

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería Ambiental

CÁLCULO DEL POTENCIAL DE AGOTAMIENTO ABIÓTICO. APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR.

Autora: María Rodríguez Pérez

Tutor: Prof. José Fernando Vidal Barrero y
Bernabé Alonso Fariñas

Tutor externo: José Caraballo Bello

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental



**CÁLCULO DEL POTENCIAL DE
AGOTAMIENTO ABIÓTICO. APLICACIÓN A
LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A
PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR.**

Autora:

María Rodríguez Pérez

Tutor:

Prof. José Fernando Vidal Barrero

Bernabé Alonso Fariñas

Tutor externo:

Tutor externo: José Caraballo Bello

Curso 2018/2019

Sevilla, 24 de noviembre de 2019

Proyecto Fin de Carrera: CÁLCULO DEL POTENCIAL DE AGOTAMIENTO ABIÓTICO. APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR.

Autor: María Rodríguez Pérez

Tutor: Prof. José Fernando Vidal Barrero y
Bernabé Alonso Fariñas

Tutor externo: José Caraballo Bello

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

En Sevilla, 24 noviembre de 2019

El Secretario del Tribunal

AGRADECIMIENTOS

Como agradecimiento, me gustaría expresar mi gratitud a mi tutor del Trabajo Fin de Máster, el profesor José Fernando Vidal Barrero y a José Caraballo Bello, por la implicación, dedicación y supervisión durante estos meses.

A mi familia, por ser el pilar fundamental donde he construido todos y cada uno de mis logros, a mis amigos por motivarme a crecer y creer en mí.

RESUMEN

El debate sobre la criticidad de los recursos ha revivido la discusión sobre cómo evaluar su uso y agotamiento por parte de la sociedad. La Comunidad de Evaluación de Impacto en ACV ha revisado diferentes modelos de caracterización para el agotamiento de recursos abióticos (ADP).

El agotamiento de los recursos abióticos es una categoría de impacto muy discutida en la evaluación del ciclo de vida (ACV). La razón es que el problema se puede definir de diferentes maneras.

En este TFM se reflexionarán sobre los supuestos que se hicieron al desarrollar el ADP y sobre posibles futuros desarrollos. Se describirán las consideraciones, opciones y elecciones finales realizadas desde el momento del desarrollo original en 1995 hasta sus últimas actualizaciones. Así como el mejor método actual elegido para su cálculo, el considerado por el Manual Holandés de ACV.

Tras realizar un análisis de los procesos de obtención del bioetanol, utilizaremos el parámetro ADP como categoría de impacto para determinar la repercusión medioambiental de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, determinando cuál es el proceso que obtiene mayores impactos en el agotamiento de los recursos abióticos y proponiendo medidas para su reducción.

Para desarrollar el Cálculo del ADP para el proceso de obtención de biodiésel a partir de caña de azúcar utilizaremos el software Simapro, a través de él se han podido obtener los ADP (de elementos y fósil) de los insumos utilizados durante el proceso de producción.

Tras realizar un análisis de los resultados con el software Simapro, se determinará que el proceso de producción de caña de azúcar (fase cultivo), en concreto el uso de pesticidas y fertilizantes, es el que más impacto tiene a la hora del cálculo del factor ADP para todo el proceso global de obtención de bioetanol.

ABSTRACT

The debate on the criticality of resources has revived the debate on how to evaluate its use and exhaustion by society. The ACV Impact Assessment Community has reviewed different characterization models for the depletion of abiotic resources (ADP).

The depletion of abiotic resources is a category of impact much discussed in the evaluation of the life cycle (LCA). The reason is that the problem can be defined in different ways.

In this TFM they will reflect on the assumptions that were made when developing the ADP and on possible future developments. The final considerations, options and choices made from the moment of the original development in 1995 until its latest updates will be described. As well as the current method for its calculation.

After conducting an analysis of the processes for obtaining bioethanol, we will use the ADP parameter as an impact category to determine the environmental impact of bioethanol production from sugarcane, determining which process has the greatest impact on depletion of abiotic resources and proposing measures to reduce them.

To develop the ADP Calculation for the process of obtaining biodiesel from sugarcane, the Simapro software has been used, through it the ADP (of elements and fossil) of the inputs used during the process of production.

After performing an analysis of the results with the Simapro software, it is determined that the sugarcane production process (cultivation phase) is the one that has the most impact when calculating the ADP factor for the entire process of obtaining bioethanol.

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Índice	VII
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Figuras	XII
Capítulo 1. Introducción y justificación del proyecto.	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo y Alcance	2
Capítulo 2. Modelos de caracterización para el ADP.	5
2.1. Definición del problema.....	5
2.2. Evaluación del agotamiento.....	6
2.3 Recursos naturales vs recursos en la economía	7
2.4. Tipos de reservas de recursos abióticos.....	8
2.5. Ecuaciones para el cálculo de los Factores de Caracterización (ADP)	10
2.6 Desarrollos posteriores a 2002.....	12
2.6.1 Actualización de las categorías de impacto por CML: Categoría de impacto ADP.	12
2.6.2. Actualización de valores ADP por CML.....	12
2.6.3. Actualización de los valores R y DR por otros.....	18
Capítulo 3. Nuevos enfoques en el agotamiento de los recursos abióticos en CMLIA	19
3.1. Agotamiento, escasez y criticidad	19
3.2. Reserva definitiva, base de reserva y reserva económica	20
3.3. Disponibilidad en sentido amplio, ADP basado en recursos de medio ambiente y economía.	20
3.4. Agotamiento de los recursos como un problema de dilución.....	21
Capítulo 4. ADP en la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar	25
4.1. Antecedentes.....	25
4.2. Introducción a la producción de bioetanol	26
4.3. El bioetanol y sus procesos de producción	27

4.3.1. Definiciones y características del bioetanol.	27
4.3.2. Materia prima y proceso de obtención del bioetanol.....	28
4.3.3. Subproductos de la obtención de bioetanol.	30
4.4. Producción de bioetanol a partir de caña de azúcar	31
4.4.1 Ventajas medioambientales del bioetanol a partir de caña de azúcar.	32
4.5. cálculo del agotamiento de recursos abióticos para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar (ADP)	33
4.5.1. Discusión de los resultados y posibles mejoras.....	38
4.5.2. Análisis de sensibilidad.....	39
Capítulo 5. Conclusiones.....	41
ANEXO I. Cálculo del factor de caracterización ADP	45
Anexo II. ADP para el proceso de producción de bioetanol	47
ANEXO III. Cálculo del ADP producción caña azúcar (Cultivo)	49
Referencias	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de reservas y definiciones (USGS, 2015)	8
Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de factores de caracterización para elementos (ADP).....	11
Tabla 3. ADP (kg de antimonio equivalente / kg extraído) para caracterizar el agotamiento de los recursos abióticos en función de las tasas de extracción y las reservas finales (año 1999).....	13
Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de factores de caracterización para combustibles fósiles ADP) . .	18
Tabla 5. Cultivos agrícolas utilizados para la producción de etanol y su rendimiento. (Bertogli G, et al. 2008).....	31
Tabla 6. Clasificación de las categorías de impacto según la metodología CML. UNIVERSIDAD DE DEUSTO, (2012).	33
Tabla 7. ADP elementos y ADP fósil para el proceso de producción de bioetanol. Datos obtenidos por Simapro (base de datos: Ecoinvent).....	35
Tabla 8. ADP elementos y ADP fósil para la producción de caña de azúcar. Datos obtenidos por Simapro (base de datos: Ecoinvent).....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concentración, presencia y distribución de varios recursos teóricos en la corteza terrestre	10
Figura 2. Parámetros relevantes para el modelo de agotamiento de recursos abióticos, reservas en economía y medio ambiente y extracción o emisión anual del recurso (adaptado de Oers, et al. 2002)	22
Figura 3. . Esquema general del proceso de obtención del bioetanol.	28
Figura 4. Vías en función de la molécula a partir de la que se sintetiza el etanol.	29
Figura 5. Esquema producción bioetanol.	30
Figura 6. Diagrama contribución en % de los procesos de obtención de bioetanol.	38

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

1.1 INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los recursos abióticos, conocido por sus siglas en inglés como ADP (Abiotic Depletion Potential) ha sido desde el comienzo del planteamiento del Ciclo de Vida, a partir de ahora ACV, una de las categorías de impacto más importantes.

Los recursos que nos ofrece la naturaleza forman parte del área que protege el SETAC WIA (Grupo de Trabajo de la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental en la Evaluación del Ciclo de Vida), y son parte fundamental del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). Sin embargo, el agotamiento de los recursos es una de las categorías de impacto más debatidas ya que no existe un método científicamente consensuado para obtener los factores de caracterización. Hay varias razones por la que ocurre esto (Guinée, et al. 1995):

- El agotamiento abiótico es un problema que se encuentra en la frontera entre el sistema económico y el sistema ambiental.
- Existen diversas formas de definir el problema del agotamiento de recursos, y todas pueden justificarse desde diferentes puntos de vista.
- Existen diversas formas de cuantificar este parámetro, y ninguna de ellas puede verificarse empíricamente, ya que todas dependen de la supuesta disponibilidad y demanda del recurso en el futuro y de las tecnologías futuras.

El debate social sobre cómo evaluar el agotamiento de recursos abióticos ha comenzado nuevamente en la actualidad. Esto se debe en parte al debate que está desarrollándose en la comunidad ACV. Véase por ejemplo “The International Reference Life Cycle Data System” (ILCD, 2010) y el PEF en Europa. El manual ILCD tiene como objetivo proporcionar una orientación para buenas prácticas de ACV en empresas y gobiernos. El desarrollo de ILCD fue coordinado por la Comisión Europea y se ha llevado a cabo en un amplio proceso de consulta internacional con expertos, partes interesadas, y público en general.

El debate sobre la criticidad de los recursos ha revivido el debate sobre cómo evaluar su uso y agotamiento por parte de la sociedad. En el contexto del manual de ILCD sobre ACV, la Comunidad de Evaluación de Impacto en ACV ha revisado diferentes modelos de caracterización para el agotamiento de recursos abióticos.

Los factores de caracterización para el ADP de los recursos definidos por Oers et al. (2002), en donde se establece una mejora de los factores de caracterización para el agotamiento abiótico de los recursos recomendados en el Manual holandés de ACV, y el propio manual (Guinée et al., 2002), se seleccionaron como el mejor método operativo disponible en la actualidad para el cálculo del agotamiento de recursos abióticos. Estos se basaron en las reservas finales, es decir, las concentraciones de los elementos y el carbono fósil en la corteza terrestre.

Sin embargo, al contrario de este método recomendado por el Manual Holandés de ACV (Guinée et al., 2002), el manual ILCD y el PEF adoptaron una versión del ADP que se calcula utilizando la reserva base en lugar de las estimaciones de las reservas finales, estas serán explicadas con más detenimiento a lo largo del Trabajo de Fin de Máster.

Es útil reflexionar sobre los supuestos que se hicieron al desarrollar el ADP y pensar sobre posibles futuros desarrollos. Este TFM tiene como objetivo describir las consideraciones, opciones y elecciones finales realizadas desde el momento del desarrollo original en 1995 hasta sus últimas actualizaciones.

1.2 OBJETIVO Y ALCANCE

El agotamiento de los recursos abióticos es una categoría de impacto muy discutida en la evaluación del ciclo de vida (ACV). La razón es que el problema se puede definir de diferentes maneras. Además, dentro de una definición de problema especificada, aún se pueden hacer muchas elecciones con respecto a qué parámetros incluir en el modelo de caracterización y qué datos utilizar.

En este Trabajo de Fin de Máster se ofrece una visión general de la definición del problema y las elecciones que se han hecho a lo largo de los años para definir el potencial de agotamiento abiótico (ADP) en ACV. Las actualizaciones de los ADP desde 2002 también se discuten. Se estudia el parámetro ADP y las metodologías existentes para su cálculo.

Se sugieren algunos posibles nuevos desarrollos de la categoría de impacto ADP, como redefinir el problema de agotamiento como un problema de dilución. Esto significa tener en cuenta las reservas en el medio ambiente y la economía en el parámetro “reserva de recursos” y usar las fugas de la economía, en lugar de la tasa de extracción, como un parámetro de dilución.

Por último, tras realizar un análisis de los procesos de obtención del bioetanol, utilizaremos el parámetro ADP como categoría de impacto para determinar la repercusión medioambiental de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar a través de un software comercial, Simapro, determinando cuál es

el proceso que obtiene mayores impactos en el agotamiento de los recursos abióticos y proponiendo medidas para su reducción.

CAPÍTULO 2. MODELOS DE CARACTERIZACIÓN PARA EL ADP.

La evaluación de Impacto del Ciclo de Vida, conocido por sus siglas en inglés como LCIA, es la fase en la cual el conjunto de los resultados presentes en el análisis de inventario, se procesa e interpresa en términos de impactos ambientales.

Los diferentes flujos elementales que contribuyen en una categoría de impacto han de ser determinados mediante factores de caracterización. Los factores de caracterización representan la contribución de una sustancia a una determinada categoría de impacto en relación a la sustancia de referencia en dicha categoría. Cada sustancia es multiplicada por su correspondiente factor de caracterización. De este modo se pueden obtener valores con unidades equivalentes, los cuales pueden ser sumados para medir la contribución de las sustancias a esa categoría de impacto.

2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Por lo tanto, la cuestión central abordada por el modelo de caracterización para el ADP es ¿cómo de grave es el agotamiento de un recursos natural en relación a otro recurso diferente?, y ¿cómo se puede expresar cada recurso en términos de factores de caracterización? El desarrollo del modelo requiere que se tomen muchas decisiones, que juntas enmarcan el problema en cuestión que se trata de resolver.

Cuando se realiza una evaluación ambiental, es discutible si el agotamiento abiótico de los recursos deber ser parte de esta evaluación. En el medio ambiente encontramos recursos que, una vez extraídos, son transformados en una sustancia útil para la humanidad. Es en este preciso momento donde el recurso pasa a tener un potencial económico. Después de todo, el problema se refiere principalmente al agotamiento de las funciones que los recursos naturales tienen para la economía, es decir, para la humanidad.

Por lo tanto, se podría argumentar que el agotamiento de los recursos es básicamente un problema económico, más que un problema ambiental.

El método de caracterización de referencia considerado como la mejor práctica actual disponible para la categoría en cuestión es el método recomendado en el Manual Holandés de ACV (Guinée, et al. 2002); una versión adaptada de Guinée y Heijungs (1995). El método de referencia para la evaluación

del agotamiento de los recursos abióticos, como se recomienda en el manual holandés de LCA es el Método de Guinée y Heijungs (1995), que está ligeramente adaptado a los combustibles fósiles.

