complementar si se consultan los resultados de la tabla del Anexo 9.2, en donde se reportan las cantidades de flujos elementales emitidos más relevantes que cada tipo de proceso emite, independientemente del tratamiento que reciban los residuos de la manufactura de paneles fotovoltaicos. En esa tabla se observa, por ejemplo, que la producción de celdas fotovoltaicas es el proceso que más flujos elementales emite.

Tabla 103. IMPACTO EN EL ECOSISTEMA Y LA SALUD HUMANA POR RESIDUO DE LA MANUFACTURA DE PANELES FOTOVOLTAICOS

TREATMENT	TYPE OF DISCHARD	Aluminium alloy (AlMg ₃) Recycling	Packaging Dischard	EVA & TPT Dischard	Lamination Dischard	Solar glass Dischard	TOTAL
BURNING	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	33.37	0.001689	2.21	0.007465	1.055E-07	35.59
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	0.8983%	0.00005%	0.0594%	0.0002%	0.000000003%	0.9580%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	9.222E-08	1.832E-10	8.284E-07	1.006E-08	5.184E-14	9.308E-07
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	0.0068%	0.00001%	0.0611%	0.0007%	0.000000004%	0.0687%
RECYCLING	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	33.37	5.87583E-05	0.4928	0.05831	2.740E-06	33.93
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	0.8993%	0.000002%	0.0133%	0.002%	0.0000001%	0.9131%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	9.222E-08	2.655E-11	2.593E-06	6.980E-10	1.539E-14	2.686E-06
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	0.0068%	0.000002%	0.1912%	0.0001%	0.000000001%	0.1982%
SANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	33.37	0.002224	2.38	0.003515	5.624E-08	35.76
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	0.8983%	0.00006%	0.0640%	0.0001%	0.000000002%	0.9625%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	9.22185E-08	2.038E-11	2.485E-08	8.175E-10	2.865E-14	1.179E-07
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	0.0068%	0.000002%	0.0018%	0.0001%	0.000000002%	0.0087%
UNSANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE ECOSYSTEM (PDF.m2.yr)	33.37	0.000465893	0.4928	0.3096	6.725E-09	34.18
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL ECOSYSTEM IMPACTS OF THE TREATMENT	0.8763%	0.00001%	0.0129%	0.008%	0.000000002%	0.9199%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN HEALTH (DALY)	9.222E-08	1.823E-09	2.593E-06	3.422E-06	1.032E-11	6.109E-06
	% CONTRIBUTION FOR TOTAL HUMAN HEALTH IMPACTS OF THE TREATMENT	0.0038%	0.00008%	0.1075%	0.1418%	0.00000004%	0.4507%

***Las cantidades presentadas en la tabla, no incluyen impactos a corto plazo. Solamente incluye impactos a largo plazo.*

***El aluminio en todos los escenarios es mandado a reciclaje, por esa razón, sus impactos ambientales son iguales en cada escenario.*

En cuanto a los impactos ambientales de los residuos que surgen durante la manufactura de paneles solares, la Tabla 103 nos muestra que, los residuos de aluminio provenientes de la operación de corte para ajustar los marcos (que siempre son mandados a reciclaje), son los que tienen el mayor impacto ambiental, tanto a los ecosistemas, con un porcentaje de aporte a los impactos totales entre el 0.8763% y el 0.8993%; como a la salud humana con

una aportación entre el 0.0038% y el 0.068%. El otro tipo de residuos que le siguen en magnitud de impacto ambiental, son los residuos de EVA y TPT que proviene principalmente de la estación de reparación de celdas antes de la laminación, con una aportación entre el 0.0129% y el 0.064% a los impactos totales a los ecosistemas (independientemente del tratamiento de residuos usado) y una aportación entre el 0.0018% y el 0.1912% a los impactos totales a la salud humana. Después, a estos tipos de residuos, le sigue la posibilidad del descarte de un laminado completo que se haya estropeado durante el proceso. Esto último hace pensar que, de ser un accidente constante, se podría esperar que los impactos de la manufactura de paneles solares se eleven aún más. Por otro lado, el tratamiento empleado para estos tipos de residuos que más impacta a los ecosistemas es el relleno sanitario, con una suma de los impactos de todos ellos de 35.76 PDF.m2.yr y el que más impacta a la salud humana es el relleno sanitario no controlado, con una suma de los impactos de todos ellos de 6.109E-06 DALY.

Estas observaciones también se pueden complementar si se consultan los resultados de la tabla del Anexo 9.1, donde se registraron los impactos ambientales de los residuos con un poco más de detalle; y los resultados de la tabla del Anexo 9.2, en donde se puede ver que el tratamiento de los residuos de aluminio, EVA y TPT son los que emiten más flujos elementales.

