

**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA ACV EN
LA CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA
GESTIÓN DE LOS BIORRESIDUOS MUNICIPALES DE LA CIUDAD DE
CALI.**

ANA CAROLINA ZULUAGA PARRA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA ACV EN
LA CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA
GESTIÓN DE LOS BIORRESIDUOS MUNICIPALES DE LA CIUDAD DE
CALI.**

ANA CAROLINA ZULUAGA PARRA

**Proyecto De Grado para optar por el título de
Ingeniera Ambiental**

**Directora
VERÓNICA MANZI TARAPUÉS
Ingeniera Sanitaria
Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Ambiental

MARIO ANDRES GANDINI

Jurado

LUIS FERNANDO MARMOLEJO

Jurado

Santiago de Cali, 4 de Febrero de 2014

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1 ANTECEDENTES	15
2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	22
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	24
3 OBJETIVOS	25
3.1 OBJETIVO GENERAL	25
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	25
4 MARCO TEÓRICO	26
4.1 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA GESTIÓN DE LOS BIORRESIDUOS	26
4.1.1 Impactos ambientales generados por la producción de gases	26
4.1.2 Impactos generados por la producción de lixiviados	31
4.1.3 Otros impactos	34
4.2 METODOLOGÍA ACV	35
4.2.1 Definición del objetivo y del alcance	37
4.2.2 Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV)	38
4.2.3 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV)	38
4.2.4 Interpretación	40

4.2.5	Categorías de impacto	41
4.2.6	Interpretación subyacente	43
4.2.7	Metodologías de evaluación de impacto	45
5	CARACTERIZACIÓN DEL CONTEXTO. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE CALI	47
5.1	INFORMACIÓN GENERAL DE LA CIUDAD DE CALI	47
5.2	GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS	48
5.3	RECOLECCIÓN	49
5.4	RECUPERACION Y APROVECHAMIENTO	50
5.5	DISPOSICIÓN FINAL	51
5.6	CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS: LIXIVIADOS Y GASES	53
5.6.1	Lixiviados	53
5.6.2	Emisión de gases	54
6	METODOLOGÍA	55
6.1	ÁREA DE ESTUDIO	55
6.2	OBJETIVO ESPECÍFICO 1	55
6.3	OBJETIVO ESPECÍFICO 2	58
7	EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL ACV PARA EL CONTEXTO PLANTEADO	59
7.1	PLANTEAMIENTO DEL OBJETIVO Y ALCANCE	59
7.1.1	Objetivo	59
7.1.2	Alcance	59
7.2	ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (AICV)	60

7.3	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)	60
7.3.1	Selección de las categorías de impacto	61
7.3.2	Selección de interpretación subyacente	64
7.3.3	Selección del modelo de caracterización	64
7.3.4	Normalización	70
7.4	INTERPRETACIÓN	71
7.5	EVALUACIÓN DE LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS	72
7.6	IDENTIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA	74
7.6.1	De acuerdo con LCA-IWM (Municipal Solid Waste Management System Assessment Tool)	75
7.6.2	De acuerdo con TEAM 4.0	87
7.7	PLANTEAMIENTO DE NECESIDADES DE MEJORAMIENTO PARA LA APLICABILIDAD DEL ACV	91
7.7.1	Fase 1: Objetivo y alcance	91
7.7.2	Fase 2: AICV	91
7.7.3	Fase 3: EICV	92
7.7.4	Fase 4: Interpretación	92
8	CONCLUSIONES	93
9	RECOMENDACIONES	96
	BIBLIOGRAFIA	97
	ANEXOS	105

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Constituyentes típicos encontrados en el gas de relleno sanitario de RSU	28
Cuadro 2. Concentraciones típicas de compuestos en cantidades trazas encontrados en el gas de vertedero en 66 rellenos sanitarios de RSU en California	28
Cuadro 3. Promedio de la composición del gas del relleno sanitario durante la metanogénesis	29
Cuadro 4. COV`s medidos en el RS Doña Juana	30
Cuadro 5. Potencial de almacenamiento de carbono del relleno sanitario.	35
Cuadro 6. Composición Física de los residuos sólidos residenciales (%) por estrato socioeconómico y global.	48
Cuadro 7. Zonas de atención	50
Cuadro 8. Promedio diario de toneladas mensuales dispuestas en el Relleno Sanitario Colomba- El Guabal	52
Cuadro 9. Características del lixiviado crudo almacenado en las grandes lagunas del sitio de disposición final Navarro.	53
Cuadro 10. Emisiones al aire de gases en un perímetro de 3km alrededor de Navarro.	54
Cuadro 11. Comparación de los diferentes modelos, respecto a sus enfoques de modelado y las categorías de impacto modelados	65
Cuadro 12. Comparación de las metodologías de punto medio de acuerdo con el contexto de desarrollo, horizonte de tiempo y categorías de impacto modeladas.	66
Cuadro 13. Categorías de impacto de la metodología CML 2001, implementadas en la base de datos Ecoinvent.	69
Cuadro 14. Herramientas informáticas y metodologías de evaluación.	72
Cuadro 15. Tipos de residuos sólidos municipales considerados	77

Cuadro 16. Requerimientos de información para la herramienta de predicción	78
Cuadro 17. Requerimientos de información para la valoración medioambiental	80
Cuadro 18. Características por defecto de las fracciones de desecho	83
Cuadro 19. Contenido de metales pesados de las fracciones	83
Cuadro 20. Valores por defecto de consumo de diésel para diferentes etapas de recolección y transporte.	84
Cuadro 21. Contenido de contaminantes en gas de relleno sanitario	84
Cuadro 22. Valores por defecto para la composición del lixiviado durante la operación del relleno/sector (fase A), después de clausurar el relleno/sector (B), 20 años después de clausurado el relleno/sector (C).	85
Cuadro 23. Demanda de energía para el relleno sanitario	86
Cuadro 24. Requerimientos de información encontrados para TEAM 4.0	88

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros relativos de la generación y gestión de gas y lixiviado, expresado en valores acumulativos de más de 100 años	33
Tabla 2. Evaluación cualitativa	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de un ACV	37
Figura 2. Elementos de la fase EICV	39
Figura 3. Representación gráfica de algunas diferencias básicas entre el punto medio y el enfoque de punto final	41
Figura 4. Vías de asignaciones para el modelado de punto medio y punto final para la metodología LIME2.	44
Figura 5. Ubicación de la ciudad de Cali en el departamento del Valle del Cauca, Colombia y su distribución por comunas.	47
Figura 6. Esquema explicativo del funcionamiento del servicio de aseo de la ciudad de Cali (residuos sólidos ordinarios).	52
Figura 7. Sistema de producto	60
Figura 8. Relación y composición LCA-IWM	76

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras tomadas en los lados de las manzanas seleccionados	105

RESUMEN

Dentro de las problemáticas de nuestros días se encuentra el aumento en la generación de los residuos sólidos, y la disposición de los mismos. Dentro de estos residuos sólidos se encuentran los biorresiduos los cuales son dispuestos casi en su totalidad en rellenos sanitarios, contribuyendo así a diferentes impactos ambientales.