En Guinée y Heijungs (1995) y Oers et al. (2002), el agotamiento de los recursos se consideró un problema ambiental, aunque se reconocieron que las opiniones difieren. El problema se definió como la disminución de la disponibilidad natural de recursos naturales abióticos, incluidos los recursos de energía fósil, elementos y minerales, en el punto “2.4 Recursos naturales vs recursos en la economía” se desarrollará este concepto.

2.2. EVALUACIÓN DEL AGOTAMIENTO

¿Cómo se puede determinar el agotamiento de un recurso? ¿Cuáles son los indicadores del agotamiento?

La discusión principal se centra en la dicotomía entre los indicadores que se basan en el precio y los que se basan en la física. Aunque el precio de un recurso puede considerarse como una medida de su escasez y valor social, refleja más que eso. Los precios también están influenciados por la estructura de mercados económicos particulares, condiciones sociales nacionales reflejadas en el costo laboral, el poder de las empresas mineras como un monopolio, los costos de identificar nuevas reservas, etc. Por estas razones, los precios de los recursos no parecen ser un indicador apropiado del agotamiento.

Un indicador de agotamiento también podría basarse en las diversas funciones únicas que los recursos pueden cumplir en los materiales y productos. Al tratar de evaluar la disponibilidad de posibles recursos, se debe tener en cuenta las posibilidades de sustitución. Oers, et al. (2002) emprendió una búsqueda preliminar basada en la toma en cuenta de las posibilidades de sustitución. Sin embargo, los elementos y compuestos pueden tener funciones potenciales muy diferentes, y los posibles cambios futuros en las funciones potenciales son muy difíciles de anticipar. Por lo tanto, se concluyó en ese momento que incluir la sustitución no era factible en un modelo de caracterización para el agotamiento de los recursos.

Se hizo una excepción para los portadores de energía fósil, ya que se suponía que eran completamente intercambiables, particularmente con respecto a su función de portadores de energía. Por lo tanto, se sugirió definir una categoría de impacto separada para los combustibles fósiles, debido a su función similar de portadores de energía (Oers et al. 2002). Sin embargo, esta recomendación aún no se implementó en los factores de caracterización de referencia descritos en el Manual Holandés de ACV (Guinée et al., 2002).

Guinée y Heijungs (1995) decidieron basar el modelo de caracterización para el agotamiento de los recursos abióticos en datos físicos sobre las reservas y la acumulación anual, definiendo la acumulación como la producción anual (Por ejemplo, En kg/año) menos la regeneración anual (Por ejemplo, en kg/año) de un recurso, el último de los cuales se suponía que era cero.

2.3 RECURSOS NATURALES VS RECURSOS EN LA ECONOMÍA

Al evaluar la disponibilidad de recursos, se puede utilizar el concepto de disponibilidad en un sentido limitado o amplio.

La disponibilidad en sentido limitado se centra en la extracción del recurso de las existencias en el medio ambiente, el cual es el medio de extracción primario, mientras que la disponibilidad en sentido amplio se centra en la presencia de recursos en las existencias en el medio ambiente, así como en la economía (tecnosfera).

Los materiales primarios no sólo se producen a partir de suministros de recursos naturales, sino también se reciclan de la creciente cantidad de existencias en la economía. En el futuro, la gran cantidad de materiales en la economía, que se vierten en vertederos o se concentran en el lodo de alcantarillado, puede ser un recurso para la minería. ¿Deben tenerse en cuenta estas existencias de materiales en la economía, que potencialmente pueden reciclarse, al estimar la cantidad total de recursos disponibles? En otras palabras, ¿La reserva debe basarse en la reserva natural o también en la reserva en la economía?

Idealmente, basado en la definición del agotamiento de los recursos abióticos, el recurso disponible debe abarcar tanto las reservas naturales como las reservas en la economía. El criterio para el agotamiento del recurso es si el recurso derivado del medio ambiente todavía está presente y (fácilmente) disponible en las existencias de materiales en la economía. Después de todo, mientras haya recursos disponibles en el stock económico después de la extracción, no hay problema de agotamiento. Un elemento o mineral, con una determinada función, que se produce a partir de un recurso natural y se almacena en un producto (reserva económica) que puede reciclarse fácilmente no se pierde, sino que se toma prestado.

Entonces, en teoría, desde un punto de vista funcional, la reserva de un recurso incluye reservas tanto en la naturaleza como en la economía (el stock total de productos a partir de los cuales se pueden reciclar materiales secundarios), siempre que las funciones potenciales de ese material en la economía todavía estén disponibles. Entonces la definición del problema se puede redefinir como: El agotamiento abiótico de los recursos es la disminución de la disponibilidad de funciones de los recursos, tanto en el medio ambiente como en la economía.

Guinée y Heijungs (1995) y Oers et al. (2002) decidieron tomar como base la definición limitada de disponibilidad, al tiempo que reconocieron que, eventualmente, sería preferible una definición en sentido amplio, suponiendo que sería posible y prácticamente factible definir un indicador adecuado para esto y que los datos necesarios estuviesen disponibles.

2.4. TIPOS DE RESERVAS DE RECURSOS ABIÓTICOS.

Las estimaciones de las cantidades de recursos (elementos, minerales, combustibles) disponibles para las generaciones futuras dependen de la definición de reserva utilizada.

Cuando se habla de las reservas de recursos, puede haber confusión sobre el tipo de reserva que se está considerando. Drielsma, et al. (2016) han comparado las definiciones utilizadas por el Comité de Normas Internacionales de Información sobre Reservas Minerales (CRIRSCO) con las definiciones de reservas tal como se utilizan en el ADP (Oers et al. 2002) (Tabla 1).

Para una mejor comunicación entre ambas comunidades en el futuro, se debe armonizar la terminología de los recursos y las reservas. Dentro de la comunidad geológica, las instituciones están convergiendo actualmente hacia las definiciones de CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards). Parece lógico que dentro de la comunidad LCIA se adopten la misma terminología y definiciones.

Tabla 1. Tipos de reservas y definiciones (USGS, 2015)

Terminología	Definición
Reserva final	Concentraciones de los elementos y carbono fósil (Recursos) en la corteza terrestre.
Reserva extraíble en última instancia	Las reservas que en última instancia pueden extraerse técnicamente. Esta reserva extraíble en última instancia ("recurso global extraíble") está situada en algún lugar entre la reserva final y la reserva base.
Reserva base	Recursos que tienen un potencial razonable para estar disponibles económica y técnicamente. Es la parte de un recurso identificado que cumple con los criterios físicos y químicos mínimos específicos relacionados con la práctica minera actual.
Reserva económica	La parte de la base de la reserva natural que puede extraerse económicamente en el momento de la determinación.

Las distinciones hechas anteriormente pueden aplicarse tanto a los recursos naturales como a los recursos en la economía.

La desventaja de la "base de reserva" y la "reserva económica" es que estimar el tamaño de la reserva implica una variedad de consideraciones técnicas y económicas que no están directamente relacionadas con el problema ambiental del agotamiento de los recursos. Sin embargo, las estimaciones son relativamente ciertas, ya que se basan en la práctica actual, mientras que, por otro lado, son muy inestables ya que cambian continuamente con el tiempo.

En contraste, la "reserva extraíble en última instancia" está más directamente relacionada con el problema ambiental del agotamiento de los recursos, y relativamente estable en el tiempo.

Sin embargo, es muy incierto cuánto de las concentraciones dispersas de elementos y compuestos eventualmente estarán disponibles, ya que los desarrollos técnicos y económicos en el futuro lejano son impredecibles. Se espera que la reserva final y la reserva extraíble final difieran sustancialmente. Sin embargo, los datos sobre la reserva extraíble en última instancia no están disponibles y nunca se conocerán exactamente debido a su dependencia de futuros desarrollos tecnológicos.

Por lo tanto, podría suponer que la "reserva final" es una representación de la "reserva en última instancia extraíble", suponiendo implícitamente que la relación entre la reserva en última instancia extraíble y la reserva final es igual para todos los tipos de recursos. En realidad, este no será el caso, porque la concentración, presencia y distribución (Figura 1) de diferentes recursos probablemente será diferente (Oers et al. 2002). Por lo tanto, no hay información suficiente para decidir cuál de estas reservas da la mejor indicación de la reserva extraíble en última instancia.

Es discutible si esta presencia dispersa en la corteza terrestre de las reservas finales alguna vez está disponible, técnica y económicamente. Por lo tanto, las reservas finales no se pueden extraer por completo porque algunas ubicaciones serán inaccesibles, por ejemplo, las reservas en el lecho marino, o las concentraciones de los recursos que son demasiado bajas para la extracción, incluso en el futuro lejano.

Si bien reconocemos que algunos autores proponen una barrera mineralógica según lo descrito por Skinner (2001), esto no se ha considerado en la investigación. Guinée y Heijungs (1995) y Oers et al. (2002) adoptó la "reserva definitiva" como el mejor representante de la "reserva en última instancia extraíble" en su modelo de caracterización para el agotamiento abiótico de los recursos. Recomendaron utilizar indicadores alternativos para un análisis de sensibilidad, como la "base de reserva" y, en menor medida, la "reserva económica".

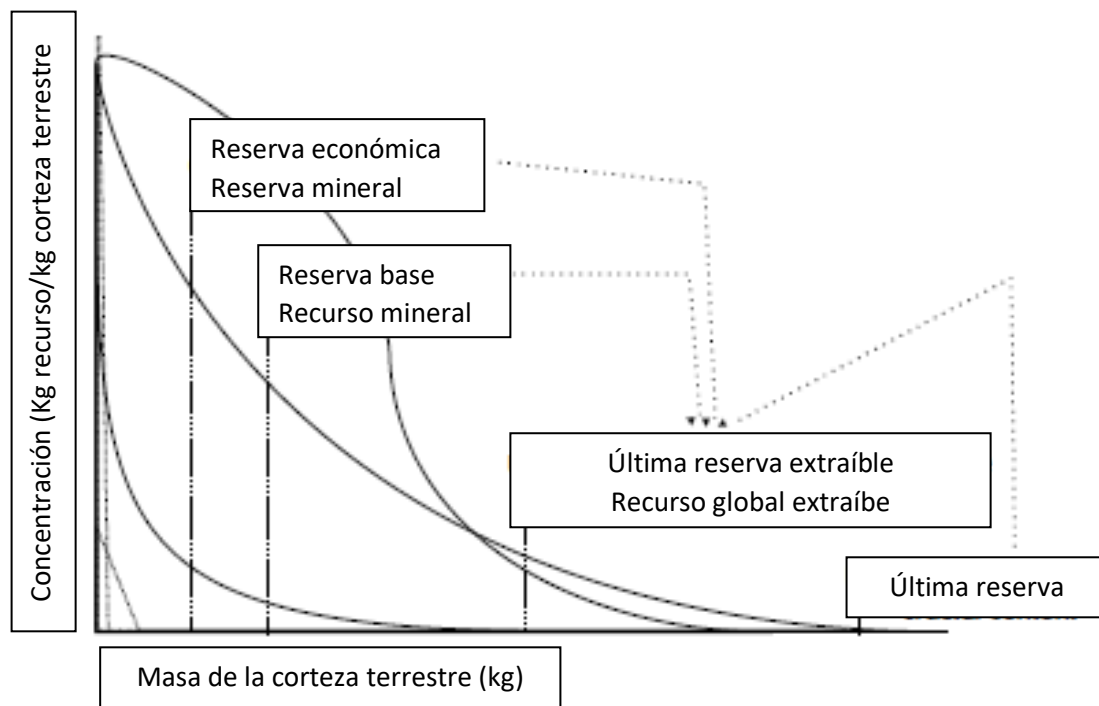


Figura 1. Concentración, presencia y distribución de varios recursos teóricos en la corteza terrestre. La reserva final de un recurso es el área de superficie encerrada por la curva. El tamaño de las otras estimaciones de las reservas viene dado por el área de superficie encerrada por la curva y la secante dada con el eje x. (Faculty of Science Institute of Environmental Sciences, CML)

2.5. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CARACTERIZACIÓN (ADP)

Basado en todas las opciones descritas anteriormente, se puede describir el modelo de caracterización.

El modelo de caracterización es función de los recursos naturales (depósitos en el medio ambiente), de los recursos abióticos combinados con sus tasas de extracción (Ecuación 2). Los depósitos son recursos que no se regeneran en la vida humana. Ejemplos de depósitos son los combustibles fósiles, minerales, sedimentos, arcilla, etc.

El método se utiliza para muchos elementos y combustibles fósiles. Las reservas naturales de estos recursos se basan en "reservas finales"; es decir, en las concentraciones de los elementos y el carbono fósil en la corteza terrestre. El factor de caracterización es el potencial de agotamiento abiótico (ADP). Este factor se deriva para cada extracción de elementos y combustibles fósiles y es una medida relativa, con el agotamiento del elemento antimonio como referencia.

De acuerdo con la estructura general de la LCIA, el resultado del indicador de categoría de impacto para la categoría de impacto de "agotamiento abiótico" se calcula multiplicando los resultados de ACV, es decir, las extracciones de elementos y los combustibles fósiles (en kg) por los factores de caracterización (ADP, en kg de antimonio equivalentes / kg de extracción) la elección de la sustancia de referencia es arbitraria. Elegir otra referencia no cambiará los tamaños relativos de los factores de

caracterización. El antimonio se eligió como sustancia de referencia porque es el primer elemento del alfabeto para el cual un conjunto completo de los datos necesarios (tasa de extracción y reserva final) están disponibles y se agregan los resultados de estas multiplicaciones en una puntuación para obtener el resultado del indicador (En kg equivalentes de antimonio). Los factores de caracterización se han derivado sólo para elementos y combustibles fósiles. Por lo tanto, los resultados del inventario se deben dar en kg de elemento extraído o en kg de combustible fósil extraído.

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de factores de caracterización para elementos (ADP).

	Ecuación	Unidades de la ecuación
(1)	$Abiotic\ depletion\ potential = \sum_i ADP_i \times m_i$	$kg_{eq.sb} = \sum_i \frac{kg_{eq.sb}}{kg_i} \times kg_i$
(2)	$ADP_i = \frac{\frac{DR_i}{(R_i)^2}}{\frac{DR_{ref}}{(R_{ref})^2}}$	$\frac{Kg_{eq.sb}}{Kg_i} = \frac{\frac{Kg_i}{año}}{\frac{(Kg_i)^2}{año}} \div \frac{\frac{Kg_{eq.sb}}{año}}{\frac{(Kg_{eq.sb})^2}{año}}$

Dónde:

- ADP_i: Potencial de agotamiento abiótico del recurso i (kg equivalentes de antimonio / kg de recurso i);
- m_i: Cantidad de recursos extraído (kg);
- R_i: Reserva final del recurso i (kg);
- DR_i: Tasa de extracción del recurso i (kg·año⁻¹) (Se supone que la regeneración es cero);
- R_{ref}: Reserva final del recurso de referencia, antimonio (kg);
- DR_{ref}: Tasa de extracción del recurso de referencia, R_{ref} (kg·año⁻¹).