Por último, cabe recordar que los residuos de celdas fotovoltaicas, tiras y cintas de conexión no se están considerando en los escenarios de incineración, reciclaje y relleno sanitario, por falta de una base de datos para estos tratamientos. Por su parte, estos residuos se modelaron como emisiones directas al suelo en el caso del escenario de tratamiento por relleno sanitario no controlado. Debido a esto, se es consciente que los resultados presentados en este trabajo pueden no ser concluyentes, haciendo lucir a ciertos tratamientos de residuos como los causantes de más (como en el caso del relleno sanitario no controlado) o menos (como en el caso de los demás tratamientos) impactos ambientales. En futuros trabajos, se espera que este problema disminuya con la obtención de nuevos datos, producto de la colaboración entre académicos de nuestra universidad con la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

7.16. Propuestas de mejora analizadas

Como parte del proyecto de investigación, en el cual se desarrolló este escrito, ya se llevó a cabo anteriormente algunas propuestas de mejora al proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos, el cual, fue documentado en una tesis de licenciatura por Martínez (2021).

Tabla 104. Propuestas de mejora (Martínez, 2021)

Proceso	Propuesta	Objetivo de la propuesta
Selección de celdas	Apoyo al proceso mediante teléfono celular con identificación de color y luz fija.	Disminución de tiempo de inspección para eliminar cuello de botella.
Soldadura automatizada	Instalación de segunda máquina	Eliminar cuello de botella
Inspección y encapsulado	Agregar otra mesa de trabajo	Eliminar cuello de botella
	Considerar el tiempo de inspección como un KPI	Medir eficiencia del proceso, mantener balance de línea y motivara los empleados a disminuir el tiempo
Embalaje	Aplicar propuestas de SMED	Mantener inventarios de productos terminados sin embalaje, en 0
	Añadir Poka Yokes simples al proceso.	Mantener la propuesta SMED
Generales	Negociación con proveedores sobre cantidades de tonos límite en los lotes	Disminución de tiempo de inspección para eliminar cuello de botella

	Identificación y negociación con proveedores clave de celdas que cumplan con características de calidad	Disminuir cantidad de celdas rotas y necesidad de proceso de inspección
	Capacitación y campaña de sensibilización sobre el cuidado del manejo de celdas y paneles	Disminuir cantidad de celdas rotas y necesidad de proceso de inspección
	Mantener correcto el inventario de seguridad	Disminuir uso innecesario de suelo y MUDA por inventario
	Uso de Kanban en los procesos	Mantener el balance de línea y disminuir inventarios

Tabla 105. Comparación de tiempos medidos vs tiempo estimado a partir de las propuestas (Martínez, 2021)

Proceso	Tiempos medidos por estación	Tiempos estimados de propuestas	Unidades	# EN
Selección de celdas	2.41475	3.8	min/lote	1
Soldadura Automatizada	6	6	min/panel	2
Inspección y encapsulado	35	16	min/panel	4
Electroluminiscencia	1	1	min/panel	1
Laminación	17	17	min/panel	6
Ensamble final	4.3449	4.3449	min/panel	3
Simulación solar	5	5	min/panel	1
Embalaje	0.77	0.3958	min/panel	1

* EN: Estaciones de trabajo nuevas, de acuerdo con la propuesta

A partir de las propuestas de la Tabla 104, Martínez (2021) calculó los tiempos estimados para cada una de las etapas del proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos mejorado de la Tabla 105, en donde se observa que fue posible reducir el tiempo de la etapa de inspección y encapsulado de 35 minutos a 16 minutos, y de embalaje de 0.77 minutos a 0.3958 minutos. El tiempo de selección de celdas aumentó de 2.41475 minutos a 3.8 minutos.

La disminución significativa del tiempo de inspección y encapsulado fue gracias a que las propuestas sugirieron abrir una nueva estación de trabajo y hacer más eficiente la selección de celdas. El aumento de la eficiencia de la selección de celdas se debió al uso de una aplicación de teléfono celular con identificación de color y a la instalación de una fuente de luz fija en esa zona de trabajo. Una selección de celdas eficiente permitió trabajar con celdas de mejor calidad, por lo cual, se redujo el tiempo invertido en la corrección de defectos durante la inspección. La estación de trabajo adicional, por su parte, permitió eliminar el cuello de botella que se tenía en el proceso de inspección y encapsulado.

El tiempo de embalaje disminuyó debido a las propuestas SMED y a los Poka Yokes sugeridos. Las propuestas SMED consistieron en asignar más actividades a un operario de esta etapa (que normalmente se encontraba desocupado), dividir las tareas de colocar el fleje entre todos los operarios de la etapa y acercar tanto las herramientas como las materias primas a los operarios por medio de un carrito con compartimientos y ruedas para eliminar diferentes tiempos de transporte. Por su parte, el Poka Yoke que se propuso en la etapa de embalaje fue una señalización en el suelo que indicaba la zona de trabajo del proceso. Esta señalización ayudaría a mantener el nuevo proceso y a recordar tener los elementos necesarios para el embalaje cerca de la zona delimitada.

El aumento en el tiempo de selección de celdas fue provocado por el incremento en el número de celdas fotovoltaicas compradas para cubrir la demanda mensual de paneles fotovoltaicos. Esta demanda mensual, antes del proceso mejorado, no se lograba alcanzar por la empresa, por lo que, el lote de celdas importadas que pasaba a la etapa de selección era menor y el tiempo que se requería para esta actividad también era más corto.