En mira a buscar opciones de aprovechamiento de estos biorresiduos y de disminuir estos impactos implementando una adecuada gestión de los mismos, se evaluó la aplicabilidad de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales en la ciudad de Cali, con ayuda de una herramienta informática. Para llevar a cabo esta evaluación se realizó una revisión bibliográfica de las diferentes herramientas informáticas utilizadas para la implementación de la metodología ACV, posteriormente se realizó el planteamiento de los diferentes impactos ambientales generados por la gestión de los biorresiduos y se construyó el marco conceptual del ACV. Seguido se realizó una caracterización del contexto de la gestión de los residuos sólidos en la ciudad de Cali desde la generación hasta la disposición final.

Una vez planteados los impactos, el marco conceptual y la caracterización del contexto se desarrolló la aplicabilidad del ACV para el contexto planteado realizando en primer lugar el planteamiento del objetivo y alcance. Con base en los objetivos planteados se evaluó el análisis del inventario de ciclo de vida (AICV) y posteriormente la evaluación de la fase de evaluación del impacto de ciclo de vida donde se realizó la selección de las categorías de impacto, interpretación subyacente, modelo de caracterización y se evaluó la etapa optativa de la normalización; seguido se evaluó la fase de interpretación, todo en el marco de los objetivos y alcance del proyecto.

El siguiente paso fue la evaluación de las diferentes herramientas informáticas para la implementación de ACV, donde se seleccionó LCA-IWM y TEAM 4.0 para realizar la identificación de la información requerida. Con base en toda la evaluación aplicada de la metodología ACV se realizó el planteamiento de necesidades de mejoramiento para su aplicación en el contexto planteado.

Palabras clave: Biorresiduos. ACV. Herramientas informáticas. Impactos ambientales.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento desmesurado de la población y de las tasas de consumo ha traído consigo el incremento en la generación de residuos sólidos, los cuales Tchobanoglous¹ define como “todos aquellos residuos que se generan a partir de las dinámicas humanas y animales, que normalmente son sólidos y se desechan como inútiles o no requeridos”.

Según Duque y Collazos² desde el inicio de los tiempos se ha utilizado la tierra para la disposición de los residuos, en un principio esto no planteaba ningún problema significativo debido al pequeño tamaño de la población y la disponibilidad de terrenos, pero en nuestros días la población ha aumentado y los terrenos disponibles para la disposición de los residuos sólidos son cada vez menores; esto sumado a la inadecuada gestión de los residuos trae consigo múltiples implicaciones ambientales, afectando directamente la salud humana y la calidad de vida.

Dentro de los residuos sólidos municipales se encuentran los biorresiduos, definidos por la Comisión de las Comunidades Europeas³ como los residuos biodegradables de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos. No se incluyen los residuos agrícolas o forestales, el estiércol, los lodos de depuración ni otros residuos biodegradables como textiles naturales, papel o madera tratada.

De acuerdo con lo reportado por Hauschild y Barlaz⁴ las principales implicaciones ambientales atribuidas al inadecuado manejo de los biorresiduos son la emisión de gases efecto invernadero, emisión de gases precursores de la formación de oxidantes químicos y la generación de lixiviados. Por su parte, la quema incontrolada y la incineración de residuos sólidos en ausencia de equipos de control también puede afectar la salud pública de la población.

Dicho lo anterior, se resalta el potencial de aprovechamiento y valoración de los biorresiduos, actividad que se encuentra contemplada en la Política de Gestión

¹ TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994. p. 3.

² DUQUE, Ramón y COLLAZOS Héctor. Residuos Sólidos. Bogotá: Funpirs, 1993. p. 1-5.

³ COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la Unión Europea [en línea]. Bruselas: 2008. [Consultado 1 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁴ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method. En: Solid Waste Technology & Management. Wiley: 2011. p. 114-115.

Integrada de Residuos Sólidos para Colombia, esto se puede realizar entre otros mediante la implementación de procesos de compostaje para la producción de compost, y por medio de la digestión anaerobia para la recuperación de energía⁵.

En Colombia predomina el relleno sanitario como opción de gestión, en éstos se dispone el 92% de residuos sólidos, tal como lo expone la SSPD⁶. Cali no es la excepción; los servicios de recolección, barrido y la limpieza de vías y áreas pública son atendidos por 4 operadores, quienes entregan los residuos, en la estación de transferencia, a INTERASEO DEL VALLE S. A E.S.P, empresa que se encarga de disponer los residuos en el Relleno Sanitario Colomba – El Guabal, el esquema formal no considera la recuperación y aprovechamiento de residuos sólidos. Esto genera una problemática en relación con el cumplimiento de la Política de Gestión Integrada de Residuos Sólidos⁷ donde se establece la jerarquización de los elementos de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos donde la disposición final controlada se encuentra en el último lugar de esta jerarquización.

Con el propósito de apoyar procesos de toma de decisiones para avanzar en la implementación de la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos en Colombia, se considera importante contar con una herramienta metodológica para la evaluación de los impactos ambientales generados por las diferentes opciones de gestión y poder realizar una comparación entre las mismas, en esta investigación se plantea evaluar la aplicabilidad de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos municipales, tomando como caso de estudio la ciudad de Cali, con lo cual se pretende identificar puntos críticos para la aplicación de la metodología ACV, lo que permitirá a su vez avanzar en el planteamiento de necesidades de mejoramiento, cuya implementación será motivo de investigaciones posteriores.

⁵ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la Unión Europea, Op. cit., Disponible en : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁶ SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS (SSPD). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia – Diagnóstico 2011 [en línea]- . Bogotá D.C, 2011. [Consultado 15 de Noviembre de 2012]. Disponible en Internet: http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=eef29b3e-9d73-4adb-8fdd-1e526981c01c&groupId=10122 .

⁷ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Política para la gestión integral de residuos. Santafé de Bogotá, 1997. p. 10 y 20.

1 ANTECEDENTES

Según Romero⁸ una de las metodologías que más se ha desarrollado para la cuantificación de impactos ambientales generados por la gestión de residuos sólidos es la metodología ACV, esta metodología se originó casi simultáneamente en Europa y Estados Unidos; el primer ACV se realizó en 1969 para Coca-Cola por *Midwest Reserch Intitute* (MRI), donde uno de los objetivos de implementar esta metodología fue disminuir la cantidad de emisiones al ambiente.

En las últimas décadas esta metodología ha recibido grandes contribuciones de organizaciones internacionales como la *The Society of Environmental toxicology and Chemistry* (SETAC) e *International Organization of Standarization* (ISO), como lo afirma Cleary⁹. Esta última es quien estandariza el ACV por medio de las normas ISO 14040 y 14044. En un principio esta metodología solo se aplicó a productos, pero al día de hoy se aplica para productos y servicios. Dentro de los servicios en los cuales se aplica al ACV se encuentra el servicio de aseo, y su aplicación está dirigida a la gestión de los residuos sólidos.