Los factores de caracterización para el agotamiento abiótico de los recursos se basan en las tasas de extracción y las reservas. La mejor fuente para este tipo de datos es el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

La estimación de las reservas finales de elementos se basa en la concentración de los elementos en la corteza terrestre, el océano y la atmósfera (Guinée, 1995). Sin embargo, para muchas configuraciones únicas de elementos no se dan estimaciones para las reservas. Para estos minerales, como feldespato, yeso, arena de sílice, arena de construcción, arcillas y piedra caliza, se afirma que las reservas son infinitas o muy grandes o suficientes a nivel mundial, aunque a nivel regional a veces puede ocurrir escasez.

El modelo de caracterización de Guinée et al. (2002) es un modelo mundial. Las reservas de los recursos y las tasas anuales de extracción se basan en los totales mundiales. Debido a que el comercio de los

recursos es o puede ser mundial, este modelo global se considera más apropiado para evaluar el agotamiento de los recursos abióticos.

Guinée (1995) desarrolló ADP para muchos elementos, utilizando el antimonio como referencia. En 2002, estos ADP fueron actualizados por Oers et al. (2002). Esta actualización incluyó nuevas tasas de extracción (DR) de recursos para el año base 1999. Para facilitar el análisis de sensibilidad, se desarrollaron ADP alternativos basados en diferentes definiciones de reservas, por ejemplo: reserva económica, base de reserva y reserva final.

2.6 DESARROLLOS POSTERIORES A 2002

Desde 2002, los ADP se han representado en una hoja de cálculo junto con factores de caracterización para otras categorías de impacto. La hoja de cálculo de Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden Impact Assessment (CML-IA) con factores de evaluación de impacto recomendados por el Manual holandés de LCA (Guinée et al. 2002), puede descargarse del sitio web de CML-IA. Para los factores de caracterización se debe consultar la hoja de cálculo disponible en el sitio web de CML, en www.leidenuniv.nl/cml/ssp/

2.6.1 ACTUALIZACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO POR CML: CATEGORÍA DE IMPACTO ADP.

En 2009, la categoría de impacto de "agotamiento de recursos abióticos" se dividió en dos categorías de impacto separadas: "agotamiento de recursos abióticos: elementos"; y "agotamiento abiótico de los recursos: combustibles fósiles".

La categoría de impacto para los elementos es un grupo heterogéneo, que consta de elementos y compuestos con una variedad de funciones (todas las funciones se consideran de igual importancia). Los recursos en la categoría de impacto de los combustibles fósiles son combustibles como el petróleo, el gas natural y el carbón, que son todos portadores de energía y se supone que son mutuamente sustituibles. Como consecuencia, el stock de combustibles fósiles está formado por la cantidad total de combustibles fósiles, expresada en Megajulios (MJ).

2.6.2. ACTUALIZACIÓN DE VALORES ADP POR CML

En 2009, los ADP informados en el Manual holandés sobre LCA (Guinée et al. 2002), basado en Guinée (1995), se actualizaron utilizando los ADP informados por Oers et al. (2002) (Datos de R y DR basados en datos de 1999). Desde 2009, los datos básicos subyacentes a los ADP y, por lo tanto, a los propios ADP no se han vuelto a actualizar. (<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-abiotic-depletion-in-lcia>)

En la hoja de cálculo de Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden Impact Assessment (CML-IA es una base de datos que contiene factores de caracterización para la evaluación de impacto del ciclo de

vida (LCIA)) se ha desarrollado una actualización completa de los factores de caracterización para el agotamiento abiótico aplicando el método de referencia recomendado por Guinée et al. (2002). En la hoja de cálculo se recopilan datos sobre las tasas de extracción y las estimaciones sobre la cantidad de recursos a nivel mundial. Se han mejorado algunos de los cálculos de ADP. Los ADP se han calculado para la reserva final, la base de reserva y la reserva económica.

Los datos se toman de las estadísticas de productos básicos de USGS (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>) y se basan en el año de referencia 1999. Los datos relativos a las reservas finales se toman de Guinée (1995). Los datos sobre energía y combustibles fósiles provienen del World Resource Institute (WRI) y la Agencia Internacional de Energía (AIE). Las estimaciones sobre la base de reserva de combustibles fósiles, incluidos los recursos no convencionales como los aceites pesados, las arenas bituminosas y los depósitos de esquisto, se basan en Campbell y Laherrère (1998).

Se presenta una actualización del método Guinée et al., (1995) (Tabla 3). En este método, el modelo de caracterización es función de la tasa de extracción del recurso y la reserva de este.

A continuación, se detallan los ADP para diferentes elementos según la reserva final (datos obtenidos de la hoja de cálculo de CML). Para los elementos que no existen valores ADP se debe a que se desconoce su tasa de extracción. Para consultar cómo se han realizado los cálculos consultar Anexo I.

Tabla 3. ADP (kg de antimonio equivalente / kg extraído _i) para caracterizar el agotamiento de los recursos abióticos en función de las tasas de extracción y las reservas finales (año 1999).

ELEMENTOS	ADP $\frac{\text{kg equivalente Sb}}{\text{kg } i}$
Actinio (Ac)	-
Aluminio (Al)	1,09E-09
Antimonio (Sb)	1,00E+00
Argón (Ar)	-
Arsénico(As)	2,97E-03
Bario (Ba)	6,04E-06
Berilio (Be)	1,26E-05
Bismuto (Bi)	4,11E-02

Boro (B)	4,27E-03
Bromo (Br)	4,39E-03
Cadmio (Cd)	1,57E-01
Calcio (Ca)	-
Cerio (Ce)	-
Cesio (Cs)	-
Cloro (Cl)	2,71E-05
Cromo (Cr)	4,43E-04
Cobalto (Co)	1,57E-05
Cobre (Cu)	1,37E-03
Disprosio (Dy)	-
Erbio (Er)	-
Europio (Eu)	-
Flúor (F)	-
Gadolinio (Gd)	-
Galio (Ga)	1,46E-07
Germanio (Ge)	6,52E-07
Oro (Au)	5,20E+01
Hafnio (Hf)	-
Helio (He)	-
Holmio (Ho)	-
Indio (In)	6,89E-03
Yodo (I)	2,50E-02

Iridio(Ir)	-
Hierro (Fe)	5,24E-08
Potasio (K)	1,60E-08
Criptón (Kr)	-
Lantano (La)	-
Plomo (Pb)	6,34E-03
Litio (Li)	1,15E-05
Lutecio (Lu)	-
Magnesio (Mg)	2,02E-09
Manganeso (Mn)	2,54E-06
Mercurio (Hg)	9,22E-02
Molibdeno (Mo)	1,78E-02
Neodimio (Nd)	-
Neón (Ne)	-
Nickel (Ni)	6,53E-05
Niobio (Nb)	1,93E-05
Osmio (Os)	-
Paladio (Pd)	5,71E-01
Fósforo (P)	5,52E-06
Platino (Pt)	2,22E+00
Polonio (Po)	-
Praseodimio (Pr)	-
Protactinio (Pa)	-

Radio (Ra)	-
Radón (Rn)	-
Renio (Re)	6,03E-01
Rodio (Rh)	-
Rubidio (Rb)	-
Rutenio (Ru)	-
Samario (Sm)	-
Escandio (Sc)	-
Selenio (Se)	1,94E-01
Silicio (Si)	1,40E-11
Plata (Ag)	1,18E+00
Sodio (Na)	5,50E-08
Estroncio (Sr)	7,07E-07
Sulfuro (S)	1,93E-04
Tántalo (Ta)	4,06E-05
Telurio (Te)	4,07E+01
Terbio (Tb)	-
Talio (Tl)	2,43E-05
Torio (Th)	-
Tulio (Tm)	-
Estaño (Sn)	1,62E-02
Titanio (Ti)	2,79E-08
Wolframio (W)	4,52E-03

Uranio (U)	-
Vanadio (V)	7,70E-07
Xenón (Xe)	-
Iterbio (Yb)	-
Itrio (Y)	5,69E-07
Zinc (Zn)	5,38E-04
Zirconio (Zr)	5,44E-06

En el método de referencia (Guinée et al. 2002) los elementos y los combustibles fósiles son parte de una categoría de impacto. Si el agotamiento de los portadores de energía (combustibles fósiles) se trata como una categoría o subcategoría de impacto separada para la categoría de impacto general "agotamiento de recursos abióticos", la extracción de referencia de antimonio debe reemplazarse por la extracción de referencia de energía fósil.

Para los portadores de energía fósil se han calculado, en la hoja de cálculo de CMLIA, nuevos ADP para reemplazar a los datos en Guinée et al. (2002).

En Guinée et al. (1995) El ADP para los combustibles fósiles se calculó en base al supuesto de que los combustibles fósiles son sustitutos completos. Esto significa que los ADP no deberían ser diferentes, al menos en términos de reservas totales de energía. Por esta razón, $ADP_{energía-fósil}$ se calcula en función de las reservas totales de energía y las extracciones anuales de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) como un total.

Sin embargo, en Guinée et al. (2002) la extracción de energía fósil sigue siendo parte de una categoría de Impacto "Agotamiento de recursos abióticos", donde los recursos fósiles se agregan con minerales y otros elementos. Además, en Guinée et al. (2002) el ADP para recursos fósiles se expresa en kg de equivalentes de antimonio por unidad (kg, m³, MJ) de recurso.

A partir de 2009, la categoría de impacto "Agotamiento de los recursos abióticos" se puede dividir en dos categorías de impacto para "elementos" y "energía fósil". La $ADP_{energía-fósil}$ se expresa utilizando una extracción de referencia para esta categoría de impacto. Para ello elegimos la energía fósil (en MJ). Ahora, la $ADP_{energía-fósil}$ se puede calcular usando la ecuación 3. Como resultado, el numerador y el denominador en la fórmula son los mismos, lo que lleva a una energía fósil ADP de 1. El resultado del indicador para combustible fósil se debe ponderar posteriormente contra el resultado para configuraciones y elementos.

Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de factores de caracterización para combustibles fósiles ADP).

Ecuación	Unidades de la ecuación
$Abiotic\ depletion_{energía\ fósil} = \sum_i ADP_i \times m_i$	$MJ_{fossil\ energy} = \sum_i \frac{MJ}{kg\ o\ m^3} \times kg\ o\ m^3_{fossil\ energy}$
<p>(3)</p> $ADP_{fossil\ energy} = \frac{\frac{DR_{energía-fósil}}{(R_{energía-fósil})^2}}{\frac{DR_{energía-fósil}}{(R_{energía-fósil})^2}} = 1$	$MJ = \frac{\frac{MJ_{energía-fósil}}{año}}{\frac{MJ_{energía-fósil}}{año}} = \frac{(MJ_{energía-fósil})^2}{(MJ_{energía-fósil})^2}$

Dónde:

- $ADP_{energía-fósil}$: Potencial de agotamiento abiótico del recurso i (kg equivalentes de antimonio / kg de recurso i);
- m_i : Cantidad de recursos extraído (kg o m^3);
- $DR_{energía-fósil}$: Energía fósil extraída, en $MJ \cdot año^{-1}$.
- $R_{energía-fósil}$: Reserva final de energía fósil, en MJ.

Basado en las ideas de querer caracterizar no solo la energía fósil en MJ, sino también el petróleo en kg, el gas natural en m^3 , calculamos factores adicionales de estos recursos energéticos individuales

- $ADP_{oil} [MJ/kg] = 41.87$
- $ADP_{nat.gas} [MJ/m^3] = 38.84$
- $ADP_{softcoal} [MJ/kg] = 13.96$
- $ADP_{hardcoal} [MJ/kg] = 27.91$

Todas las otras diferencias entre los factores de caracterización de Guinée (1995) y la presente actualización pueden explicarse por las diferencias en las tasas de extracción de los recursos entre el año 1992 (año de referencia en Guinée, 1995) y el año 1999 (año de referencia de Oers, et al. 2002). Tener en cuenta que la tasa de producción de antimonio entre 1992 y 1999 se ha duplicado. Debido a que el antimonio es la sustancia de referencia, como resultado, todos los ADP han cambiado. Además, pero en menor medida, a veces las reservas estimadas entre los diferentes años difieren.

2.6.3. ACTUALIZACIÓN DE LOS VALORES R Y DR POR OTROS

Algunos nuevos datos de DR y R han sido reportados por Frischknecht et al. (2013) Sin embargo, los ADP derivados de estos datos no se han implementado en la hoja de cálculo CMLIA. Hasta 2010, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) informó anualmente las tasas de extracción, la reserva (económica) y los datos de reserva base para muchos recursos. Sin embargo, los datos reserva base ya no se han informado desde 2010.

CAPÍTULO 3. NUEVOS ENFOQUES EN EL AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS ABIÓTICOS EN CMLIA

3.1. AGOTAMIENTO, ESCASEZ Y CRITICIDAD

Al tratar de evaluar la "sostenibilidad" del uso de los recursos por parte de la sociedad, se utilizan diferentes definiciones del problema del uso de los recursos en términos de agotamiento, escasez y criticidad.

- El agotamiento de un recurso significa que su presencia en la Tierra se reduce. Esto se refiere a reservas geológicas (o naturales).
- La escasez de un recurso significa que la cantidad disponible para su uso es, o pronto será, insuficiente ("demanda mayor que el flujo de oferta").
- La criticidad de un recurso significa que es escaso y, al mismo tiempo, esencial para la sociedad actual. Además de los aspectos ambientales, la evaluación de la criticidad a menudo también considera cuestiones económicas, sociales y geopolíticas (Van der Voet, et al. 2013).

El interés en los recursos naturales ha aumentado recientemente, debido al creciente interés en las políticas para garantizar la seguridad del suministro de metales críticos como el tantalio, el indio, el neodimio, etc. (European Commission, 2010). Cabe señalar, sin embargo, que esta evaluación de la criticidad de los metales a menudo se basa en más criterios que sólo en cuestiones ambientales. La criticidad de un metal se basa en una mezcla de consideraciones ambientales, geopolíticas, sociales y económicas. Además, el debate sobre la criticidad no tiene necesariamente en cuenta la perspectiva de la cadena de la cuna a la tumba; a menudo solo se centra en un suministro de elementos a nivel de empresa o economía nacional.

La evaluación de impacto ambiental de ACV no debe tratar de tener en cuenta todos estos diferentes aspectos de la evaluación de la criticidad, es decir, el medio ambiente, la economía y los aspectos sociales. Pueden ser parte de una evaluación más amplia de la sostenibilidad del ciclo de vida (LCSA), pero incluso entonces un enfoque general será difícil, ya que muchos de los aspectos críticos dependen

mucho del tiempo y de la región e incluso difieren para las diferentes partes interesadas. LCSA es un marco para el análisis del sistema (desde la cuna hasta la tumba) que, además de los aspectos ambientales, también puede centrarse en cuestiones económicas y sociales (UNEP-SETAC, 2015). Sin embargo, las categorías de impacto para el "agotamiento abiótico de los recursos" solo abordan el pilar ambiental de la evaluación de sostenibilidad, y el indicador se basa únicamente en el problema del agotamiento.