Tabla 106. Celdas rotas por proceso en 1 m2 de panel fotovoltaico manufacturado (Martínez, 2021)

Proceso	Número de celdas rotas escenario base	Número de celdas rotas en el escenario propuesto
Selección de celdas	16.1394	0.7261
Soldadura Automatizada	1.0177	0.0544
Inspección y encapsulado	4.9511	3.0245
Electroluminiscencia	0.9633	0
Laminación	1.0722	0.1089
Ensamble final	0.9633	0
Simulación solar	0.9815	0.0182
Embalaje	0.9633	0

La Tabla 106 muestra la disminución de las celdas rotas por metro cuadrado de panel fotovoltaico durante cada una de las etapas del proceso mejorado a partir de las propuestas. Con base en los datos de esta Tabla 106, el número total de celdas rotas en el escenario base es de 27.0518 y el número total de celdas rotas en el escenario propuesto es de 3.9321, por lo que el número de celdas rotas se redujo en un 85.46% en el proceso mejorado.

Tabla 107. Resultados de categorías de impacto obtenidos en el escenario base y propuesto (Martínez, 2021)

Categoría	Resultado escenario base	Resultado propuesto	Unidad	Porcentaje de impacto reducido
Cambio climático	357.4876	293.673	kg CO2 al aire	17.85%
Ecotoxicidad terrestre	5.6896	0.8340	kg 1.4-DCB a suelo industrial	85.34 %
Ecotoxicidad agua dulce	2.6867	2.367	kg 1.4- DCB a agua dulce	11.90%
Eutrofización de agua dulce	0.1081	0.107	kg P a agua dulce	0.83%
Agotamiento del ozono	4.45E-05	3.32E-05	kg CFC-11 al aire	9.62%
Toxicidad humana	28.2422	23.722	kg 1.4- DCB a aire urbano	16.00%
Uso de suelo urbano	26667	2.525	m2 x año de tierra de cultivo anual	5.31%
Uso de suelo de agricultura	15.4488	15.249		1.29%
Acidificación terrestre	1.2352	1.005	kg SO2 al aire	18.57%
Formación de oxidantes fotoquímicos	1.4545	1.110	kg NMVOC al aire	23.65%
Material particulado	0.65664	0.565	kg PM10-eq al aire	13.96%

La Tabla 107 muestra la disminución de los impactos ambientales del proceso mejorado a partir de las propuestas en 11 categorías de impacto. Estos datos indican que hay una relación entre la optimización del proceso de manufactura de paneles fotovoltaicos (reducir tiempos, materias primas, residuos, etc.) y la disminución de sus impactos ambientales.

Las categorías de impacto que presentaron una reducción de impactos mayor son: Ecotoxicidad terrestre (-85.34% impactos), Creación fotoquímica de oxidantes (-23.65% impactos) y Acidificación terrestre (-18.57% impactos). Los impactos de Ecotoxicidad terrestre bajaron considerablemente debido a la reducción de los residuos de celdas rotas, lo que en consecuencia supone una disminución de las emisiones de plata que forman parte de estas celdas. La categoría de Acidificación terrestre presentó esta reducción de impactos ambientales, en mayor parte, gracias a que disminuyeron las emisiones al aire de NOx y SOx provocadas por el transporte de materias primas. Por ejemplo, en la etapa de inspección se necesitó menor cantidad de soldadura de estaño importada para la corrección de defectos.

8. Conclusiones

Al final de este trabajo, que tenía como principal objetivo identificar, a través de la realización de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con base en los datos recolectados de la industria fotovoltaica mexicana, aquellos procesos o materias primas de la manufactura de paneles solares que provocan mayores impactos ambientales; es posible concluir que el presente escrito contiene información que bien puede satisfacer su propósito.

Para conocer la situación actual de la industria fotovoltaica en México, durante el proyecto de investigación se realizaron dos visitas a distintas plantas y se documentó el proceso observado. Además, se realizó una investigación documental sobre el proceso productivo de paneles fotovoltaicos para así conjuntar toda la información y de este modo llegar a un proceso base para realizar un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y que pudiera modelarse en un software de ACV. Gracias a este modelo, durante la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) fue posible contrastar cuatro diferentes tratamientos de residuos y así brindar una visión más completa de los impactos ambientales provocados por este tipo de industria, independientemente de la disposición final que reciban sus residuos. De esta forma fue que, empleado una herramienta como el ACV y otros recursos como la base de datos Ecoinvent 3.8, tras la EICV se obtuvo resultados sobre el impacto ambiental de la manufactura de paneles solares como los siguientes.

Con base en lo presentado en este escrito, la parte del proceso que mayores impactos genera a los ecosistemas y a la salud humana (en general) es la operación de enmarcado, debido a los residuos de aluminio que resultan de la operación de corte para ajustar los marcos a la medida del panel fotovoltaico. Los residuos de aluminio de esta etapa, que en todos los escenarios comparados están siendo mandados a reciclaje, tiene un impacto ambiental que abarca entre el 0.8763% y el 0.8993% para los ecosistemas y el 0.0038% y el 0.068% para la salud humana, de los impactos totales de todos los escenarios analizados. Después, se identificó que la etapa de reparación de manual, que algunos encapsulados necesitan antes de ser laminados (como aquellos con celdas rotas o que no pasaron la prueba de electroluminiscencia), es la segunda parte del proceso que tiene mayores impactos ambientales, ya que los residuos de EVA y TPT que surgen durante estas operaciones son los causantes de entre el 0.0129% y el 0.064% para los ecosistemas y el 0.0018% y el 0.1912% para la salud humana.