Finnveden¹⁰ aplicó la metodología del ACV para identificar las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de tratamiento de los residuos sólidos, en este estudio se incluyeron rellenos sanitarios, incineración, reciclaje, digestión anaerobia y compostaje, con el objetivo de utilizar los resultados como soporte en la toma de decisiones políticas y decisiones estratégicas sobre sistemas de gestión de los residuos en Suecia.

Así mismo, Cherubini et al.¹¹ aplicó el ACV con el objetivo de disminuir la cantidad de residuos sólidos que se disponen en el relleno sanitario de Roma, analizando escenarios alternativos de gestión dirigidos a minimizar la fracción de material no utilizado que se dispone en el relleno sanitario. Los resultados obtenidos señalan la disposición final en rellenos sanitarios como una mala estrategia de gestión de residuos a escala global. También se concluyó que la

⁸ ROMERO, Blanca Iris. El análisis de ciclo de vida y la gestión ambiental [en línea]. México, Julio de 2003 [Consultado 05 de Febrero de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/tend.pdf>

⁹ CLEARY, Julian. Life cycle assessment of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. En: Environmental International. Agosto, 2009, p. 2.

¹⁰ FINNVEDEN, Göran et al. Life Cycle Assessments of energy from Solid Waste [PDF] Agosto de 2000. Universidad de Estocolmo.

¹¹ CHERUBINI, Francesco; BARGIGLI, Silvia y ULGIATI, Sergio. Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. En: Waste Management. Enero, 2008, no. 28, p. 2552–2564.

recuperación de energía y materiales permiten importantes beneficios en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

Con el avance y evolución en la aplicación del ACV para la evaluación de los impactos ambientales de la gestión de los residuos sólidos se han desarrollado modelos computacionales con los cuales es posible evaluar las opciones de gestión de los residuos sólidos basados en las diferentes tecnologías existentes para el manejo, tratamiento y disposición final de éstos, permitiendo su comparación desde el punto de vista del desempeño ambiental.

El objetivo de las herramientas informáticas es facilitar la aplicación de la metodología ACV. Dentro de las fases del ACV se encuentra el planteamiento del objetivo y alcance, Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (AICV), Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV) e interpretación, el alcance de las herramientas varía en relación a estas fases, con algunas es posible evaluar tanto la fase de inventario, como de evaluación de impacto de ciclo de vida, otras sólo se enfocan en la fase de inventario.

A continuación se describen brevemente algunas herramientas informáticas que implementan la metodología ACV:

- **WASTED (*Waste Analysis Software Tool for Environmental Decisions*):**

Díaz & Warith¹² describen el desarrollo del modelo WASTED (*Waste Analysis Software Tool for Environmental Decisions*), con el cual se pueden analizar los impactos ambientales generados por la gestión de los residuos sólidos, basados en el ACV. Este modelo está compuesto por submodelos que describen un proceso convencional de gestión de los residuos: recolección, recuperación de materiales, compostaje, recuperación de energía y disposición final.

- **EASETECH:**

La versión anterior a este modelo se llama EASEWASTE, tal como lo describe Björklund¹³ fue desarrollado por investigadores *The Technical University of Denmark* – DTU con el objetivo de crear un modelo amigable para el usuario, bien documentado y flexible para la evaluación del consumo general de recursos e impactos ambientales generados por el sistema de gestión de los

¹² DIAZ, R. y WARITH, M. Life-cycle assessment of municipal solid wastes: Development of the WASTED model. En: Waste Management. Septiembre, 2005, no. 26, p. 886-901.

¹³ BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Application of LCA in Waste Management. En: Solid Waste Technology & Management. vol. 1. Wiley: 2011. p. 155.

residuos sólidos municipales. Este modelo está diseñado para comparar las diferentes estrategias de gestión, métodos y tecnologías de tratamiento de estos residuos, también permite identificar las principales fuentes que causan problemas ambientales en el sistema.

DTU¹⁴ desarrolló una nueva versión cuyo nombre es EASETECH, su objetivo principal es llevar a cabo el ACV de sistemas complejos con manejo de flujo de materiales heterogéneos. Los dos cambios fundamentales, en relación con el EASEWASTE es el modelado de flujo de materiales, y su diseño que facilita la configuración de escenarios mediante el uso de una caja de herramientas, procesos dentro de los cuales pueden manejar el flujo de los materiales y cálculo de las emisiones .

En Estados Unidos Gable & Park¹⁵, analizaron las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) para la gestión de los residuos orgánicos propuesta para la ciudad de Madison, Wisconsin con la ayuda del modelo EASEWASTE.

- **IWM-2 (Integrated Waste Management-2):**

Este modelo es la actualización de IWM-1 el cual fue desarrollado por Procter and Gamble en 1995, el objetivo general de este modelo es predecir lo más exacto posible los costos e impactos ambientales de un sistema de gestión de residuos, es importante destacar que el alcance de este modelo llega solo al cálculo del inventario de ciclo de vida (AICV), es decir, no realiza la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV). Ha sido aplicado en diferentes casos de estudio en Europa, Norte América, Sur América y Australia¹⁶.

En McDougall et. al¹⁷ se reportan diferentes casos de estudio en diferentes ciudades como: Caracas (Venezuela), Pamplona (España), Gloucestershire (Reino Unido), Barcelona (España) entre otros.

- **IWM Canadá:**

Fue desarrollado en Canadá con la asociación de *Environmental Canada* y dos industrias, *The Environment and Plastic Industry (EPIC) y Corporations*

¹⁴ TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK (DTU). Easetech [en línea]. Dinamarca [Consultado 26 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.easetech.dk/>

¹⁵ Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction. Op. cit., En: Resources, Conservation and Recycling, 2011.

¹⁶ BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Op cit., p. 145.

¹⁷ MCDOUGALL, Forbes et al. Integrated solid waste management: a Lyfe Cycle Inventory. 2 ed. Blackwell Science, 2001.

Supporting Recycling (CSR). Björklund¹⁸ afirma que el objetivo de este modelo es proveer a los municipios canadienses una herramienta que les permita evaluar el desempeño ambiental y económico de los diversos elementos de los sistemas de gestión de residuos sólidos existentes y los que se encuentren en proyecto, en pro de la gestión integral de los residuos sólidos. Al igual que el IWM su alcance es hasta el cálculo del inventario de vida y no al cálculo de la evaluación de impacto. Este modelo ha sido usado por alrededor de 250 usuarios registrados alrededor de Canadá, también juega un papel importante en Londres para el desarrollo de los sistema de mejora continua en los sistemas de gestión de residuos.

- **WISARD (Waste Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal):**

Este modelo fue desarrollado por Ecobilan en nombre de *Eco-Emballages* en Francia y la agencia ambiental de Inglaterra y Gales. Está disponible para los usuarios como un servicio de consultoría de Ecobilan. El objetivo de este modelo es facilitar la cuantificación de los impactos ambientales en la recolección y tratamiento de los residuos urbanos, para ayudar en la toma de decisiones, evaluando los diferentes escenarios de gestión de residuos. Ha sido utilizado por más de 50 autoridades locales, y otras en el Reino Unido en el desarrollo regional de estrategias para la gestión de los residuos sólidos municipales; también ha sido utilizado en Escocia para el desarrollo del plan nacional de residuos, según lo descrito por Björklund¹⁹.