3.2. RESERVA DEFINITIVA, BASE DE RESERVA Y RESERVA ECONÓMICA

Los ADP desarrollados por Guinée (1995) y Oers et al. (2002) se basan en las reservas finales calculadas a partir de las concentraciones promedio de elementos en la corteza terrestre (Lide et al. 1990) suponiendo una masa de corteza de 2.31×10^{22} kg (profundidad promedio de la corteza terrestre: 17,000 m; densidad promedio: 2670 kg / m³; superficie de la Tierra: $5,1 \times 10^{14}$ m²) (Guinée, 1995).

Drielsma et al. (2016) afirmó que el "contenido de la corteza" (sinónimo de reserva final) es un conjunto de datos estable y completo que se puede utilizar para obtener una estimación física del agotamiento de los recursos para los recursos abióticos. Basan esta conclusión en un estudio de Rudnick y Gao (2005), que comparó varios estudios realizados desde el estudio inicial de Clarke y Washington (1924) en estimaciones del stock total de recursos.

El estudio de Rudnick y Gao (2005) proporcionó cifras actualizadas sobre el contenido cortical que pueden utilizarse para ADP actualizados basados en las reservas finales. Dado que las estimaciones de las reservas económicas son mucho menos estables debido a cambios tecnológicos y desarrollos económicos, y que el USGS ya no proporciona datos de base de reservas, el uso de "reservas finales" como base para el cálculo de ADP parece justificado y confirmado. Por lo tanto, argumentamos aquí que el modelo de caracterización recomendado por la ILCD (2011) para el agotamiento abiótico de los recursos basado en Oers et al. (2002) debe reajustarse a la definición de reserva original, que implica la reserva final, en lugar de la base de reserva.

3.3. DISPONIBILIDAD EN SENTIDO AMPLIO, ADP BASADO EN RECURSOS DE MEDIO AMBIENTE Y ECONOMÍA.

Los recursos no solo se producen a partir de suministros de recursos naturales, sino que también se reciclan de la creciente cantidad de existencias en la economía y los desechos ("existencias urbanas"). ¿Deberían incluirse estas existencias de materiales en la economía, que potencialmente pueden reciclarse, al estimar la cantidad total de recursos disponibles? En otras palabras, ¿La reserva debería basarse únicamente en el recurso natural o también en el recurso de la economía? Como se discutió anteriormente, los recursos cumplen funciones específicas en materiales y productos.

Teóricamente, no hay problema de agotamiento siempre que el recurso después de la extracción todavía esté disponible en el stock económico. Como consecuencia, la disponibilidad de recursos debe abarcar tanto las reservas naturales como las reservas en la economía (Oers, et al. 2002).

Schneider, et al. (2011) hicieron intentos preliminares para obtener ADPs basados en existencias tanto en la economía como en el medio ambiente, el llamado potencial antropogénico de agotamiento abiótico extendido por existencias (AADP). Sus primeros resultados enfatizan la relevancia de los stocks antropogénicos para la evaluación del agotamiento de los recursos abióticos. Sin embargo, se necesita un conjunto más amplio de factores de caracterización y más investigación para verificar la aplicabilidad del concepto dentro de la práctica del ACV (Schneider, et al. 2011).

Los AADP se actualizaron en 2015, incluido un enfoque para la estimación de las reservas extraíbles del medio ambiente. La actualización dio como resultado 35 AADP operativos (Schneider, et al. 2015). Sin embargo, recopilar información sobre las poblaciones antropogénicas sigue siendo un desafío. Por lo tanto, el problema podría redefinirse de la siguiente manera: el agotamiento abiótico de los recursos es la disminución de la disponibilidad de recursos, tanto en el medio ambiente como en la economía.

Tener en cuenta que en el método de Guinée et al. (2002) el agotamiento de los recursos abióticos es una función de la reserva ambiental y la extracción anual de materiales de estas reservas. Esto implica que implícitamente también se incorporan las reservas en la economía porque la extracción anual se reducirá si grandes cantidades de materiales se vuelven libremente disponibles debido a la desacumulación y el reciclaje.

3.4. AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS COMO UN PROBLEMA DE DILUCIÓN

Si adoptamos la definición más amplia de reserva descrita anteriormente, el parámetro de extracción "DR" en la ecuación ADP deja de tener sentido. Después de todo, la extracción (DR) de recursos de fuentes ambientales para su uso en la economía es solo un cambio de existencias ambientales a existencias económicas.

Por lo tanto, al redefinir el parámetro de reserva (R) en el modelo ADP, el otro parámetro en el modelo, la "tasa de extracción" (DR) también debe redefinirse. Como sugirió originalmente Oers, et al. (2002), la emisión de recursos al medio ambiente, en lugar de la tasa de extracción, podría ser un parámetro prometedor para su uso en el modelo de caracterización. Oers, et al. (2002) sugirió que la pérdida de recursos de los procesos económicos y las existencias debido a las emisiones de elementos y compuestos a la atmósfera, el agua y el suelo puede utilizarse como una medida de la dilución de los recursos. La argumentación es que cuando las reservas ambientales y económicas se consideran como una reserva total de recursos, el problema del agotamiento es de hecho un problema de dilución (Figura 2).

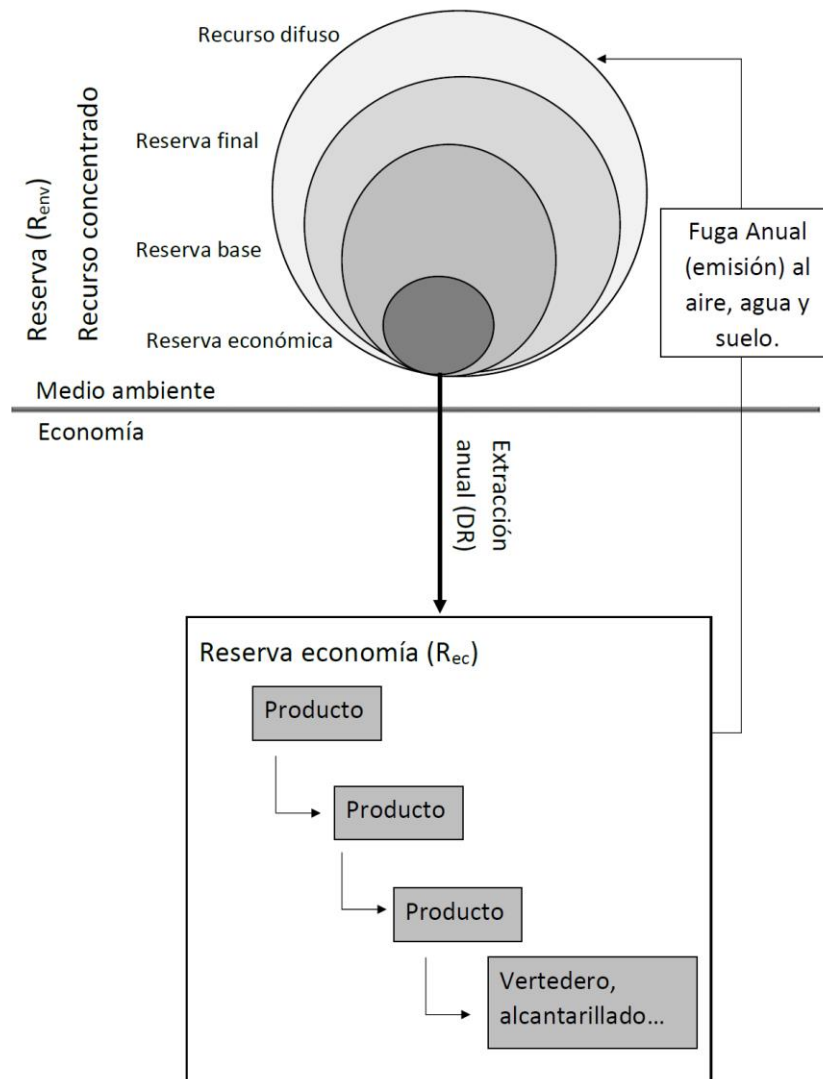


Figura 2. Parámetros relevantes para el modelo de agotamiento de recursos abióticos, reservas en economía y medio ambiente y extracción o emisión anual del recurso (adaptado de Oers, et al. 2002)

La suposición es que los recursos que se emiten al medio ambiente son demasiado difusos para ser en última instancia extraíbles y, por lo tanto, no forman parte de la reserva extraíble en última instancia. Por lo tanto, el agotamiento abiótico de los recursos también puede redefinirse como un problema de dilución de los recursos; es decir, una reducción de las reservas concentradas de recursos.

Frischknecht (En Vadenbo et al. 2014), también sugirió centrarse en el papel de los préstamos y el uso de recursos disipativos en la evaluación del impacto de los recursos abióticos. Los recursos materiales en la Tierra no se pueden perder (a menos que se conviertan en energía o se pierdan en el espacio), pero se pueden dispersar. Los factores de evaluación de impacto derivados por Frischknecht todavía se basan en el modelo ADP original (utilizando sólo reservas ambientales), pero las tasas de extracción se aplican al uso disipativo de los recursos, que se define como la diferencia entre las cantidades de recursos extraídos y reciclados, es decir, la cantidad perdida agregada durante la fabricación, el uso y el tratamiento al final de la vida útil.

Oers, et al. (2002) sugirió una elaboración diferente del modelo de caracterización para el problema de dilución de los recursos. Si el agotamiento de los recursos abióticos se define como la dilución de los recursos, la fuga (L) de elementos, minerales y energía (calor) de la economía se sugiere como un parámetro para el modelo de caracterización, como una alternativa a la tasa de extracción (DR). Esta fuga de recursos se puede combinar con la reserva total de recursos en el medio ambiente y la economía ($R_{total} = R_{env} + Rec$) en un nuevo modelo de caracterización para la dilución de recursos abióticos.

Este nuevo modelo aún puede usar la ecuación ADP original, pero la tasa de extracción de parámetros (DR) se reemplaza por Fuga (L), y el parámetro de reserva (R) se refiere a reservas tanto en la economía como en el medio ambiente. La puesta en funcionamiento de estos nuevos factores de caracterización requiere una estimación de las existencias de elementos en la economía y las emisiones totales de elementos al medio ambiente en el mundo. Un enfoque preliminar para estimar estas existencias puede basarse en el método y los datos descritos por Schneider (2011, 2015) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (Van der Voet, 2013).

Las emisiones totales en el mundo pueden basarse en los inventarios realizados para derivar factores de normalización, como en el trabajo de Wegener Sleeswijk, et al. (2008) El resultado para la categoría de impacto de "dilución abiótica de recursos" se puede calcular multiplicando la emisión, en lugar de la extracción, de elementos (en kg) por los factores de caracterización (ADP en kg de equivalentes de antimonio / kg de emisión) y agregando los resultados de estas multiplicaciones en una puntuación para obtener el resultado del indicador (en kg equivalentes de antimonio).

El indicador actual de Guinée et al. (2002) se basa en la reserva en el medio ambiente y en la entrada de recursos en la economía, es decir, la extracción anual de recursos. Esta entrada en la economía terminará en parte en productos, en parte en vertederos y en parte se filtrará al medio ambiente. Entonces, en comparación con el indicador basado en la fuga de la economía, el indicador basado en la entrada anual de la economía sobreestima el agotamiento de los recursos en la actualidad, porque también se considera que la acumulación de funciones en productos y vertederos se pierde para las generaciones futuras.

CAPÍTULO 4. ADP EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR

4.1. ANTECEDENTES.

Como se ha visto hasta ahora, la preocupación mundial por la degradación del medio ambiente ha llevado a una intensa presión por parte de las comunidades, las ONG y la opinión pública en general por los efectos de las actividades económicas sobre el entorno natural y sobre la sostenibilidad del desarrollo global.

La industria química ha estado permanentemente bajo la mira debido a que es una de las mayores contaminantes del aire y de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Los gobiernos han implementado poco a poco una legislación cada vez más exigente que regula ante todo el vertido de contaminantes. Sin embargo, estas disposiciones reguladoras no han considerado el medio ambiente desde una perspectiva global, por lo que en muchos casos la reducción de descargas en una zona implica la sobreexplotación de un recurso natural en otra. Se hace necesario, entonces, considerar el impacto que sobre el medio ambiente tiene la producción de diferentes artículos, materiales y servicios, a partir de un enfoque holístico, es decir, que considere todos los componentes involucrados desde la extracción de las materias primas hasta la disposición de los productos.

La demanda energética ha incentivado la investigación científica encaminada a desarrollar métodos y tecnologías que complementen la producción de energía a partir de fuentes convencionales (USDA, 2008). Uno de los intentos por mitigar los impactos relacionados con este problema, es la producción de biocombustibles. La biomasa tiene un gran potencial energético y los procesos de transformación de ese tipo de sustancias a biocombustibles generan excelentes rendimientos económicos, debido principalmente a los bajos costos del material residual. En este sector, se están construyendo y operando grandes plantas industriales para la producción de biocombustibles en diferentes países (Berg, 2004), con vista en el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles en el mundo. Se requiere, por tanto, evaluar el verdadero efecto que estas nuevas plantas biotecnológicas puedan tener sobre el medio ambiente.

Los combustibles alternativos, además de cumplir las normas de calidad establecidas, han de ser competitivos económicamente, estar ampliamente disponibles para todos los consumidores y, sobre todo, han de ser menos agresivos que los carburantes convencionales y, por consiguiente, su uso debe suponer un beneficio medioambiental para el país que los utilice.

4.2. INTRODUCCIÓN A LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Actualmente, se puede observar que el sector del transporte es dónde reside la búsqueda de escenarios alternativos a los combustibles fósiles. Este sector está abastecido principalmente con productos derivados del petróleo siendo responsables del 19% del consumo mundial de energía y del 25% de las emisiones de CO₂ (Eisentraut A. 2010).

El principal impulso para desarrollar procesos de producción de biocombustibles se basa en que son recursos renovables, proporcionan seguridad energética ya que posee un suministro muy diversificado, la mitigación del cambio climático y la creación de nuevas alternativas para la agricultura, incluyendo nuevos puestos de empleo.

Los biocombustibles son definidos como combustibles derivados a partir de recursos biológicos, sintetizados directa o indirectamente a través de la fotosíntesis. Los biocombustibles derivan de materia prima proveniente de los cultivos, como son el maíz, la soja, la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el trigo, la cebada, la yuca... todos estos biocombustibles de primera generación. También pueden provenir de biomasa lignocelulósica agrícola, que son residuos no comestibles de la producción de los cultivos alimentarios o biomasa vegetal no comestible (biocombustibles de segunda generación) (Koçar, et al. 2013).