Como fue posible observar, el porcentaje de participación de los residuos y emisiones de las diferentes etapas en los impactos ambientales totales de la manufactura de paneles fotovoltaicos fueron modestos en comparación con los porcentajes de aportación de los impactos de las materias primas que, en conjunto, algunas de ellas llegaban a alcanzar órdenes del 90%, pudiendo convertirse así en materias primas clave, cuya especial atención provocaría una disminución considerable en los impactos ambientales globales de la producción de paneles fotovoltaicos. Se sugiere que, en un proceso mejorado, y como parte de un trabajo futuro, se busquen y evalúen alternativas tecnológicas para la producción de estas materias primas, que permitan una reducción o mejor gestión del uso tanto de la energía como de sus emisiones y recursos naturales; también se podría valorar el empleo de materias primas para la manufactura de paneles

fotovoltaicos distintas a las comunes, cuya producción y posterior descarte reduzca los posibles daños al medio ambiente del proceso total o en otro caso, concebir otros métodos para asegurar que durante las etapas del proceso de manufactura, las materias primas sean utilizadas eficientemente.

Las materias primas identificadas, cuya producción provocó mayores impactos ambientales, fueron: celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, $AlMg_3$, vidrio templado de bajo contenido de hierro, soldadura de plomo estañado y TPT. Los datos muestran que la producción de celdas fotovoltaicas es especialmente preocupante ya que su proceso productivo está provocando entre el 74.23% y el 76.18% de todos impactos al ecosistema y entre el 49.53% y el 88.20% de todos los impactos a la salud humana, independientemente del tratamiento de residuos empleado. A esta materia prima le sigue la producción de aluminio que está provocando entre 16.75% y el 17.19% de todos impactos al ecosistema y entre el 4.06% y el 7.23% de todos los impactos a la salud humana.

Así mismo, gracias a la EICV fue posible ver que, en la manufactura de paneles fotovoltaicos la mayor parte de los impactos ambientales a largo plazo a los ecosistemas afectan al agua dulce (sobre todo agua subterránea) al aumentar, más que nada su ecotoxicidad por la emisión de diversas sustancias contaminantes, de entre las cuales se destaca el aluminio, que tiene un 76.52% de aportación a la categoría de impacto *Freshwater ecotoxicity, long term*. Mientras que la mayor parte de los impactos provocados a la salud humana a largo plazo se relacionan con la toxicidad a la que se dejará expuesta a las poblaciones (sin ser tan destacados los detonantes de cáncer), sobre todo por la posible emisión de plata en suelos agrícolas, la cual tiene un 57.02% de aportación a la categoría de impacto *Human toxicity non-cancer, long term*.

También el EICV mostró que la disposición a relleno sanitario no controlado es el tratamiento de residuos que más impacta tanto a los ecosistemas como a la salud humana, mientras que la disposición a relleno sanitario controlado es el tratamiento con menores impactos a la salud humana y la disposición a reciclaje el tratamiento con menor impacto para el medio ambiente. Por su parte, la incineración, a pesar de no ser el tratamiento con mayores impactos a los ecosistemas o a la salud humana, en varias categorías de impacto resultó ser el escenario cuyos impactos ambientales superaron a los demás tratamientos (10 de 14 categorías). De cualquier modo, se advirtió que, en la gran mayoría de las categorías, la diferencia entre el tipo de tratamiento con los mayores impactos ambientales y los menores impactos era casi imperceptible. Quizá esto podría hacer dudar si el tipo de tratamiento al que son llevados los residuos de la manufactura influye poco en su desempeño ambiental y que independientemente el que sea elegido, los resultados del EICV no variarían mucho; sin embargo, la falta de base de datos para algunos escenarios analizados no hace posible confirmarlo.

Ahora bien, se cree que los resultados de este ACV podrían ser mejorados y reflejar aún más el contexto nacional con la utilización de una base de datos mucho más actualizada y elaborada específicamente para México, en donde se hagan mediciones, como de consumo energético y emisiones, directamente en el tipo de tecnología promedio que se podría encontrar en el país. Es posible que el acceso a este tipo de datos haga

posible la obtención de resultados aún más contundentes sobre el impacto ambiental que representa no sólo esta industria, sino de cualquier otra del país que sea sometida a la elaboración de un ACV en el futuro.