- **LCA-IWM (Municipal Solid Waste Management System Assessment Tool):**

“LCA-IWM es el resultado del proyecto de investigación El uso de Herramientas de Análisis de Ciclo de Vida para el Desarrollo de Estrategias de Gestión Integrada de Residuos para Ciudades y Regiones con un Crecimiento Rápido de la Economía”²⁰. Tal como lo afirma Björklund²¹ fue financiado por *The European Fifth Framework Program* y consta de dos herramientas de apoyo de decisiones: una herramienta para el pronóstico de la generación y composición de residuos y otra herramienta para la evaluación del sistema de gestión de residuos municipales. Se encuentra disponible en internet al igual que el manual de uso. Ha sido utilizado en diferentes ciudades de rápido crecimiento en Europa como: Xanthi, Kaunas, Wroclaw, Nitra y Reus

¹⁸ BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Op cit., p. 145.

¹⁹ BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Op cit., p. 148.

²⁰ DEN BOER, Emilia; DEN BOER, Jan; JAGER, Johannes. Planificación y optimización de la gestión de residuos [en línea]: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 17 de Abril de 2013]. Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

²¹ BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Op cit., p. 148.

Méndez²² implementó este modelo para la aplicación de técnicas de ciclo de vida al diseño de un sistema de gestión de residuos urbanos para la ciudad de Chihuahua, México.

- **IMPACT 2002+:**

Este modelo fue desarrollado por *University of Michigan Risk Science Center*, está basado en la metodología IMPACT 2002+, según lo reportado por un informe de la Comunidad Europea²³. Existe una versión de este modelo que fue adaptada por *Quantis Sustainability counts*²⁴, la cual se encuentra disponible en internet al igual que su manual de usuario.

Este modelo fue implementado por Hong, Li & Zhaojie²⁵ para la evaluación del ciclo de vida de 4 escenarios de la gestión de los residuos sólidos urbanos en China.

- **SIMAPRO 8:**

Fue desarrollado por PRé Consultants²⁶ y permite modelar los productos y sistemas desde una perspectiva de ACV, incluye el análisis de Monte Carlo; viene totalmente integrado con la base de datos Ecoinvent. Esta herramienta no es específica para gestión de residuos pero tiene la opción de adaptarse y ser aplicada, de igual manera tiene diversas aplicaciones como²⁷:

- Cálculo de la huella de carbono
- El diseño del producto y el diseño ecológico
- Declaraciones ambientales del producto (EPD)
- El impacto ambiental de los productos o servicios
- Memorias ambientales (GRI)
- La determinación de los indicadores claves de rendimiento.

²² MÉNDEZ, María Guadalupe Gómez. Op. cit.

²³ Análisis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commision, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

²⁴ HUMBERT, Sébastien; SCHRYVER, An De; BENGGOA, Xavier; MARGNI, Manuele; JOLLIET, Olivier. IMPACT 2002+: User Guide [en línea]. Quantis Sustainability counts [Consultado 15 Junio de 2013]. Disponible en Internet: http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf

²⁵ HONG, Jinglan; LI, Xiangzhi y ZHAOJIE, Cui. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. *En: Waste Management*, 2010.

²⁶ Simapro7. Norte América: PRé Consultants [consultado 15 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software>

²⁷ *Ibid.*, Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software>

Una de las ventajas de esta herramienta es que cuenta con diversas metodologías de cálculo, en España fue implementado por Bovea et al.²⁸ en la versión 7 para la evaluación de estrategias alternativas para la gestión de residuos sólidos urbanos. Zaman²⁹ también implemento esta versión para un estudio comparativo de las tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos urbanos.

Actualmente se lanzó una nueva versión llamada SimaPro 8, Ponsioen³⁰ describe las novedades de esta versión:

- Base de datos actualizada (Ecoinvent 3).
- Introducción de métodos de huella hídrica regionalizadas.
- Métodos de modelización.
- Introducción de los procesos de mercado.
- Cambios en el procedimiento de asignación (nuevo enfoque para el reciclado de productos).
- Nuevos datos.
- Mejora en los formatos de los datos.
- Motor de cálculo más rápido

- **IPCC INVENTORY SOFTWARE:**

Este modelo fue desarrollado por el Programa de Inventarios Nacionales de Gases efecto invernadero del IPCC³¹ y su unidad técnica de apoyo IGES (*Institute for Global Environmental Strategies*) para realizar los inventarios nacionales de gases efecto invernadero de acuerdo con las directrices dadas por el IPCC en el 2006, tal como se describe en su manual.

28 BOVEA, M.D et al. Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. En: Waste Management, 2010

29 ZAMAN, A. U. Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method [en línea]. Suecia, 2010. [consultado 09 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf>

30 PONSIOEN, Tommie. PRÉ CONSULTANTS. What's new in SimaPro 8? [En línea]. Estados Unidos, 2013 [Consultado 04 de Diciembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/news-whats-new-in-simapro-8>

31 IPCC Inventory Software [en línea]. Bratislava: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. [consultado 13 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/files/IPCCInventorySoftwareUserManualV2_1.pdf

- **MSW-DST (Solid Waste Management):**

Desde 1994 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), *North Carolina State University*, *Research Triangle Institute* and *University of Wisconsin* han colaborado en el desarrollo de *Municipal Solid Waste Decision Support Tool* (MSW-DST). Fue diseñado para explorar los aspectos ambientales y los costos de las estrategias integradas de residuos sólidos urbanos, y para identificar alternativas que sean económica y ambientalmente eficientes. Este modelo calcula el Inventario de Ciclo de Vida – AICV y no realiza la evaluación de impacto, el AICV que se obtiene como resultado de esta herramienta se puede ingresar en el modelo TRACI, para la modelación de la Evaluación del Impacto del ciclo de Vida EICV, este modelo también pertenece a la EPA, tan como lo expone Björklund³².

Thorneloe et al.³³ implementaron el MSW-DST con el objetivo de demostrar que MSW-DST se puede utilizar para identificar y equilibrar múltiples criterios (costos e impactos ambientales) en la evaluación de opciones de materiales y gestión de residuos.

- **TEAM 5.1**

Al igual que WISARD este modelo fue desarrollado por ECOBILAN³⁴, esta herramienta de ACV permite construir y utilizar bases de datos. Cualquier sistema que presente las operaciones asociadas con los productos y procesos puede ser modelado, calculado y analizado.

Juárez et. al³⁵ utilizó TEAM 4.0 para el ACV del sistema de gestión de residuos municipales de la ciudad de México.

³² BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Op. cit., p. 147.