Los biocombustibles líquidos que más se producen y consumen son el biodiesel y el bioetanol, que sustituyen al diésel fósil y a la gasolina respectivamente. En estos últimos años la producción mundial de combustibles ha aumentado dramáticamente.

Estos pueden producirse mediante (Renó, et al. 2011):

- Conversión química: Hidrólisis ácida, transesterificación, esterificación, extracción del fluido supercrítico, reformado en base acuosa
- Conversión biológica: Fermentación, digestión anaerobia, hidrólisis enzimática, conversión fotoquímica)
- Conversión termoquímica: Combustión, gasificación, pirolisis, licuefacción
- Medios mecánicos: Conminación, granulación, etc...

Con respecto al etanol, la producción se concentra principalmente en Estados Unidos y en Brasil. Se estima que en estos dos países representan aproximadamente el 80% de la producción mundial registrada en 2009. En Brasil, se produce más del 30% del etanol mundial, y su producción se concentra en la región centro sur, especialmente en São Paulo, que representa el 59% de la producción nacional y alrededor del 80% de la producción se consume en el país, donde el etanol reemplaza al 40-45% de la gasolina (Capaz, et al. 2013). La Unión Europea es la líder mundial en la producción de biodiesel (con el 78% del total mundial) y de consumo de biodiesel (Kumar, et al. 2013).

El mercado global de biocombustibles ha generado preocupaciones sobre su sostenibilidad, estas plantean desafíos para el desarrollo del mercado de biocombustibles, requiriendo más análisis y discusión. Algunos de los problemas son: El impacto potencial de los biocombustibles en la seguridad alimentaria y en los precios de los productos agrícolas, así como los impactos sociales y ambientales como la deforestación, el monocultivo, el agotamiento de los recursos hídricos y las condiciones laborales.

4.3. EL BIOETANOL Y SUS PROCESOS DE PRODUCCIÓN

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo, biomasa lignocelulósica etc.... Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa.

Las plantas crecen gracias al proceso de fotosíntesis, en el que la luz del sol, el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y los nutrientes de la tierra forman moléculas orgánicas complejas como el azúcar, los hidratos de carbono y la celulosa, que se concentra en la parte fibrosa la planta. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

Como fuente para la producción de etanol en el mundo se utiliza fundamentalmente biomasa. Este etanol es denominado, por su origen, bioetanol. La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente.

4.3.1. DEFINICIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOETANOL.

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible.

El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina, pero con una importante reducción de las emisiones

contaminantes en los motores tradicionales de combustión. El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10%, E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.

Un obstáculo importante, es la legislación europea sobre la volatilidad de las gasolinas, que fija la proporción de etanol en mezclas E5. Concentraciones más elevadas, autorizadas en Suecia y Estados Unidos, implica que se debe disponer de un vehículo flexible (FFV), con un depósito, motor y sistema de combustible único capaz de funcionar con gasolina y etanol, solos o mezclados en cualquier proporción. La otra alternativa para su uso es en forma de aditivo de la gasolina como etil-tercetil éter (ETBE), para oxigenar la gasolina normal, reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE). Este último es responsable de una considerable contaminación del suelo y del agua subterránea. También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible.

Las especificaciones para la utilización de bioetanol se encuentran en la norma Europea de Gasolinas EN 228, en España se encuentra transpuesta la Directiva 2003/17/CE relativa a la calidad de las gasolinas y gasóleo, en el Real Decreto R.D. 61/2006 de las especificaciones y uso de biocarburantes.

4.3.2. MATERIA PRIMA Y PROCESO DE OBTENCIÓN DEL BIOETANOL.

La vía descrita en este TFM se obtendrá a partir de la fermentación de azúcares (Figura 3). Por lo tanto, consistirán primero en la obtención de estos a partir de la materia prima, la fermentación para producir etanol y la purificación de este, debido a que las fermentaciones tienen lugar en medio acuoso.

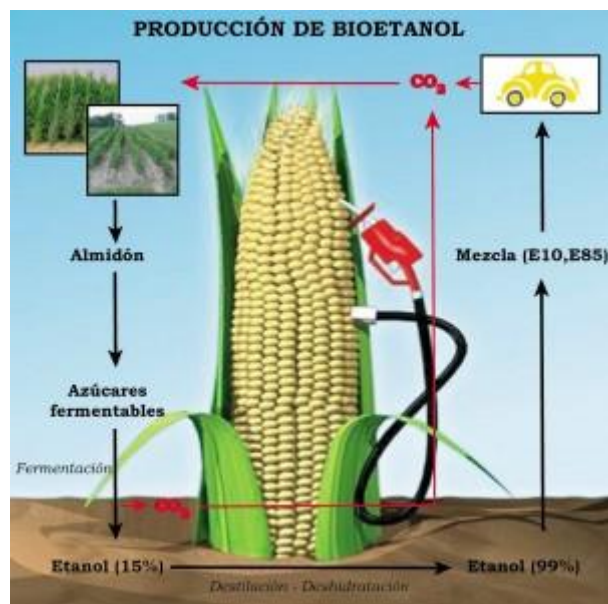


Figura 3. . Esquema general del proceso de obtención del bioetanol.

En general, se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

- Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha, por ejemplo.

- Almidón, mediante la fermentación de los azúcares del almidón presentes en los cereales, maíz, trigo...
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa.

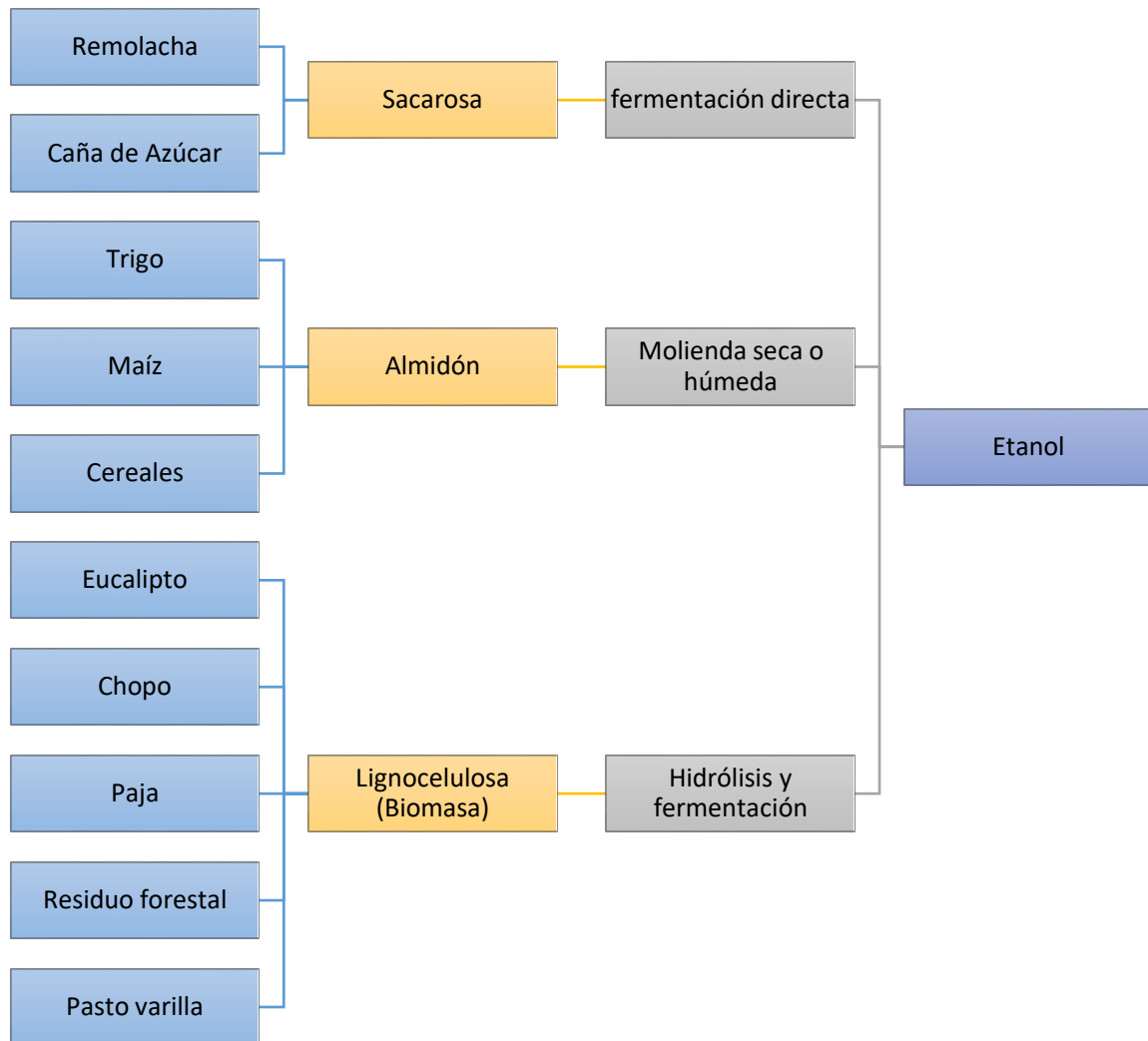


Figura 4. Vías en función de la molécula a partir de la que se sintetiza el etanol.

De esta forma encontramos la sacarosa (fermentación directa), el almidón (molienda seca o húmeda) y la lignocelulosa (hidrólisis y fermentación), (Figura 4). Cada una de estas moléculas, a su vez, puede obtenerse a partir de diversas materias primas.

El esquema general de fabricación del bioetanol (Figura 5), muestra las siguientes fases en el proceso:

- Dilución: Es la adición del agua para ajustar la cantidad de azúcar en la mezcla o (en última instancia) la cantidad de alcohol en el producto. Es necesaria porque la levadura, usada más adelante en el proceso de fermentación, puede morir debido a una concentración demasiado grande del alcohol.

- **Conversión:** La conversión es el proceso de convertir el almidón/celulosa en azúcares fermentables. Puede ser lograda por el uso de la malta, extractos de enzimas contenidas en la malta, o por el tratamiento del almidón (o de la celulosa) con el ácido en un proceso de hidrólisis ácida.
- **Fermentación:** La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico realizado por las levaduras, básicamente. De la fermentación alcohólica se obtienen un gran número de productos, entre ellos el alcohol.
- **Destilación o Deshidratación:** La destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla (etanol/agua). Una forma de destilación, conocida desde la antigüedad, es la obtención de alcohol aplicando calor a una mezcla fermentada

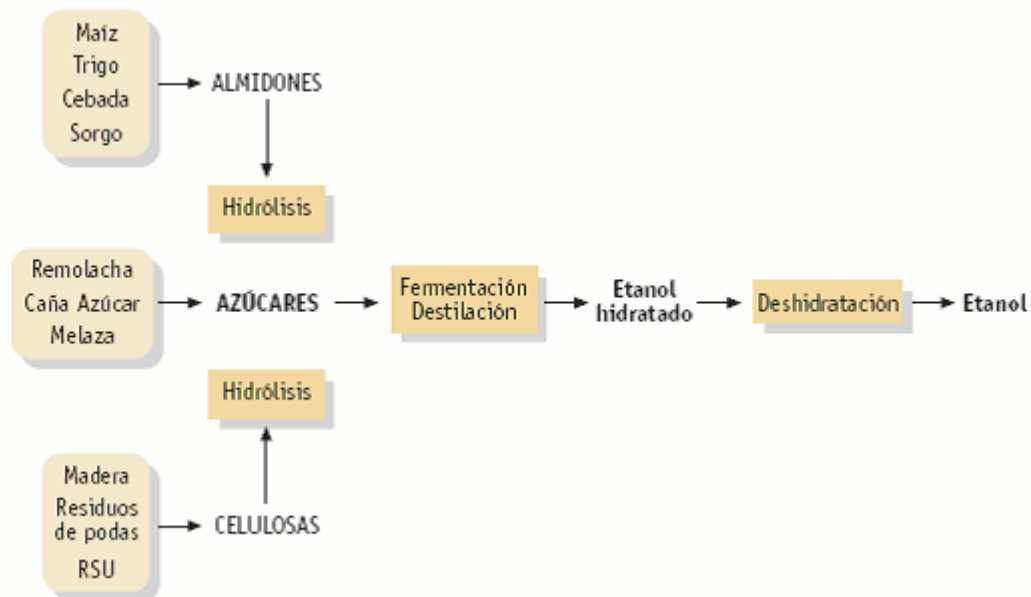


Figura 5. Esquema producción bioetanol.

4.3.3. SUBPRODUCTOS DE LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL.

Los subproductos generados en la producción de bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos:

- **Materiales lignocelulosícos:** tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta. En general se utilizan para valorización energética en cogeneración, especialmente para cubrir las necesidades energéticas de la fase de destilación del bioetanol, aunque también se puede vender el excedente a la red eléctrica.
- **Materiales alimenticios:** pulpa y granos de destilería de maíz desecados con solubles (DDGS), que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del bioetanol. Tienen interés para el mercado de piensos animales por su riqueza en proteína y valor energético. La caña

de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética. La remolacha azucarera genera, por su parte, unas 0,75 toneladas de pulpa por tonelada de bioetanol producido.

4.4. PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR

Los parámetros asociados al cultivo, como son el rendimiento agrícola y la concentración de polisacáridos, pueden indicar la viabilidad potencial para saber qué especie utilizar en la producción del combustible ecológico. Los cultivos como la caña de azúcar, el trigo y el maíz son el recurso natural más esencial que se utiliza para la producción de etanol.

Tabla 5. Cultivos agrícolas utilizados para la producción de etanol y su rendimiento. (Bertogli G, et al. 2008).

Cosecha		Media agrícola rendimiento (ton / ha)	Biocombustible promedio rendimiento (L / ha)
Cebada	<i>H. vulgare</i>	2,81	1050
Trigo	<i>Triticum</i>	3,01	2450
Maíz	<i>Zea mays L.</i>	5.16	3050
Remolacha azucarera	<i>Beta vulgaris</i>	53,15	5000
Caña de azúcar	<i>Saccharum L.</i>	69,86	6000

Como se observa en la Tabla 5, En comparación con el etanol a partir de maíz o remolacha azucarera, el etanol de caña de azúcar tiene resultados considerablemente más favorables en términos de equilibrio energético y reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En Brasil el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar varía de 80 a 85 toneladas de caña de azúcar por hectárea (t/ha), además se espera un aumento de las prácticas de labranza cero (Técnica de cultivo sin alteración del suelo mediante arado, Wikipedia, 2019) y los cambios más importantes pueden ocurrir en la cosecha de caña de azúcar, que se pasará de la cosecha manual de caña quemada a la cosecha mecánica de caña no quemada. Como consecuencia, estarán disponibles grandes cantidades de paja (residuos de la caña), y su uso como fuente de energía se convertirá en una opción atractiva, aunque la recuperación de esta paja (cosecha y transporte) aún no está bien establecida (Bordonal, et al. 2013).