Finalmente, si bien, no fue posible realizar cambios en los procesos observados durante las visitas, por lo que no se pudo generar datos que permitieran comprobar la disminución o el aumento de los impactos ambientales del proceso una vez aplicados. Se espera que la información y los resultados de la investigación plasmados en este escrito, así como lo que se obtendrá en futuras colaboraciones, sean aprovechados en aras de mejorar los procesos y operaciones de la industria fotovoltaica mexicana, al igual que en la toma de mejores decisiones en cuanto a la gestión de su materia prima y sus residuos, para disminuir cada vez más sus impactos ambientales que permita una transformación energética sostenible, similar a la que está en tendencia en otros países y a la que se puede esperar que México también se sume.

9. Anexos

9.1. Impacto en el ecosistema y la salud humana por residuo de la manufactura de paneles fotovoltaicos

TREATMENT	WASTES	aluminium alloy, AlMg3	solar glass, low-iron	paper	paperboard	plastic, mixture (for modelling EVA)	polyethylene terephthalate (from TPT)	polyethylene (from packaging)	polypropylene (from packaging)	polyvinylfluoride (from TPT)	TOTAL
BURNING	TOTAL IMPACTS FOR THE %	33.3745	0.002196	1.6904	3.5889E-06	0.1414	0.04916	1.6359E-05	4.4933E-05	0.3336	35.5913
	CONTRIBUTION	0.8983%	0.0001%	0.0455%	0.00000001%	0.0038%	0.0013%	0.00000004%	0.0000012%	0.0090%	0.9580%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN %	9.22185E-08	1.07952E-09	1.65304E-08	3.98347E-12	2.47798E-07	1.3399E-07	4.36189E-11	1.19677E-10	4.39033E-07	9.30817E-07
	CONTRIBUTION	0.0068%	0.0001%	0.0012%	0.00000003%	0.0183%	0.0099%	0.0000003%	0.0000009%	0.0324%	0.0687%
RECYCLING	TOTAL IMPACTS FOR THE %	33.3744949	0.05707001	4.04678E-05	6.76046E-06	0.00098385	0.000254531	1.153E-05	NO DATABASE	NO DATABASE	33.43286205
	CONTRIBUTION	0.8983%	0.0015%	0.0000011%	0.00000018%	0.00003%	0.00001%	0.0000003%	NO DATABASE	NO DATABASE	0.8999%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN %	9.22185E-08	3.20527E-10	1.75127E-11	3.67442E-12	3.2754E-10	4.9975E-11	5.36494E-12	NO DATABASE	NO DATABASE	9.29431E-08
	CONTRIBUTION	0.0068%	0.00002%	0.0000013%	0.00000003%	0.00002%	0.000004%	0.0000004%	NO DATABASE	NO DATABASE	0.0069%
SANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE %	33.3744949	0.001171313	2.293141692	3.90484E-06	0.076570308	0.014463608	4.40014E-06	1.21774E-05	NO DATABASE	35.75986623
	CONTRIBUTION	0.8983%	0.00003%	0.0617%	0.00000011%	0.0021%	0.0004%	0.00000012%	0.0000003%	NO DATABASE	0.9625%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN %	9.22185E-08	5.96635E-10	1.54543E-08	2.24587E-12	7.11636E-09	2.51521E-09	8.46279E-13	2.43155E-12	NO DATABASE	1.17907E-07
	CONTRIBUTION	0.0068%	0.00004%	0.0011%	0.00000017%	0.0005%	0.0002%	0.00000006%	0.00000018%	NO DATABASE	0.0087%
UNSANITARY LANDFILL	TOTAL IMPACTS FOR THE %	33.3744949	0.000140049	0.480518722	8.70682E-07	0.009850657	0.00316262	8.60592E-07	2.37825E-06	NO DATABASE	33.86817105
	CONTRIBUTION	0.8983%	0.000004%	0.0129%	0.00000002%	0.0003%	0.0001%	0.00000000%	0.0000001%	NO DATABASE	0.9116%
	TOTAL IMPACTS FOR THE HUMAN %	9.22185E-08	2.14884E-07	1.25315E-06	1.55963E-10	8.14992E-07	5.52299E-07	1.2356E-10	3.38899E-10	NO DATABASE	2.92816E-06
	CONTRIBUTION	0.0068%	0.0159%	0.0925%	0.00000115%	0.0601%	0.0407%	0.0000009%	0.000025%	NO DATABASE	0.2160%

9.2. Cantidad de flujos elementales emitidos por proceso representativo y tipo de tratamiento de residuos durante la fabricación de paneles fotovoltaicos