³³ THORNELOE, Susan A.; WEITZ, Keith; JAMBECK, Jenna. Application of the US decision support tool for materials and waste management. *En: Waste Management*. Abril, 2007, vol. 27.

³⁴ TEAM 5.1 [en línea]. Francia: Price wáter house Coopers [consultado 18 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://ecobilan.pwc.fr/en/boite-a-outils/team.jhtml>

³⁵ JUÁREZ, C.; GÜERECÁ, L.; GASSÓ, S. Análisis del ciclo de vida del sistema de gestión de residuos municipales de la ciudad de México [en línea] México, 2008.[Consultado 28 de Enero de 2013]. Disponible en Internet: <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/14195/1/Gasso.pdf>

2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el crecimiento de la población mundial se ha incrementado la generación y diversificación de los residuos sólidos, convirtiendo en un desafío para la sociedad actual la gestión adecuada de estos residuos y con esto la prevención, minimización y mitigación de los impactos ambientales.

Según los datos reportados por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios³⁶, en Colombia los 1.098 municipios del territorio nacional, disponen diariamente un promedio de 26.537 toneladas, un 8% más con relación a lo correspondiente en el año 2010 (24.608t/d). Para el año 2008 la SSPD³⁷ reporta los resultados de la caracterización de 205 municipios donde se evidenció la predominancia de los residuos orgánicos con una presencia de 80%, la fracción restante de residuos se distribuyó de la siguiente manera: el 7% plástico; el 3 % papel; el 2% cartón y vidrio, el 1% metales y 5% otros.

El interés en la adecuada gestión de los biorresiduos se relaciona directamente con la generación de impactos ambientales, dentro de los cuales se encuentran³⁸:

- El cambio climático causado por la emisión de gases efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O)
- Contaminación de la tropósfera por la emisión de gases precursores de la formación de oxidantes químicos
- Contaminación de las aguas subterráneas y el suelo por la generación de lixiviados.

También se destaca el aumento en la incidencia de enfermedades tales como dengue, leptospirosis, trastornos gastrointestinales, dificultades respiratorias e

³⁶ Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia – Diagnóstico 2011. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=eef29b3e-9d73-4adb-8fdd-1e526981c01c&groupId=10122

³⁷ Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. [Consultado 25 de Octubre de 2012]. Disponible en Internet: http://www.superservicios.gov.co/home/web/guest/inicio;jsessionid=17027D1992595EA7665E6067BEA4E897?p_p_id=77&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_pos=2&p_p_col_count=3&_77_struts_action=%2Fjournal_content_search%2Fsearch

³⁸ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op. cit., p 121.

infecciones dérmicas, atribuido a prácticas inadecuadas en la gestión de los residuos, tal como lo afirma Espinoza et al.³⁹.

En contraste con lo anterior, se resalta el potencial de aprovechamiento de los biorresiduos; entre otros la Comisión de las Comunidades Europeas⁴⁰ afirma que se puede lograr mediante la implementación de procesos de compostaje para la producción de compost, y por medio de la digestión anaerobia para la recuperación de energía.

El aprovechamiento y valorización de residuos sólidos es una actividad contemplada en la Política de Gestión Integrada de Residuos Sólidos para Colombia, en la cual se establece la jerarquización de los elementos de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos de la siguiente manera: “Reducción en el origen, aprovechamiento y valorización, tratamiento y transformación y por último la disposición final controlada cuyo principio fundamental es “impedir o minimizar” de la manera más eficiente, los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente que ocasionan los residuos sólidos y peligrosos, y en especial minimizar la cantidad o la peligrosidad de los que llegan a los sitios de disposición final”⁴¹.

No obstante lo anterior, en Colombia para el año 2011 el 93,8% de los residuos sólidos fueron dispuestos en rellenos sanitarios; sólo el 0,7 % de estos residuos fueron destinados a plantas integrales, las cuales atienden el 6,1% de los municipios como lo afirma la SSPD⁴².

Actualmente en el país es de gran importancia identificar una herramienta metodológica para la evaluación de los impactos ambientales generados por las diferentes opciones de gestión de los biorresiduos y realizar un comparación entre las mismas, con el fin de avanzar en la implementación de la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos apoyando la toma de decisiones basados en esta herramienta.

³⁹ ESPINOZA, Pilar T. et al., Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010 [en línea]. Banco Interamericano de Desarrollo, 2010 [Consultado 05 de Enero de 2013]. Disponible en Internet: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36466973>

⁴⁰ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la Unión Europea. Op. cit., Disponible en : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁴¹ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Política para la gestión integral de residuos. Santafé de Bogotá, 1997. p. 10 y 20.

⁴² Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia – Diagnóstico 2011. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=eef29b3e-9d73-4adb-8fdd-1e526981c01c&groupId=10122

Entre las metodologías existentes para la evaluación de los impactos ambientales de productos y servicios tal como lo afirma Hauschild & Barlaz⁴³ se encuentran Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Análisis Costo Beneficio (ACB), Evaluación del Riesgo Ambiental (ERA), Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Análisis de Flujo de Materiales (AFM), Evaluación Ambiental Estratégica (EAE). Dentro de estas metodologías la más utilizada es el ACV la cual se encuentra estandarizada a través de la norma ISO 14040 y 14044.

En la literatura se reportan diferentes aplicaciones de esta metodología, mediante el uso de herramientas informáticas, para diferentes países alrededor del mundo tales como: China⁴⁴ donde se utilizó el modelo IMPACT 2002+, España⁴⁵ haciendo uso del modelo Simapro7, Venezuela⁴⁶ aplicando el modelo LCA-IWM, Estados Unidos⁴⁷ donde se aplicó EASEWASTE.

Teniendo en cuenta que en el territorio nacional la fracción orgánica es de 80%, se hace necesario incrementar esfuerzos para cuantificar los impactos ambientales generados por la gestión de estos biorresiduos, dicho esto, se busca evaluar la aplicabilidad de la metodología ACV con el apoyo de una herramienta informática en la gestión actual de los biorresiduos en la ciudad de Cali, y así dar un primer paso en la aplicación de esta metodología para que con investigaciones futuras se logre su desarrollo y aplicación en otras ciudades del territorio nacional, y así apoyar el proceso de toma de decisiones en la gestión integral de los residuos sólidos.

2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿ Es aplicable la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales en la ciudad de Cali, con el apoyo de una herramienta informática ?

⁴³ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op. cit., p 122.

⁴⁴ HONG, Jinglan; LI, Xiangzhi y ZHAOJIE, Cui. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. En: Waste Management, 2010.

⁴⁵ BOVEA, M.D et al. Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. En: Waste Management, 2010

⁴⁶ MÉNDEZ, María Guadalupe Gómez. Aplicación de técnicas de ciclo de vida al diseño de un sistema de gestión de residuos urbanos para la ciudad de Chihuahua. Tesis doctoral. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili. Facultad de ingeniería química, 2009.