Actualmente, la eficiencia industrial en la recuperación de azúcar es de alrededor del 90%. La generación y uso de coproductos en el proceso de producción de biocombustibles otorga buenos indicadores en términos energéticos, económicos y ambientales.

Los principales coproductos de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar son:

- Bagazo. Es el residuo de materia que queda después de que a la caña de azúcar se le extrae el jugo azucarado. Esos restos poseen una gran cantidad de fibras.

Se obtiene un promedio de bagazo de 250-290 kg/t, con un contenido de humedad del 50%, esto asegura la autosuficiencia energética a las fábricas y aún proporciona excedente de electricidad a la red, utilizando sistemas CHP, generalmente basados en ciclos de vapor. (Seabra, et al. 2010).

- Torta de filtro (Cachaza). La cachaza de caña de azúcar también conocida como torta de filtro, se obtiene después de clarificar y filtrar el jugo de caña en el proceso de fabricación de azúcar.
- Vinaza. Líquido espeso que queda después de la fermentación y destilación de la caña de azúcar.
- Cenizas residuales de la caldera. El residuo de la ceniza de bagazo de caña se obtiene en el fondo de la caldera y como cenizas volantes, este material es considerado puzolánico por algunos investigadores por presentar en su composición gran cantidad de SiO₂ (Cordeiro, et al. 2008).

Como observamos, el sector del azúcar tiene un gran potencial para aumentar la eficiencia en la producción, mediante la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol de segunda generación y la gasificación del bagazo de caña de azúcar para la producción de gas de síntesis y su posterior utilización en sistemas de cogeneración avanzados (Escobar, et al. 2011).

4.4.1 VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES DEL BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR.

Las ventajas medioambientales del bioetanol a partir de caña de azúcar se centran en la sustitución de la gasolina y la evitación de emisiones de GEI en todo el ciclo de vida. Las emisiones totales evitadas (incluidas las emisiones directas), cuando el excedente de energía de los coproductos se utiliza para reemplazar la gasolina considerado puede alcanzar los 12,5 kg CO₂/t (en un escenario medio) y 23.3 kg CO₂/t (en un escenario moderno).

El uso de los residuos de la caña de azúcar (mediante cosecha mecánica de caña no quemada), además del bagazo, como fuente de combustible podría aumentar en más del 50% la generación de electricidad excedente (Bordonal, et al. 2013).

La torta de filtro (Cachaza) y la vinaza pueden utilizarse en plantaciones de caña de azúcar como fertilizante, debido a la concentración de nitrógeno, fósforo y principalmente potasio en su composición. Este uso es conocido desde los años 60, la aplicación de este residuo en las plantaciones de caña de azúcar se ha intensificado desde 1979, influenciado por los problemas ambientales y el alto coste de los fertilizantes.

Rocha et al, presentó un balance de masa y energía de tratamiento y eliminación de vinaza, mostrando un ahorro de masa de fertilizante de 100% para el potasio, 35% para el nitrógeno y 20% para el fósforo estiércol, cuando la vinaza se aplica al 40% del área de la planta y matorrales. La industria del etanol

de caña de azúcar está experimentando enormes cambios tecnológicos que podrían definirse como nuevos paradigmas.

4.5. CÁLCULO DEL AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR (ADP)

En la Tabla 6 se muestra la clasificación de las categorías de impacto según la metodología CML.

En esta metodología se propone una lista de categorías de impacto clasificadas en tres grupos según su obligatoriedad o no de incluirlas en los ACV.

- Categorías de impacto obligatorias, utilizadas en la mayoría de ACVs
- Categorías de impacto adicionales, para las cuales existen indicadores, pero no siempre son incluidos.
- Otras categorías de impacto, para las cuales no se dispone de indicadores que permitan cuantificar el impacto y por tanto no son incluidas en los ACV.

Tabla 6. Clasificación de las categorías de impacto según la metodología CML. UNIVERSIDAD DE DEUSTO, (2012).

Categoría de impacto	Área de Protección ⁽¹⁾	Unidades ⁽²⁾	Escala geográfica	CML
Entradas				
Agotamiento recursos abióticos	IV	kg Sb a ⁻¹ ^(*)	Global	A
Energía	IV	MJ kg ⁻¹	Global	A
Uso del suelo Competitividad	IV		Local	A
Pérdida soporte vida	I, II, III		Local	B
Pérdida Biodiversidad	II		Local	B
Salidas				
Cambio climático	I, II, III	kg CO ₂	Global	A
Agotamiento Ozono	I, II, III, IV	kg CFC11	Global	A
Acidificación	I, II, III, IV	kg SO ₂ kg H ⁺ ^(*)	Continental/regional/local Global	A
Eutrofización	I, III, IV	kg PO ₄ ⁻³	Continental/regional/local	A
Formación Foto-oxidantes	I, II, III, IV	kg etileno	Continental/regional/local	A
Toxicitat humana	I	kg 124 DCB kg Pb aire ^(*)	Continental/regional/local Global	A
Ecotoxicitat Terrestre	II, IV	kg 124 DCB kg Zinc aire ^(*)	Continental/regional/local Global	A
Acuática marina	II, IV	kg 124 DCB	Continental/regional/local	A
Acuática agua dulce	II, IV	kg 124 DCB kg Zinc agua ^(*)	Continental/regional/local Global	A
Sedimento agua dulce	II, IV	kg 124 DCB	Continental/regional/local	B
Sedimento marino	II, IV	kg 124 DCB	Continental/regional/local	B
Otros				
Desecación		m ³	Local	C
Radiaciones			Regional/local	B
Olor			Local	B
Ruido			Local	C

⁽¹⁾Áreas de protección: I salud humana, II entorno natural, III entorno modificado por el hombre, IV recursos naturales

⁽²⁾Unidades propuestas por (Guinée y col., 2002) a excepción de ^(*)TEAM (1999) y ^(*)Audsley (1997)

La categoría que vamos a considerar es denominada agotamiento de recursos abióticos (Abiotic Depletion Potential, ADP), que se encuentra catalogada en el grupo A del método CML.

Este indicador categoría de impacto está relacionado con el consumo de recursos no renovables (considerando no renovables a los recursos que no sean reabastecidos por las fuerzas geológicas en un período de 500 años) o abióticos, es decir, con la extracción de minerales y combustibles fósiles, debido a las entradas en el sistema. Se puede definir como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales.

Los bienes materiales del ser humano provienen de recursos naturales. En el medio ambiente encontramos recursos que son útiles para la humanidad una vez extraídos, transformándolos en una sustancia útil para la humanidad. El crecimiento de la población y el aumento del consumo evidencian el agotamiento de ellos.

El factor de potencial de agotamiento abiótico se determina para cada extracción de elementos y combustibles fósiles en base a las reservas de concentración y la tasa de extracción. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global. Dependiendo de la referencia tomada, se tendrá un agotamiento de unos recursos abióticos o bien otro. Se suelen obtener dos categorías de impacto en este sentido, una referenciándolo al antimonio y obteniendo, por tanto, $kg\ Sb\ eq.$ y otra de agotamiento de los combustibles fósiles, que se expresa en MJ.

Incorporar esta categoría de agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles) y expresarlo en MJ, proviene de la necesidad de aportar información relevante adicional sobre la cantidad de energía consumida por un sistema. Una aproximación común es agregar las formas de consumo de energía multiplicando la energía de las fuentes extraídas del medio ambiente por sus reservas de energías.

El mayor productor a nivel mundial de bioetanol a partir de caña de azúcar es Brasil, siendo el área de mayor crecimiento el centro-sur del país, en la provincia de Sao Paulo. Es un cultivo con buenos rendimientos, pero muy condicionados al clima. El cultivo de caña de azúcar no sería viable en regiones con condiciones distintas de temperatura y humedad, como Europa.

Para obtener el inventario de los ADP para el proceso de obtención de bioetanol a partir de caña de azúcar se ha utilizado el software Simapro, a través de él se han podido obtener los ADP (de elementos y fósil) de los insumos utilizados durante el proceso de producción.

Para cada insumo el software asigna un ADP, y finalmente ésta es la suma de los diferentes ADP de los elementos utilizados para poder producir y generar el insumo en cuestión (incluyendo transporte y proceso de producción).

Se determina que el ADP total para el proceso de producción de bioetanol es $2,07E-6\ Kg_{Sb\ eq}/Kg_{etanol}$, y para el ADP fósil su total es $4,19\ MJ_{eq}/Kg_{etanol}$.

A partir de estos datos se han obtenido los diversos insumos y materias primas que forman parte del proceso global de producción de bioetanol.

Se desea comparar, tanto el proceso de producción como el de cultivo, ya que forman parte de la producción de bioetanol.

Se representa continuación la Tabla 7 con los ADP elementos y ADP fósil con más impacto para el proceso de producción de bioetanol. En la Tabla 8 se observa lo mismo para el proceso de cultivo de caña de azúcar, ya que en la producción determinamos que este proceso de cultivo es el que más impacto tiene. Ambos procesos se detallan en el Anexo II y III.

Tabla 7. ADP elementos y ADP fósil para el proceso de producción de bioetanol. Datos obtenidos por Simapro (base de datos: Ecoinvent).

	Abiotic depletion	Abiotic depletion (fossil fuels)
Unidad	$\frac{Kg_{Sb\ eq}}{Kg_{etanol}}$	$\frac{MJ_{eq}}{Kg_{etanol}}$
Ácido sulfúrico	2,484E-07	0,06
Cal hidratada	-	0,16
Aceite lubricante	-	0,12
Vinaza (de la fermentación de la caña)	-	0,12
Producción caña de azúcar (cultivo)	1,8128E-06	3,72

Como se observa en la siguiente tabla, podemos calcular el impacto que tiene cada insumo del proceso de producción para el cálculo del ADP total.

Para el ADP elementos:

- 12% Ácido sulfúrico.
- 87,4% Producción caña de azúcar (cultivo).

Para el ADP fósil:

- 3,88% Cal hidratada.
- 2,93% Aceite lubricante.
- 2,87% Vinaza (De la fermentación de la caña).

- 1,35% Ácido sulfúrico.
- 88,7% Producción caña de azúcar (cultivo).

Como se observa en la siguiente tabla, podemos calcular que el proceso de cultivo de caña contribuye en un 87,4% en el ADP total y un 88,7% en el ADP fósil total.

A continuación, se muestra la Tabla 8 con los ADP elementos y ADP fósil que más impacto ocasionan dentro del proceso de cultivo de caña de azúcar.

Tabla 8. ADP elementos y ADP fósil para la producción de caña de azúcar. Datos obtenidos por Simapro (base de datos: Ecoinvent)

	Abiotic depletion	Abiotic depletion (fossil fuels)
Unidad	$\frac{Kg_{Sb\ eq}}{Kg_{etanol}}$	$\frac{MJ_{eq}}{Kg_{etanol}}$
Total (Consultar el resto de insumos en los Anexos I y II)	1,81E-06	3,72
Fertilizante nitrogenado, como N	1,31E-07	0,25
Pesticida	1,18E-06	-
Fertilizante de fosfato, como P₂O₅	4,27E-07	-
Fertilizante de potasio, como K₂O, suministro de nutrientes de las cenizas, de la combustión del bagazo de la caña de azúcar	2,72E-08	-
Regadío	-	1,69
Cambio de uso del suelo, cultivo perenne	-	0,26

Dentro de este proceso de cultivo determinamos el impacto de cada insumo:

Para el ADP elementos:

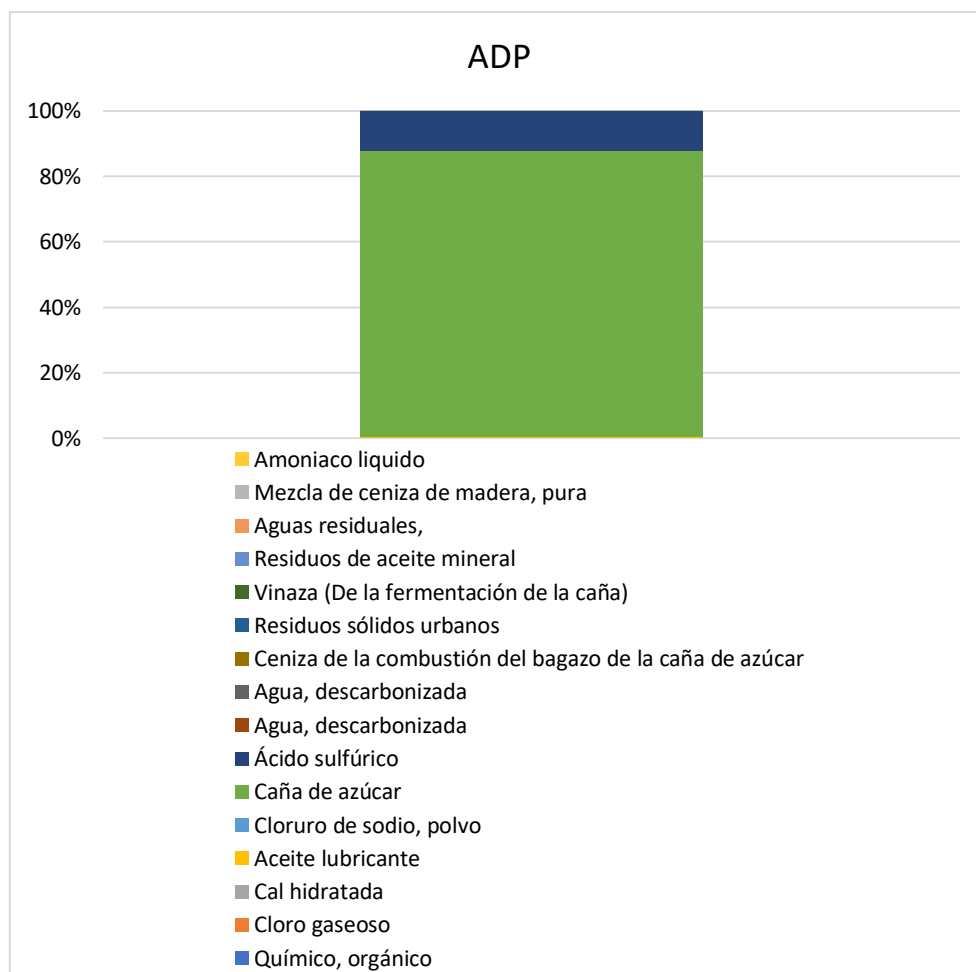
- 65,1 % Uso de pesticidas.
- 23,6 % Fertilizante fosfato, como P₂O₅.
- 7,24 % Fertilizante nitrogenado, como N.