TREATMENT	TYPE OF DISCHARGE & REPRESENTATIVE PROCESSES	FLOW IMPACT CONTRIBUTIONS (kg)											
		Aluminum Emission to ground water, long-term (kg)	Carbon dioxide, fossil Emission to air low population density (kg)	Carbon dioxide Emission to air low population density (kg)	Transformation, to mineral extraction site Resource land (m2)	Water, well, in ground Resource in water (m3)	Carbon-14 Emission to air low population density (kBq)	Water, river Resource in water (m3)	Lead Emission to air high population density (kg)	Particulates, < 2.5 um Emission to air low population density (kg)	Radon-222 Emission to air low population density, long- term (kBq)	Methane tetrahydro-, R-10 Emission to air high population density (kg)	Nitrogen oxides Emission to air low population density (kg)
BURNING	Packaging Discharge	6,76344E-07	7,61515E-07	1,86668E-09	4,88736E-10	2,23014E-09	7,25232E-08	6,40547E-13	4,99457E-10	2,20654E-05	7,87899E-14	1,28444E-09	
	EVA & TPT Discharge	0,000797315	0,005773335	9,68529E-06	3,295E-06	9,98475E-06	0,000701214	2,0929E-09	2,83193E-06	0,153918579	6,89915E-10	7,22531E-06	
	Lamination Discharge	9,7435E-07	7,85572E-05	3,30118E-07	1,7338E-07	2,86412E-07	1,91301E-06	5,43836E-06	4,67169E-11	0,003382754	4,24299E-12	2,44781E-07	
	Solar glass Discharge	2,3094E-11	2,14927E-09	1,33051E-11	7,68443E-12	1,11613E-11	8,47899E-11	1,02146E-11	4,18197E-16	3,00445E-12	1,23845E-07	1,00781E-17	9,82973E-12
	Aluminum alloy (AlMg3) Recycling	0,000194473	0,006364828	4,24691E-05	1,95747E-06	1,36696E-05	4,61292E-05	4,4168E-05	9,68136E-10	7,16606E-06	0,303264038	2,47995E-11	1,86833E-05
	TYPE OF DISCHARGE SUBTOTAL=	0,0009934	0,012175	5,249E-05	5,42633E-06	2,3943E-05	8,0173E-05	0,000750893	3,10839E-09	1,00757E-05	0,46058756	7,19036E-10	2,61547E-05
	Packaging Discharge	1,86552E-08	1,23835E-06	6,15131E-09	1,32715E-09	3,22762E-09	2,71571E-08	7,67506E-13	1,80235E-09	6,8229E-05	4,32839E-15	4,45944E-09	
	EVA & TPT Discharge	1,06154E-07	0,000554129	4,2619E-06	1,7517E-07	6,3813E-08	3,42167E-06	7,63786E-08	3,52516E-12	3,42338E-05	0,001753508	1,06716E-13	3,67902E-07
	Lamination Discharge	2,42886E-05	6,55096E-05	2,56326E-07	4,37043E-08	1,56314E-06	8,79036E-07	2,63494E-07	6,63616E-12	8,5846E-08	0,004995937	1,77477E-12	1,82208E-07
	Solar glass Discharge	1,14844E-09	1,95955E-09	6,28614E-12	1,21343E-12	3,91791E-12	2,21295E-11	7,61269E-12	1,3781E-16	2,65733E-12	1,18498E-07	1,53657E-18	5,11065E-12
	Aluminum alloy (AlMg3) Recycling	0,000194473	0,006364828	4,24691E-05	1,95747E-06	1,36696E-05	4,61292E-05	4,4168E-05	9,68136E-10	7,16606E-06	0,303264038	2,47995E-11	1,86833E-05
	TYPE OF DISCHARGE SUBTOTAL=	0,0002189	0,0069857	4,699E-05	2,17767E-06	1,52998E-05	5,0457E-05	4,45129E-05	9,79065E-10	4,14875E-05	0,30948543	2,66853E-11	1,92379E-05
SANITARY LANDFILL	Packaging Discharge	9,20244E-07	1,37781E-06	7,9705E-09	1,0385E-09	2,54459E-09	1,49878E-08	1,15047E-13	1,74833E-09	8,53312E-05	1,253E-15	2,76432E-09	
	EVA & TPT Discharge	0,00096343	0,00165317	7,70113E-06	1,28101E-06	2,86944E-06	1,72926E-05	5,62117E-06	1,74555E-06	0,087145684	1,40842E-12	2,98415E-06	
	Lamination Discharge	3,42382E-07	4,31659E-05	1,90803E-07	1,3961E-07	1,71547E-07	1,3613E-06	2,54889E-07	5,6479E-12	0,001465461	7,88266E-14	1,37871E-07	
	Solar glass Discharge	6,27337E-12	1,12256E-09	8,26842E-12	6,22792E-12	7,49218E-12	6,03603E-11	1,1042E-11	2,4507E-16	5,94949E-08	3,48497E-18	6,01806E-12	
	Aluminum alloy (AlMg3) Recycling	0,000194473	0,006364828	4,24691E-05	1,95747E-06	1,36696E-05	4,61292E-05	4,4168E-05	9,68136E-10	7,16606E-06	0,303264038	2,47995E-11	1,86833E-05
	TYPE OF DISCHARGE SUBTOTAL=	0,0011592	0,0082625	5,037E-05	3,37913E-06	1,67131E-05	6,4798E-05	5,00493E-05	1,09939E-09	8,94099E-06	0,391958574	2,6288E-11	2,18081E-05
	Packaging Discharge	8,51841E-11	2,73102E-07	4,76103E-09	1,40566E-10	5,12071E-11	2,74574E-09	6,12905E-11	2,82879E-15	3,66502E-08	1,40711E-06	8,5635E-17	3,20707E-10
	EVA & TPT Discharge	1,06154E-07	0,000554129	4,2619E-06	1,7517E-07	6,3813E-08	3,42167E-06	7,63786E-08	3,52516E-12	3,42338E-05	0,001753508	1,06716E-13	3,67902E-07
	Lamination Discharge	1,21436E-08	1,51774E-05	4,51995E-08	2,00387E-08	7,29994E-09	3,94235E-07	8,7374E-09	4,03264E-13	3,37974E-08	0,000200594	1,22079E-14	2,93773E-08
	Solar glass Discharge	5,42374E-13	2,14776E-10	1,93694E-12	8,9494E-13	3,26039E-13	1,74823E-11	3,90241E-13	1,80111E-17	2,0986E-13	8,95919E-09	5,45244E-19	1,90814E-12
	Aluminum alloy (AlMg3) Recycling	0,000194473	0,006364828	4,24691E-05	1,95747E-06	1,36696E-05	4,61292E-05	4,4168E-05	9,68136E-10	7,16606E-06	0,303264038	2,47995E-11	1,86833E-05
	TYPE OF DISCHARGE SUBTOTAL=	0,0001946	0,0069344	4,678E-05	2,15282E-06	1,37408E-05	4,9945E-05	4,42532E-05	9,72067E-10	4,14703E-05	0,305219556	2,49185E-11	1,90809E-05
ALL TREATMENT	aluminum alloy, AlMg3 polyvinylfluoride, film	0,011799523	2,399491616	0,009480015	0,000384145	0,005169799	0,018627202	0,012948711	1,99615E-07	0,002571904	0,002571904	0,00467316	
	photovoltaic cell, single-Si wafer	0,964941257	149,9161652	0,378180753	0,203207753	0,527673967	0,899524997	2,693242441	0,000887153	0,185241181	11694,83338	1,05944E-05	
	photovoltaic cell, single-Si wafer	0,014061351	1,096245668	0,006131374	0,002691728	0,02841233	0,004712942	6,00518E-07	0,001273037	104,237808	2,50607E-09	0,003978907	
	photovoltaic cell, single-Si wafer	0,038408126	0,363746392	0,002772929	0,000181809	0,001146603	0,002540432	0,001319608	1,73919E-07	0,004740231	28,0267888	5,34553E-09	
	solder bar, Sn63Pb37	1,1517185	167,64172	0,4486028	0,028568778	0,589656428	0,99785988	2,760413328	0,000690311	0,206633179	12706,17709	1,06051E-05	
	REPRESENTATIVE PROCESSES SUBTOTAL	1,1517185	167,64172	0,4486028	0,028568778	0,589656428	0,99785988	2,760413328	0,000690311	0,206633179	12706,17709	1,06051E-05	0,384927908