⁴⁷ YOSHIDA, Hiroko; GABLE, Joshua J. y PARK, Jae K. Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction. En: Resources, Conservation and Recycling, 2011.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicabilidad de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales en la ciudad de Cali.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los requerimientos técnicos y de información para la aplicación de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali.
- Plantear las necesidades de mejoramiento de la aplicación de la metodología ACV para la evaluación de los impactos ambientales de la gestión actual de los biorresiduos en la ciudad de Cali.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA GESTIÓN DE LOS BIORRESIDUOS

Los impactos ambientales causados por la disposición de biorresiduos en rellenos sanitarios se presentan principalmente debido a la producción de gases y lixiviados

4.1.1 Impactos ambientales generados por la producción de gases. Los impactos ambientales ocasionados por la producción de gases en la gestión de los biorresiduos son los siguientes:

- Cambio climático
- Formación de oxidantes fotoquímicos (ozono troposférico)
- Acidificación (SO₂, NO_x, NH₄)

“Los biorresiduos sufren procesos de degradación en los cuales se producen gases”⁴⁸, “el conjunto de estos se denomina biogás”⁴⁹, en el **Cuadro 1** y **Cuadro 3** se evidencia que el biogás está compuesto principalmente por metano (CH₄), y dióxido de carbono (CO₂), éstos gases son efecto invernadero, causantes del cambio climático. Es importante destacar que el CH₄ es el componente que predomina en el biogás, siendo 23 veces más potente que el CO₂ en términos de impacto sobre el cambio climático, según la Comisión de las Comunidades Europeas⁵⁰. En el biogás también se encuentran compuestos en cantidades traza, algunas concentraciones típicas emitidas por un relleno sanitario de residuos sólidos urbanos (RSU) se muestran en el **Cuadro 2**.

El biogás no solo contribuye al efecto invernadero sino que también a la reducción de la capa de ozono en presencia de hidrocarburo clorados y fluorados, que para el caso no aplica pues estos compuestos no están presentes en los biorresiduos; el biogás también genera malos olores, y contribuye a la presencia de compuestos orgánicos volátiles en el aire (COV)⁵¹.

⁴⁸ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la Unión Europea. Op. cit., Disponible en : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁴⁹ Rellenos sanitarios, Guía ambiental [en línea]. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, 2002 [consultado 15 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/Rellenos_Sanitarios.pdf

⁵⁰ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la unión. Op. cit., Disponible en Internet: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁵¹ Rellenos sanitarios, Guía ambiental. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/Rellenos_Sanitarios.pdf

Por su parte los COV's son precursores del ozono troposférico, componente básico del smog fotoquímico, en la **Cuadro 4** se exponen los COV's medidos en el relleno sanitario Doña Juana. El smog fotoquímico tiene efectos nocivos en la salud humana, en particular en el sistema cardiovascular y respiratorio, incluso presente en muy pequeñas cantidades en el aire, también tiene efectos nocivos para la salud animal. La exposición al ozono se ha vinculado con la morbilidad prematura y síntomas de asma. También tiene efectos en el medio ambiente pues daña la vegetación, la productividad de los cultivos, las flores, los matorrales y los bosques⁵². El ozono y sus contaminantes precursores también están vinculados al material particulado (MP)⁵³.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x); amoníaco (NH₄) y óxidos de azufre (SO_x), conducen a la liberación de los iones de hidrógeno en medio acuoso. Dentro de estos iones se encuentran los protones que solo de ser liberados en zonas con baja capacidad de amortiguación, contribuyen a la acidificación lo que causa pérdida de bosques y muerte de los lagos, y contribuye a la pérdida de biodiversidad. En los sistemas de tratamiento de residuos sólidos la principal fuente de NO_x y SO_x son las actividades operativas con equipos de transporte, y cualquier otro proceso en el que se lleve a cabo la quema de diésel⁵⁴. Como se expresa en el **Cuadro1**, el amoníaco hace parte de las emisiones típicas encontradas en vertederos.

En la gestión de residuos sólidos no existe gran liberación de fósforo, las principales fuentes de liberación de nitrógeno son los procesos de incineración y actividades operativas con equipos de transporte, pues generan NO_x⁵⁵.

⁵² Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. Ozono troposférico [en línea] Montreal: Comisión para la cooperación ambiental. [consultado 23 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>

⁵³ Ibid., Disponible en Internet: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>

⁵⁴ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op cit., p. 121.

⁵⁵ Ibid., p. 122.

Cuadro 1. Constituyentes típicos encontrados en el gas de relleno sanitario de RSU

Componente	Porcentaje (base volumen seco) ^a
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0,1-1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0-1,0
Amoniaco	0,1-1,0
Hidrógeno	0-0,2
Monóxido de carbono	0-0,2
Constituyentes en cantidades trazas	0,01-0,6

^ala distribución porcentual exacta variará según la antigüedad del relleno. Nota: reportado como vertedero

Fuente: TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994. p. 431.

Cuadro 2. Concentraciones típicas de compuestos en cantidades trazas encontrados en el gas de vertedero en 66 rellenos sanitarios de RSU en California

Compuesto	Concentración, ppbV ^a		
	Mediana	Media	Máxima
Acetona	0	6.838	240.000
Benceno	932	2.057	39.000
Clorobenceno	0	82	1.640
Cloroformo	0	245	12.000
1,1- Dicloroetano	0	2.801	36.000
Diclorometano	1.150	25.694	620.000
1,1-Dicloroetano	0	130	4.000
Clorodietileno	0	2.835	20.000
Tras-1,2-Dicloroetano	0	36	850
2,3-Dicloropropano	0	0	0
1,2-Dicloropropano	0	0	0
Bromuro de etileno	0	0	0
Dicloroetileno	0	59	2.100
Óxido de etileno	0	0	0
Etilbenceno	0	7.334	87.500
Metil-etil-cetona	0	3.092	130.000

Cuadro 2. (Continuación)

Compuesto	Concentración, ppbV ^a		
	Mediana	Media	Máxima
1,1,2-Tricloroetano	0	0	0
1,1,1-Tricloroetano	0	615	14.500
Tricloroetileno	0	2.079	32.000
Tolueno	8.125	34.907	280.000
1,1,2,2-Tetracloroetano	0	246	16.000
Tetracloroetileno	260	5.244	180.000
Cloruro de vinilo	1.150	3.508	32.000
Estirenos	0	1.517	87.000
Acetato de vinilo	0	5.663	240.000
Xileno	0	2.651	38.000

^a ppbV: partes por billón (mil millones) por volumen. Nota: reportado como vertedero

Fuente: TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994. p. 432.