- 1,5 % Fertilizante potásico, como K_2O .

Para el ADP fósil:

- 45,5 % Regadío.
- 6,95 % Cambio en el uso del suelo.
- 6,78 % Fertilizante nitrogenado, como N.

En el siguiente diagrama (Figura 6) se muestran las contribuciones de los diferentes procesos en el total de ADP. Se observa como la fase de cultivo de caña de azúcar es la que más impacto tiene en el total de ADP



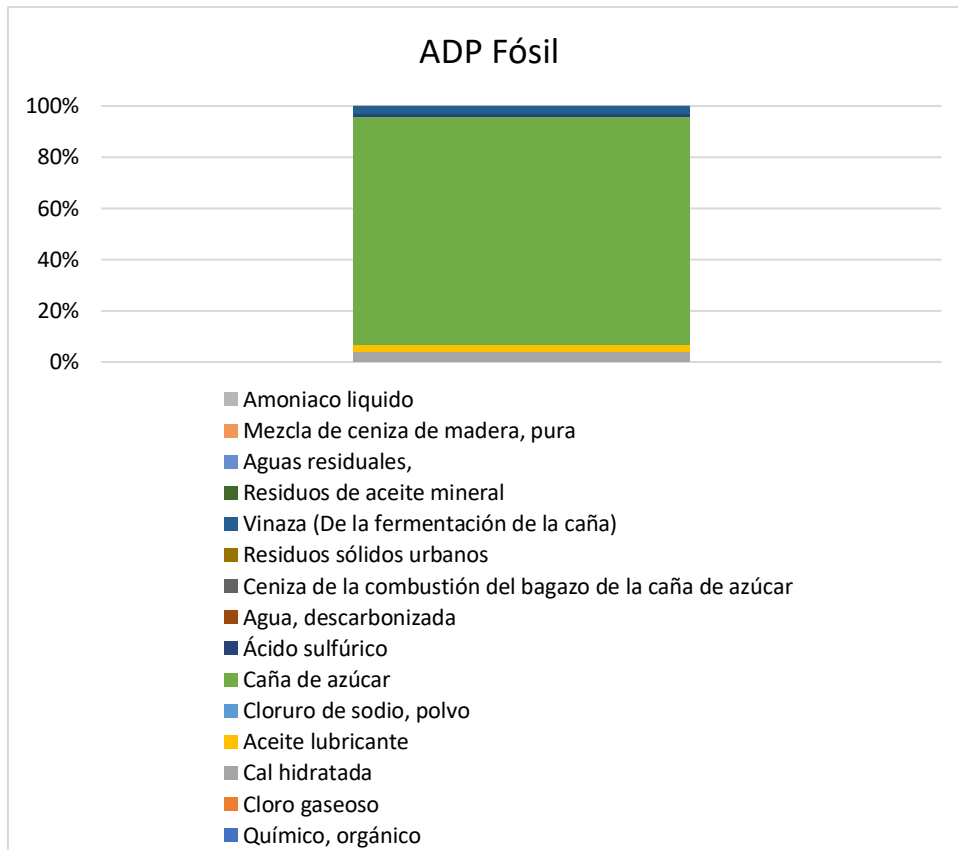


Figura 6. Diagrama contribución en % de los procesos de obtención de bioetanol.

4.5.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS

A través de los porcentajes y los ADP aportados se observa que el proceso de producción de caña de azúcar (cultivo) es el que más impacto tiene en el total del ADP y ADP fósil, contribuyendo un 87,4% en el ADP y un 88,7% en el ADP fósil.

Por lo que, tras realizar un análisis de los resultados con el software Simapro, se determina que el proceso de producción de caña de azúcar (cultivo) es el que más impacto tiene a la hora del cálculo del factor ADP para todo el proceso global de obtención de bioetanol.

Todos estos insumos han tenido en cuenta el transporte y los procesos necesarios para su obtención en el proceso de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar. La etapa agrícola tiene los mayores impactos en ADP, debido al gran consumo de fertilizantes, pesticidas y combustible diésel.

Para el ADP elementos dentro de la etapa de cultivo, los pesticidas y fertilizantes como el fosfato, son los que tienen mayor porcentaje dentro del agotamiento de recurso abiótico, debido a que los insumos que se utilizan para su proceso presentan altos valores de ADP.

Para el ADP elementos tanto el ácido sulfúrico por su alto valor de extracción y el regadío en el proceso de cultivo por su gasto en combustible diésel.

4.5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como se desarrolla en un estudio realizado por Capaz (2009) para mejorar estos datos relacionados con el cultivo de caña de azúcar y los ADP tengan un impacto menor, sería necesario establecer dentro de la etapa agrícola un aumento de las prácticas de labranza cero y siembra mecánica.

Las prácticas de labranza cero es una técnica de cultivo sin alteración del suelo mediante arado. La labranza cero sin arado incrementa la cantidad de agua que se infiltra en el suelo, aumenta la retención de materia orgánica y la conservación de nutrientes en el suelo. En muchas regiones agrícolas evita la erosión del suelo y previene organismos causantes de plagas, ya que se mantiene el equilibrio ecológico del suelo debido a que también se protegen los organismos que contrarrestan las enfermedades. El beneficio más importante de la siembra directa es la preservación de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, haciendo que los suelos adquieran más resiliencia.

En la cosecha de caña, se deberá pasar de la cosecha manual de caña quemada a la cosecha mecánica de caña no quemada. Como consecuencia, estarán disponibles grandes cantidades de paja y su uso como fuente de energía es una opción atractiva. El uso de los residuos de la caña de azúcar (mediante cosecha mecánica de caña no quemada), además del bagazo, como fuente de combustible podría aumentar en más del 50% la generación de electricidad excedente (Bordonal, et al. 2013).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Es imposible definir un método correcto para evaluar el problema del agotamiento de los recursos abióticos, ya que la elección de los parámetros relevantes que componen el modelo dependerá de la definición del problema, y la corrección de los parámetros no puede verificarse empíricamente.

Sin embargo, la definición del problema y las elecciones realizadas para definir el modelo de caracterización darán como resultado diferentes conjuntos de caracterizaciones. El modelo de agotamiento abiótico de recursos tal como se define en el ADP (Oers, et al. 2002) es una función de la tasa de extracción anual y la reserva geológica de un recurso. En el modelo tal como se define actualmente, la reserva final se considera la mejor estimación de la reserva extraíble en última instancia y también el parámetro más estable para el parámetro de reserva.

La USGS actualiza regularmente las tasas de extracción y las reservas (Drielsma, et al. 2016), en parte como resultado de cambios en la tecnología y nuevas ideas. Como consecuencia, los factores de caracterización también deben actualizarse regularmente, pero desafortunadamente esto ya no se hace.

La categoría de impacto del agotamiento de los recursos abióticos, tal como se define en la CML (Guinée, et al. 1995 y Oers, et al. 2002) comprende solo el agotamiento de los recursos ambientales. La criticidad de los recursos no es parte de la definición del problema. Recomendamos no incluir la criticidad en el ACV ambiental, ya que trata más que solo los aspectos ambientales.

Podría incluirse en el marco más amplio de LCSA, que también trata de incorporar la evaluación económica y social en el pensamiento del ciclo de vida. Un posible nuevo desarrollo para el modelo de caracterización definido por Oers et al. (2002) es la redefinición del agotamiento de los recursos como un problema de dilución. Esto implica la inclusión de reservas en la economía en el parámetro de reserva y el uso de fugas de la economía, en lugar de la tasa de extracción, como parámetro de dilución. Sin embargo, esta idea aún no se ha resuelto, y aún no hay factores de caracterización operativa disponibles.

A continuación, se presenta un resumen de lo que en esta investigación se ha considerado parte del problema del agotamiento abiótico de los recursos:

- Área de protección: Desde un punto de vista funcional, el interés de la humanidad por los recursos abióticos no es el recurso en sí mismo (valor intrínseco) sino su potencial para cumplir funciones para la humanidad. El agotamiento de los recursos se puede definir como; El agotamiento abiótico

de los recursos es la disminución de la disponibilidad de la reserva total de funciones potenciales de los recursos.

- Subcategorías de la categoría de impacto agotamiento de los recursos abióticos: En teoría, el agotamiento de las diferentes funciones potenciales son categorías de impacto separadas. Las funciones son únicas y no se pueden intercambiar directamente. Por lo tanto, el agotamiento de las funciones potenciales representa diferentes problemas (ambientales). Para sumar los diferentes agotamientos de las funciones potenciales a un puntaje de agotamiento general, se necesita un paso de ponderación subjetiva posterior. Sin embargo, esto no se ha resuelto en este TFM.
- Escala de tiempo del problema; tipo de depósitos de recursos, fondos y flujos: Dependiendo de la escala de tiempo en que se repone un recurso, se pueden distinguir tres tipos diferentes de recursos abióticos: depósitos, fondos y flujos. Este TFM está restringido al tipo de depósito de recursos abióticos. En este TFM, los depósitos se definen como recursos que las fuerzas geológicas no reponen o descomponen en un horizonte temporal de 500 años.
- Indicador; tasa de reserva y/o extracción: El indicador para el agotamiento de los recursos abióticos puede basarse en la reserva del recurso, la tasa de extracción del recurso o tanto la reserva como tasa de extracción. Los tres indicadores han sido elaborados. El agotamiento de los recursos abióticos también se puede definir como un problema de dilución de (funciones de) los recursos (por ejemplo, disminución de las concentraciones). Este último indicador no se ha resuelto en este proyecto.
- Agotamiento versus competencia: El agotamiento se ocupa de la disminución de la disponibilidad de la reserva total de funciones potenciales de recursos en el futuro debido al uso por parte de los sistemas del producto en la actualidad. La competencia aborda el problema de la disponibilidad reducida debido al uso del recurso por parte de los sistemas del producto al mismo tiempo. La competencia no se considera un problema ambiental y no se resuelve en este proyecto.
- Reservas en economía y medio ambiente: En teoría, desde un punto de vista funcional, la reserva de un recurso incluye reservas tanto en la naturaleza como en la economía (el stock total de productos de los cuales se pueden reciclar materiales secundarios), siempre que las funciones potenciales de ese material en la economía todavía están disponibles. En la línea de base actual del agotamiento abiótico de los recursos, las reservas están restringidas a las reservas en el medio ambiente. El desarrollo de un enfoque basado en reservas ambientales y económicas estaba más allá del alcance de este TFM.
- Tamaño de la reserva; reserva final, base de reserva o reserva económica: La estimación de la reserva de recursos es problemática. Está determinado por las supuestas posibilidades técnicas y económicas para extraer el recurso. La reserva que en última instancia puede extraerse técnicamente

puede denominarse la reserva extraíble definitiva. Esta reserva es, por definición, imposible de determinar y solo puede abordarse mediante estimaciones superiores (reserva final) o inferiores (reserva económica y base de reservas). Debido a estas incertidumbres, en este proyecto se han derivado factores de caracterización basados en la reserva final.

- Escala espacial del problema; regional versus global: El mercado de elementos y minerales es regional a global. La oferta y la demanda de estos materiales están conectadas por el transporte de los materiales en última instancia en todo el mundo. Por lo tanto, el agotamiento de los recursos abióticos y sus funciones potenciales pueden definirse como un problema global. En este proyecto, se han derivado factores de caracterización para el agotamiento de todos los materiales a escala mundial. No se han derivado factores regionalmente diferenciados.

Por último, se aplica este parámetro estudiado a la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, y se determina lo siguiente:

Se ha verificado que el método que utiliza Simapro es el mejor método definido hasta el momento, es decir, el recomendado en el Manual holandés de ACV (Guinée et al., 2002).

- Se utiliza el software Simapro, a través de él se han podido obtener los ADP (de elementos y fósil) de los insumos utilizados durante el proceso de producción.
- Se determina que el proceso de producción de caña de azúcar es el que más impacto tiene a la hora de determinar el ADP total (de elementos y fósil) del proceso de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar.
- Este resultado es debido al gran consumo de pesticidas y fertilizantes en la etapa de cultivo.
- Para mejorar estos datos y que los ADP de la fase de cultivo tengan un impacto menor, sería necesario establecer dentro de la etapa agrícola un aumento de las prácticas de labranza cero y siembra mecánica.

ANEXO I. CÁLCULO DEL FACTOR DE CARACTERIZACIÓN ADP

ELEMENTOS	Extracción: DR_i		Reserva: R_i	$\frac{DR_i}{(R_i)^2}$	$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \cdot \frac{DR_{ref}}{(R_{ref})^2}$
	Unidad: $\frac{Kg_i}{año}$		Unidad: Kg_i	Unidad: $\frac{Kg_i}{año} \cdot \frac{1}{(Kg_i)^2}$	Unidad: $\frac{kg_{eq-Sb}}{kg_i}$
	P	G	R	P-G/R2	ADP
Actinium (Ac)	NA	0,00E+00	1,27E+07	-	-
Aluminium (Al)	2,31E+10	0,00E+00	1,93E+21	6,23E-33	1,09E-09
Antimony (Sb)	1,22E+08	0,00E+00	4,63E+15	5,69E-24	1,00E+00
Argon (Ar)	NA	0,00E+00	1,48E+17	-	-
Arsenic (As)	2,94E+07	0,00E+00	4,17E+16	1,69E-26	2,97E-06
Barium (Ba)	3,33E+09	0,00E+00	9,84E+18	3,44E-29	6,04E-03
Beryllium (Be)	3,01E+05	0,00E+00	6,48E+16	7,16E-29	1,26E-05
Bismuth (Bi)	3,62E+06	0,00E+00	3,94E+15	2,34E-25	4,11E-02
Boron (B)	1,37E+09	0,00E+00	2,38E+17	2,43E-26	4,27E-03
Bromine (Br)	5,30E+08	0,00E+00	1,46E+17	2,50E-26	4,39E-03
Cadmium (Cd)	1,91E+07	0,00E+00	4,63E+15	8,91E-25	1,57E-01
Calcium (Ca)	NA	0,00E+00	9,61E+20	-	-
Cerium (Ce)	NA	0,00E+00	1,39E+18	-	-
Cesium (Cs)	NA	0,00E+00	2,31E+16	-	-
Chlorine (Cl)	1,27E+11	0,00E+00	2,87E+19	1,54E-28	2,71E-05
Chromium (Cr)	1,35E+10	0,00E+00	2,31E+18	2,52E-27	4,43E-04
Cobalt (Co)	2,99E+07	0,00E+00	5,79E+17	8,93E-29	1,57E-05
Copper (Cu)	1,26E+10	0,00E+00	1,27E+18	7,77E-27	1,37E-03
Dysprosium (Dy)	NA	0,00E+00	6,94E+16	-	-
Erbium (Er)	NA	0,00E+00	6,48E+16	-	-
Europium (Eu)	NA	0,00E+00	2,78E+16	-	-
Fluorine (F)	NA	0,00E+00	1,45E+19	-	-
Gadolinium (Gd)	NA	0,00E+00	1,25E+17	-	-
Gallium (Ga)	1,00E+05	0,00E+00	3,47E+17	8,29E-31	1,46E-07
Germanium (Ge)	5,80E+04	0,00E+00	1,25E+17	3,71E-30	6,52E-07
Gold (Au)	2,54E+06	0,00E+00	9,26E+13	2,96E-22	5,20E+01
Hafnium (Hf)	NA	0,00E+00	1,09E+17	-	-
Helium (He)	2,40E+07	0,00E+00	0,00E+00	-	-
Holmium (Ho)	NA	0,00E+00	2,78E+16	-	-
Indium (In)	2,15E+05	0,00E+00	2,34E+15	3,92E-26	6,89E-03
Iodine (I)	1,93E+07	0,00E+00	1,17E+16	1,42E-25	2,50E-02
Iridium (Ir)	NA	0,00E+00	2,31E+13	-	-
Iron (Fe)	5,07E+11	0,00E+00	1,30E+21	2,98E-31	5,24E-08
Kalium (K;Potassium)	2,13E+10	0,00E+00	4,84E+20	9,09E-32	1,60E-08
Krypton (Kr)	NA	0,00E+00	2,21E+13	-	-
Lanthanum (La)	NA	0,00E+00	6,94E+17	-	-
Lead (Pb)	3,02E+09	0,00E+00	2,89E+17	3,61E-26	6,34E-03
Lithium (Li)	1,40E+07	0,00E+00	4,63E+17	6,52E-29	1,15E-05
Lutetium (Lu)	NA	0,00E+00	1,16E+16	-	-
Magnesium (Mg)	3,37E+09	0,00E+00	5,41E+20	1,15E-32	2,02E-09