10. Referencias

- Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., & Crettaz, P. (2015). *Environmental Life Cycle Assessment*. London, United Kingdom: CRC Press.
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Germany: Wiley.
- Yılmaz, U., Tutus, A., & Sönmez, S. (2021). An overview of the waste paper recycling system. En İ. Daşdemir, *Current Studies in Agriculture, Forestry and Aquaculture Sciences* (Primera ed., págs. 49-65). Ankara, Turquía: Duvar Publishing.
- Atasu, A., Duran, S., & Van Wassenh, L. N. (18 de Junio de 2021). *The Dark Side of Solar Power*. Obtenido de Harvard Business Review: <https://hbr.org/2021/06/the-dark-side-of-solar-power>
- Azevedo, L. B., Chaudhary, A., Cosme, N., de Baan, L., Fantke, P., Hauschild, M., . . . Vieira, M. (13 de Noviembre de 2020). *LC-IMPACT Version 1.0*. Obtenido de LC-IMPACT: https://lc-impact.eu/doc/LC-IMPACT_Overall_report_20201113.pdf
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuill, M. J., Manzardo, A., . . . Pfister, S. (2017). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 368–378.
- Boulay, A.-M., Bourgault, G., Bulle, C., Cao, V., De Bruille, V., Fantke, P., . . . Shaked, S. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1653–1674. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. (31 de Octubre de 2014). Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.pdf
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (06 de Junio de 2023a). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (08 de Mayo de 2023b). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Ciroth, A., Di Noi, C., Lohse, T., & Srocka, M. (Febrero de 2020). *openLCA 1.10 - Comprehensive User Manual*. Obtenido de openLCA: https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/02/openLCA_1.10_User-Manual.pdf