Cuadro 3. Promedio de la composición del gas del relleno sanitario durante la metanogénesis

Componente	Concentración (mg/m ³)
Metano	50-60%
Dióxido de carbono	40-50%
Arsénico	0.03
Benceno	7
Cadmio	0.08
Monóxido de carbono	0.01
Tetracloruro de carbono	0.03
CFC 11	10
CFC 12	50
CFC 114	4
Clorobenceno	2
Cloroformo	5
Dicloroetileno	5
Diclorometano	50
Etilbenceno	50
HCFC 21	12
HCFC 22	13
Cloruro de hidrógeno	6
Fluoruro de hidrógeno	2
Sulfuro de hidrógeno	10
Mercurio	0.004
Níquel	0.8
Propilbenceno	50

Cuadro 3. (Continuación)

Componente	Concentración (mg/m ³)
Tetracloroetileno	27
Tolueno	150
Tricloroetileno	15
Cloruro de vinilo	20
Xilenos	60
COVs totales	200

Fuente: CHRISTENSEN, Thomas & MANFREDI, Simone. Landfilling: Reactor Landfills. En: Solid Waste Technology & Management. vol. 2. Wiley: 2011. p. 779

Cuadro 4. COV's medidos en el RS Doña Juana

Compuesto	Tiempo de retención(min)	COV ^a obtenidos (ppm)
Diclorometano	7.53	0.55
1,2-dicloroetileno	9.50	0.23
1,1-dicloroeteno	9.62	6
tricloroetileno	12.23	2
tetracloroetileno	16.19	1.7
Benceno	11.08	0.04
Tolueno	14.90	22.4
Etilbenceno	18.50	5.5
m-Xileno	18.79	16
Estireno	19.87	0.25
Bromobenceno	21.95	0.17
1,3,5-Trimetilbenceno	22.43	0.8
1,2,4-TRimetilbenceno	23.49	1
p-isopropiltolueno	24.39	11.45
Butilbenceno	25.57	0.02
1,2,4-Triclorobenceno	30.37	0.17
1,3,5-Triclorobenceno	31.92	2.78
Limoneno	24.36	10.73

Fuente: HINCAPIÉ, Ingrid; ESTÉVEZ, Sandra y GIRALDO, Eugenio. Análisis y comportamiento de compuestos orgánicos volátiles OV en las emisiones del biogás proveniente del relleno sanitario de Doña Juana. [En línea]. Bogotá, s.f. [consultado 19 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/517/mi_937.pdf?sequence=1

De acuerdo con Christensen⁵⁶ la cantidad y composición del gas generado depende a su vez de la cantidad y composición de los residuos orgánicos. La tasa de generación de gas depende de la composición de los residuos orgánicos y el ambiente bioquímico en el relleno sanitario.

4.1.2 Impactos generados por la producción de lixiviados. Los impactos ambientales ocasionados por la producción de lixiviados en la gestión de los biorresiduos son los siguientes:

- Acidificación (SO₂, NO_x, NH₄)
- Eutrofización (N,P Y DBO)

Los lixiviados usualmente presentan alto contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, cantidad abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos⁵⁷.

Hauschild & Barlaz⁵⁸, afirman que al ser el nitrógeno y el fósforo macronutrientes para plantas y algas, la liberación de estos componentes tiene la capacidad de fertilizar los ecosistemas naturales y aumentar su producción primaria. Un exceso en la liberación de estos elementos modifica la composición de las especies y generar proliferación de algas en lagos y aguas costeras lo que genera agotamiento de oxígeno, lo que se conoce como eutrofización.

En un relleno sanitario en funcionamiento siempre se encontrará lixiviado joven (fase en operación)⁵⁹, estos lixiviados jóvenes se producen porque la materia orgánica es rápidamente biodegradada, generando ácidos grasos volátiles y amoníaco, estos ácidos grasos se diluyen fácilmente en el lixiviado, reduciendo el pH y facilitando la solubilización de metales presentes, generando un lixiviado altamente contaminante⁶⁰. Los lixiviados maduros tienen una edad menor a 5 años, y los lixiviados viejos mayor a 5 años⁶¹.

⁵⁶ CHRISTENSEN, Thomas; SCHARFF, Heijo y HJELMAR, Ole. Landfilling: Concepts and Challenges. En: Solid Waste Technology & Management vol. 2. Wiley: 2011. p 687.

⁵⁷ Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. Op cit., En: Revista de ingeniería. 2001.

⁵⁸ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op. cit., p. 122.

⁵⁹ Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. Op cit. En: Revista de ingeniería. 2001.

⁶⁰ ZAPATA, Andres. Un Método de Gestión Ambiental de Lixiviados Mediante una Biobarrera Secuencial. Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio ambiente, 2012. p. 14

⁶¹ Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. Op cit., En: Revista de ingeniería. 2001.

De acuerdo con Tchobanoglous⁶² la biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Estos cambios se pueden supervisar bajo la relación DBO₅/DQO. El rango comprendido entre 0.4 y 0.6 se toma como indicador de que la materia orgánica presente en los lixiviados es fácilmente biodegradable, por ello inicialmente los lixiviados manejan un rango de 0.5 o más. A medida que pasa el tiempo esta relación disminuye, usualmente entre 0.05 y 0.2, esto ocurre porque los lixiviados procedentes de rellenos sanitarios antiguos normalmente contienen ácidos fúlvicos y húmicos, que no son fácilmente biodegradables.

Es importante destacar que el tratamiento de los lixiviados es complejo por los siguientes motivos⁶³:

- El bajo pH no permite la aplicación de tecnologías como la volatilización de amonio (que requiere pH básico), la nitrificación o la oxidación química del hierro.
- La alta concentración de sales disueltas y la toxicidad de metales pesados.
- La alta DBO presente en el medio acompleja los metales manteniéndolos en solución, lo que dificulta y limita su remoción.
- El arrastre y solubilización de compuestos orgánicos volátiles (COV), que una vez disueltos se liberan fácilmente a la atmosfera por su alta volatilidad.

La cantidad de lixiviados depende principalmente de las precipitaciones y de la evapotranspiración. El principal impacto generado por estos lixiviados es la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Los efectos en aguas superficiales son:

- Agotamiento de oxígeno
- Acumulación de sustancias oxidantes del hierro en las branquias de los peces causándoles asfixia
- Alteración en fauna y flora del fondo de la fuente
- Toxicidad para los peces debido a la peligrosidad del amoniaco

El efecto en las aguas subterráneas se consideran probablemente el más severo asociado a los lixiviados, esto suele estar relacionado con rellenos en

⁶² Tchobanoglous, Op. cit., p. 471.

⁶³ Un Método de Gestión Ambiental de Lixiviados Mediante una Biobarrera Secuencial. Op. cit., p. 14

los que no se han implementado medidas de control de la migración de lixiviado al nivel freático, y siempre en acuíferos arenosos⁶⁴.

Manfredi & Christensen⁶⁵ modelaron la lixiviación y generación de gas (CH₄ y CO₂) de un relleno sanitario típico de residuos mixtos para un periodo de 100 años, como se expone en la **Tabla 1**, la generación de lixiviados y gases se sigue presentando, importar el tipo de relleno sanitario aunque varíe de uno a otro.