Manganese (Mn)	6,99E+09	0,00E+00	2,20E+19	1,45E-29	2,54E-06
Mercury (Hg)	1,80E+06	0,00E+00	1,85E+15	5,25E-25	9,22E-02
Molybdenum (Mo)	1,22E+08	0,00E+00	3,47E+16	1,01E-25	1,78E-02
Neodymium (Nd)	NA	0,00E+00	6,48E+17	-	-
Neon (Ne)	NA	0,00E+00	1,78E+14	-	-
Nickel (Ni)	1,12E+09	0,00E+00	1,74E+18	3,72E-28	6,53E-05
Niobium (Nb)	2,36E+07	0,00E+00	4,63E+17	1,10E-28	1,93E-05
Osmium (Os)	NA	0,00E+00	3,47E+13	-	-
Palladium (Pd)	1,74E+05	0,00E+00	2,31E+14	3,25E-24	5,71E-01
Phosphorus (P)	1,85E+10	0,00E+00	2,43E+19	3,14E-29	5,52E-06
Platinum (Pt)	1,69E+05	0,00E+00	1,16E+14	1,26E-23	2,22E+00
Polonium (Po)	NA	0,00E+00	4,63E+06	-	-
Praseodymium (Pr)	NA	0,00E+00	1,90E+17	-	-
Protactinium (Pa)	NA	0,00E+00	3,24E+10	-	-
Radium (Ra)	NA	0,00E+00	2,08E+10	-	-
Radon (Rn)	NA	0,00E+00	9,26E+03	-	-
Rhenium (Re)	4,60E+04	0,00E+00	1,16E+14	3,43E-24	6,03E-01
Rhodium (Rh)	NA	0,00E+00	2,31E+13	-	-
Rubidium (Rb)	NA	0,00E+00	2,08E+18	-	-
Ruthenium (Ru)	NA	0,00E+00	2,31E+13	-	-
Samarium (Sm)	NA	0,00E+00	1,39E+17	-	-
Scandium (Sc)	NA	0,00E+00	5,09E+17	-	-
Selenium (Se)	1,48E+06	0,00E+00	1,16E+15	1,10E-24	1,94E-01
Silicium (Si; Silicon)	3,40E+09	0,00E+00	6,53E+21	7,98E-35	1,40E-11
Silver (Ag)	1,77E+07	0,00E+00	1,62E+15	6,74E-24	1,18E+00
Sodium (Na)	9,84E+10	0,00E+00	5,60E+20	3,13E-31	5,50E-08
Strontium (Sr)	3,04E+08	0,00E+00	8,69E+18	4,02E-30	7,07E-07
Sulfur (S)	5,71E+10	0,00E+00	7,21E+18	1,10E-27	1,93E-04
Tantalum (Ta)	4,95E+05	0,00E+00	4,63E+16	2,31E-28	4,06E-05
Tellurium (Te)	1,24E+05	0,00E+00	2,31E+13	2,31E-22	4,07E+01
Terbium (Tb)	NA	0,00E+00	2,08E+16	-	-
Thallium (Tl)	1,50E+04	0,00E+00	1,04E+16	1,38E-28	2,43E-05
Thorium (Th)	NA	0,00E+00	2,22E+17	-	-
Thulium (Tm)	NA	0,00E+00	1,11E+16	-	-
Tin (Sn)	1,98E+08	0,00E+00	4,63E+16	9,24E-26	1,62E-02
Titanium (Ti)	2,76E+09	0,00E+00	1,32E+20	1,59E-31	2,79E-08
Tungsten (W); Wolfram	3,10E+07	0,00E+00	3,47E+16	2,57E-26	4,52E-03
Uranium (U)	NA	0,00E+00	6,25E+16	-	-
Vanadium (V)	4,28E+07	0,00E+00	3,13E+18	4,38E-30	7,70E-07
Xenon (Xe)	NA	0,00E+00	7,65E+11	-	-
Ytterbium (Yb)	NA	0,00E+00	6,94E+16	-	-
Yttrium (Y)	1,89E+06	0,00E+00	7,64E+17	3,24E-30	5,69E-07
Zinc (Zn)	8,04E+09	0,00E+00	1,62E+18	3,06E-27	5,38E-04
Zirconium (Zr)	4,52E+08	0,00E+00	3,82E+18	3,10E-29	5,44E-06

ANEXO II. ADP PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Categoría de impacto	Unidad	Total	Amoníaco líquido	Químico, orgánico	Cloro gaseoso	Lima hidratada	Aceite lubricante	Cloruro de sodio, polvo	Caña de azúcar	Ácido sulfúrico
Abiotic depletion (fossil fuels)	kg Sb eq	2,0731E-06	5,68475E-14	3,5836E-11	1,2709E-12	1,0351E-09	9,7115E-09	4,9407E-13	1,8128E-06	2,4871E-07
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	4,19174987	7,74167E-06	0,00814518	0,00011068	0,16270889	0,1228366	0,00023515	3,71926979	0,05646245
Categoría de impacto	Unidad	Total	Agua, descarbonizada	Ceniza de la combustión del bagazo de la caña de azúcar	Residuos sólidos urbanos	Vinaza (De la fermentación de la caña)	Residuos de aceite mineral	Aguas residuales,	Mezcla de ceniza de madera, pura	
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,0731E-06	4,63445E-12	0	5,6417E-12	2,4412E-11	2,0553E-13	1,1872E-12	7,482E-10	
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	4,19174987	0,000145678	0	1,2187E-05	0,12042452	8,247E-06	4,6046E-05	0,00133671	

ANEXO III. CÁLCULO DEL ADP PRODUCCIÓN CAÑA AZÚCAR (CULTIVO)

	Unidad	Total	Fertilizante nitrogenado, como N	Pesticida	Fertilizante de fosfato, como P2O5	Fertilizante de potasio, como K2O, suministro de nutrientes de las cenizas, de la combustión del bagazo de la caña de azúcar	Regadío	Cambio de uso del suelo, cultivo perenne	Otros
Abiotic depletion	$\frac{Kg_{sb,as}}{Kg_{caña}}$	Proceso de producción a partir de caña de azúcar	9,15929E-09	8,23608E-08	2,98176E-08	1,90E-09	2,98635E-10	5,6588E-11	2,868E-09
	% contribución ADP	1,26462E-07	7,24	65,13	23,58	1,50	0,24	0,04	2,27
	$\frac{Kg_{sb,e}}{Kg_{etca}}$	Todos los procesos que intervienen	2,07E-06	*El 87,4% del total ADP es debido a la producción a partir de caña de azúcar					
Abiotic depletion (fossil fuels)	$\frac{MJ_{ex}}{Kg_{caña}}$	Proceso de producción a partir de caña de azúcar	0,015006888	0,007445007	0,01787151	0,003843305	0,100612284	0,01537163	0,0610862
	% contribución ADP	0,221236817	6,78	3,37	8,08	1,74	45,48	6,95	27,61
	$\frac{MJ_{ex}}{Kg_{etca}}$	Todos los procesos que intervienen	4,19	*El 88,7% del total ADP es debido a la producción a partir de caña de azúcar					
		Proceso de producción a partir de caña de azúcar	2,52E-01	1,25E-01	3,00E-01	6,46E-02	1,69E+00	2,58E-01	1,03E+00

REFERENCIAS

- [1] UDO DE HAES, H.A., JOLLIET, O., FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M., KREWIT, W., MÜLLER-WENK, R. (1999) *Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment.*
- [2] JOLLIET, O.; MULLER-WENK, R.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PENA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; ET AL (2004). *The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative.*
- [3] GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R. (1995). *A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life-Cycle Assessment. Environ. Toxicol.*
- [4] EUROPEAN COMMISSION, (2010) *ILCD Handbook, General Guide for Life Cycle Assessment—Detailed Guidance; European Commission.*
- [5] VAN OERS, L.; DE KONING, A.; GUINÉE, J.B.; HUPPES, G. (2002) Abiotic resource depletion in LCA. *Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook.*
- [6] GUINÉE, J.B.; GORÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; DE KONING, A.; VAN OERS, L.; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; ET AL. (2002) *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards.*
- [7] EUROPEAN COMMISSION, (2011). *In ILCD handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context—Based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors; European Commission.*
- [8] CML-IA CHARACTERISATION FACTORS. Available online: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

- [9] KLINGLMAIR, M; SALA, S.; BRANDÃO, M. (2014). *Assessing resource depletion in LCA: A review of methods and method logical issues. Int. J. Life Cycle Assess.*
- [10] DRIELSMA, J.A.; RUSSELL-VACCARI, A.J.; DRNEK, T.; BRADY, T.; WEIHED, P.; MISTRY, M.; PEREZ SIMBOR, L. (2016) *Mineral resources in life cycle impact assessment—Defining the path forward. Int. J. Life Cycle Assess.*
- [11] Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)
- [12] United States Geological Survey. Commodity Statistics and Information, Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of minerals and materials essential to the U.S. economy, the national security, and protection of the environment (2015)
- [13] SKINNER, B.J. (2001) *Exploring the resource base. In Proceedings of the workshop on “The Long-Run Availability of Minerals”.*
- [14] FRISCHKNECHT, R.; BÜSSER KNÖPFEL, S. (2013) *Swiss Eco-Factors according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland.*
- [15] VAN DER VOET, E. (2013) *Criticality and abiotic resource depletion in life cycle assessment. In Security of Supply and Scarcity of Raw Materials. Towards a Methodological Framework for Sustainability Assessment.*
- [16] EUROPEAN COMMISSION (2010) *Critical raw materials for the EU; Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.*
- [17] UNEP-SETAC (2015). *Life Cycle Sustainability Assessment.*
- [18] LIDE, D.R., ED. (1990) *CRC Handbook of Chemistry and Physics.*
- [19] RUDNICK, R.L.; GAO, S. (2005) *Composition of the continental crust.*
- [20] CLARKE, F.W. (1924) *The Composition of the Earth’s Crust; USGS Professional.*
- [21] SCHNEIDER, L.; BERGER, M.; FINKBEINER, M. (2015) *Abiotic resource depletion in LCA- background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP)*
- [22] VADENBO, C.; RORBECH, J.; HAUPT, M.; FRISCHKNECHT, R. (2014) *Abiotic resources: New impact assessment approaches in view of resource efficiency and resource criticality.*
- [23] SCHNEIDER, L.; BERGER, M.; FINKBEINER, M. (2011). *The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources.*

- [24] WEGENER SLEESWIJK, A.; VAN OERS, L.F.C.M.; GUINÉE, J.B.; STRUIJS, J.; HUIJBREGTS, (2008) *Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000.*
- [25] BERNER, R.A. & LASAGA, A.C. (1989) *Modelling the geochemical carbon cycle.*
- [26] WRI, (1994). *A guide to the global environment.* World Resource Institute. Oxford University Press.
- [27] BERG, C. (2004). *World Fuel Ethanol. Analysis and Outlook.*
- [28] UNIVERSIDAD DE DEUSTO, (2012). *Metodología para el análisis de ciclo de vida de depuradoras de aguas residuales.*
- [29] EISENTRAUT A. (2010). *Sustainable production of second-generation biofuels. Potential and perspectives in major economies and developing countries. International Energy Agency (IEA).*
- [30] KOÇAR G, ET AL. (2013). *An over view of biofuels from energy crops: current status and future prospects. Renew Sustain Energy Rev.*
- [31] RENÓ MLG, ET AL. (2011). *Of the methanol production from sugar cane bagasse.*
- [32] CAPAZ RS, ET AL. (2013). *Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugar cane harvesting operations in Brazil.*
- [33] KUMAR N, ET AL. (2013). *Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins: a review. Renew Sustain Energy Rev.*
- [34] BORDONAL RO, ET AL. (2013). *Greenhouse gas mitigation potential from Green harvested sugar cane scenarios in São Paulo State, Brazil. Biomass Bioenergy.*
- [35] Siembra directa, En WIKIPEDIA. Recuperado en agosto de 2019.
- [36] G. C. CORDEIRO, ET AL. (2008). *Cement and concrete research.*
- [37] SEABRA JEA, ET AL. (2010). *A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugar cane mill clustering. Biomass Bioenergy.*
- [38] ESCOBAR JCP, ET AL. (2011). *Cogeneration options for improving the competitiveness of a cane-based ethanol plant in Brazil.*
- [39] ROCHA MH, ET AL. (2010). *Use of the life cycle assessment (LCA) for comparison of the environmental performance of four alternatives for the treatment and disposal of bioethanol stillage.*

- [40] ROCHA MH, ET AL. (2008). *Analysis of different alternatives for the treatment and disposal of ethanol vinasse*
- [41] CAPAZ, RS. (2009). *Estudo do desempenho energético da produção de biocombustíveis: Aspectos metodológicos e estudo de caso* (Study of the energy performance of biofuels production: Methodological aspects and case study).
- [42] GUINÉE, J. B, ET AL. (1995). *A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment*. Environmental toxicology and chemistry.