- Climate Watch. (2021). *Historical GHG Emissions*. Obtenido de Climate Watch: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2020&start_year=1990
- Dhondt, F., & Muthu, S. S. (2021). *Hemp and Sustainability*. Singapur: Springer Nature Singapore.
- Doka, G. (2009). *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report*. Dübendorf: Swiss Centre for Cycle Inventories.
- Ecoinvent. (15 de Julio de 2020a). *ecoinvent Database*. Obtenido de ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- Ecoinvent. (25 de Septiembre de 2020b). *Market Activities*. Obtenido de ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/market-activities/>
- Ecoinvent. (25 de Septiembre de 2020c). *Geographies*. Obtenido de ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/geographies/>
- Ecoinvent. (25 de Septiembre de 2020d). *System Models*. Obtenido de ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- Ecoinvent. (25 de Septiembre de 2020e). *Activities & Products*. Obtenido de ecoinvent: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/activities-products/>
- European Commission. (14 de Septiembre de 2020). *European Platform on Life Cycle Assessment (LCA)*. Obtenido de European Commission website: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>
- GreenDelta. (2020). *openLCA 1.10 - Basic Modelling of a Plastic Bottle*. Berlin: GreenDelta GmbH. Obtenido de https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/01/GreenDelta-Bottle-Tutorial_1.10.pdf
- GreenDelta. (2022). *openLCA – the Life Cycle and Sustainability Modeling Suite*. Obtenido de openLCA: <https://www.openlca.org/openlca/>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., . . . Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, 45, 1, 90–96. doi:<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101316v>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2017). *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Germany: Springer International Publishing.
- Herrero, R. (25 de Mayo de 2016). *Posicionamiento eficiente de módulos fotovoltaicos en plantas solares no ambiente urbano*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Figura-80-Simulador-Solar-Spi-Sun-Simulator-4600SLP-da-SPIRE_fig57_305651683
- IMPACT World+. (2019c). *IMPACT World+ Team*. Obtenido de IMPACT World+: <https://www.impactworldplus.org/en/team.php>

- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA.
- Jorgensen, S. E. (2020). *A Systems Approach to the Environmental Analysis of Pollution Minimization*. United States: CRC Press.
- JRC-IES. (2010). *European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* (Primera ed.). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Jungbluth, N., Stucki, M., & Frischknecht, R. (2009). Photovoltaics. En R. Dones, C. Bauer, R. Bolliger, M. Faist Emmenegger, R. Frischknecht, T. Heck, . . . A. Röder, *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. ecoinvent report No. 6-XII*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- López Camacho, S. (2018). *Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla. (Tésisi de maestría)*. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Martínez Juárez, M. X. (2021). *Propuesta de reducción de impacto ambiental en una empresa de ensamble de paneles solares. tesis de licenciatura*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Meyer Burger India. (2023). *Module Inspection System*. Obtenido de IndiaMART: <https://www.indiamart.com/proddetail/module-inspection-system-20780094273.html>
- Mondragon Assembly. (2022). *Laminadores, Máquinas individuales*. Obtenido de Mondragon Assembly: <https://www.mondragon-assembly.com/es/solar-automation-solutions/maquinas-individuales/laminators/>
- openLCA. (2022). *IMPACT World+*. Obtenido de openLCA Nexus: <https://nexus.openlca.org/database/IMPACT%20World%2B>
- Organización Internacional de Normalización. (21 de Agosto de 2012). *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. Obtenido de ISO - Online Browsing Platform (OBP): <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Pati, S. N. (2022). *Life Cycle Assessment: Future Challenges* (First ed.). United States: CRC Press.
- Pauliuk, S. (12 de Junio de 2021). *IEooc_Methods4_Exercise 8: LCA with openLCA: Waste treatment, recycling, and allocation*. Obtenido de Industrial Ecology Freiburg - University of Freiburg: https://www.industrialecology.uni-freiburg.de/Content/IEooc_Methods4_Exercise8_Recycling_Allocation_Solution.pdf
- Rajkumar, A., Parameswaranpillai, J., Mavinkere, S., & Siengchin, S. (2021). *Recent Developments in Plastic Recycling* (Primera ed.). Singapur: Springer.

- Satpathy, R. K., & Pamuru, V. (2020). *Solar PV Power: Design, Manufacturing and Applications from Sand to Systems*. London: Academic Press.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (23 de Junio de 2006). NOM-052-SEMARNAT-2005. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/DO2282.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1 de Febrero de 2013). NOM-161-SEMARNAT-2011. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>
- Secretaria del Medio Ambiente. (19 de Octubre de 2020). NADF-019-AMBT-2018. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Obtenido de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/Gaceta454_Aviso_NADF-019-AMBT-2018.pdf
- Solarview. (24 de Noviembre de 2021). *COMO FABRICAR UN PANEL FOTOVOLTAICO*. Obtenido de SOLARVIEW PRO: <https://solarview.mx/como-fabricar-un-panel-solar-paso-a-paso/>
- Spindler, C., & Ciroth, A. (2022). *ecoinvent 3.9.1 in openLCA*. Berlin, Germany: GreenDelta.
- Teamtechnik. (20 de 01 de 2022). *STRINGER TT2100 i8*. Obtenido de Team Technik Production Technology: <https://www.teamtechnik.com/en/new-energy/stringer-systems/solar-stringer-tt2100-i8>
- United Nations. (4 de Agosto de 2021). *What Is Climate Change?* Obtenido de United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- Urbina, A. (2022). *Sustainable Solar Electricity*. Pamplona, España: Springer.
- Vázquez Ramírez, V., Hernández Padilla, F., Borja, V., & Vargas González, D. (2023). Residuos de procesos de manufactura manual y automatizada de módulos. *MEMORIAS DEL XXIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 2-3.
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., . . . Wernet, G. (2013). *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3)*. St. Gallen: The ecoinvent Centre.