Tabla 1. Parámetros relativos de la generación y gestión de gas y lixiviado, expresado en valores acumulativos de más de 100 años

Parameters relative to gas and leachate generation and management, expressed as cumulative values over 100 years

		Unit	Open dump	Conventional with flares	Conventional with energy recovery	Standard bioreactor	Flushing bioreactor	Semi-aerobic
<i>Gas</i>								
Total gas	Generated	m ³ /ton wet waste	169.4	169.4	169.4	167.9	167.9	222.0
	Collected		0.0	124.0	124.0	123.0	123.0	122.0
CH ₄	Generated	82.1	82.1	82.1	83.8	83.8	70.1	
	Collected	0.0	60.0	60.0	65.0	65.0	64.3	
	Not collected	82.1	22.1	22.1	18.8	18.8	5.8	
	To flares	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	To CHP	0.0	0.0	60.0	65.0	65.0	64.3	
	To atmosphere	82.1	4.7	4.7	4.5	4.5	6.2	
CO ₂	Generated	66.1	66.1	66.1	64.1	64.1	81.9	
	Collected	0.0	50.0	50.0	51.0	51.0	47.5	
	To atmosphere	66.1	143.6	143.6	135.6	135.6	146.5	
<i>Leachate</i>								
Generated		mm	42,500	19,800	19,800	19,800	55,400	18,500
Generated (L/S)		m ³ /ton wet waste	4.3	2.0	2.0	1.7	3.7	1.5
Collected			0.0	0.8	0.8	0.6	2.8	0.5
Not collected (to groundwater)			4.3	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0
To WWTP			0.0	0.8	0.8	0.6	2.8	0.5

Fuente: MANFREDI, Simone; CHRISTENSEN, Thomas. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. En: Waste Management. Abril, 2008, vol.. 29.

Así pues la presencia de NH₄ en los lixiviados contribuye a la acidificación y eutrofización. El fósforo y el nitrógeno presente contribuyen a la eutrofización; si el nitrógeno presente se encuentra en forma de NO_x, también contribuirá a la acidificación.

⁶⁴ Rellenos sanitarios [en línea]: Guía ambiental. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, 2002 [consultado 15 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/Rellenos_Sanitarios.pdf

⁶⁵ MANFREDI, Simone; CHRISTENSEN, Thomas. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. En: Waste Management. Abril, 2008, vol. 29. p. 32-43

4.1.3 Otros impactos. Impactos en el uso del suelo: competencia por el suelo.

Otros impactos asociados a la disposición de biorresiduos es “el uso del suelo ya que en rellenos sanitarios la superficie de tierra utilizada es mayor a la que requieren otros métodos de gestión de residuos; también pueden ser una fuente de molestia para las zonas próximas por la producción de bioaerosoles, olores e impacto visual” como se indica en el Libro verde de Biorresiduos⁶⁶, es importante tener en cuenta que los principales impactos ambientales generados por la gestión de los residuos en nuestros días se le atribuye en gran parte a las intervenciones físicas de la tierra, y no a las emisiones tal como lo afirma Hauschild & Barlaz⁶⁷.

En la gestión de los biorresiduos en rellenos sanitarios se destacan dos aspectos positivos: la capacidad de almacenamiento del carbono secuestrado por algunos residuos y una producción de energía muy limitada procedente del gas recolectado; este último dependerá del manejo del relleno⁶⁸. Gracias al ambiente anaerobio que se presenta en los rellenos sanitarios, una parte del carbono de los materiales orgánicos derivados de los biorresiduos no se descompone, ya que en condiciones aerobias casi todo este material sería descompuesto liberando el carbono como dióxido de carbono biogénico (CO₂). El carbono presente en los residuos que no es descompuesto se retira del ciclo del carbono, quedando almacenado en un sumidero antropogénico en este caso, el relleno sanitario⁶⁹.

El potencial de almacenamiento de carbono del relleno sanitario varía según los residuos, como se muestra en el **Cuadro 5**.

⁶⁶ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la unión. Op. cit., Disponible en Internet: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁶⁷ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op. cit., p. 130.

⁶⁸ Ibid, Disponible en Internet: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁶⁹ Landfill Carbon Storage in EPA's Waste Reduction Model [en línea]: subtítulo. Ciudad: nombre de la empresa o persona dueña de la página, año de publicación del documento o actualización de la página [consultado 04 de octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://epa.gov/epawaste/conserva/tools/warm/pdfs/landfill-carbon-storage-in-warm10-28-10.pdf>

Cuadro 5. Potencial de almacenamiento de carbono del relleno sanitario.

Potencial de almacenamiento de carbono del Relleno Sanitario	Material de ejemplo
Alto	Periódicos Guías telefónicas Ramas Madera dimensional Tablero de fibra de Densidad media
Medio	Restos de poda
Bajo	Restos de comida

Fuente: Landfill Carbon Storage in EPA's Waste Reduction Model [en línea]: subtítulo. Ciudad: nombre de la empresa o persona dueña de la página, año de publicación del documento o actualización de la página [consultado 04 de octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://epa.gov/epawaste/conserva/tools/warm/pdfs/landfill-carbon-storage-in-warm10-28-10.pdf>

Existen otros impactos que aunque no son exclusivos de los biorresiduos se asocian al funcionamiento del relleno sanitario: ruidos, proliferación de vectores, dispersión del residuo y polvo, explosión y peligro de incendios, daños a la vegetación, contaminación del suelo, alteración de las características edáficas, activación de procesos erosivos, cambio en las geoformas, cambio en la oferta de biomasa, cambio de especies en la composición florística, alejamiento de la fauna, cambio en el valor de la tierra, cambio en el uso del suelo, entre otros⁷⁰.

4.2 METODOLOGÍA ACV

Dentro de las metodologías existentes para la evaluación comparativa de los impactos ambientales generados por productos y servicios se encuentra la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Esta metodología, como lo afirma Christensen⁷¹ se desarrolló inicialmente para evaluar y minimizar los

⁷⁰ Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la unión. Op. cit., Disponible en Internet: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

⁷⁰ Rellenos sanitarios: Guía ambiental. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/Rellenos_Sanitarios.pdf

⁷¹ CHRISTENSEN, Thomas. Introduction to waste management. En: Solid Waste Technology & Management. Wiley: 2011. p 12.

impactos generados por industrias de productos, y su aplicación en la gestión de residuos es relativamente nueva.

La metodología ACV ha sido estandarizada por medio de la norma ISO 14040, la cual define el ACV como: “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”⁷², entendiéndose sistema de producto como el conjunto de procesos unitarios que hacen parte del sistema a evaluar. Según Christensen⁷³ la aplicación del ACV en la gestión de residuos es básicamente la cuantificación de flujo de masas y emisiones, así como el uso y producción de energía dentro del sistema de gestión de residuos y cualquier proceso aguas arriba y aguas abajo; todas las emisiones y recursos son agregados a las categorías de impactos como por ejemplo: calentamiento global o acidificación.

La estandarización de esta metodología se da por medio de las normas ISO así:

- ISO 14040: establece los principios y marco de referencia
- ISO 14044: establece los requisitos y directrices de la metodología.

Como se explica en la norma ISO 14044, “Con la aplicación del ACV se puede ayudar a la identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos y servicios en las distintas etapas de un ciclo de vida, aporta información para la toma de decisiones y selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición”⁷⁴

El ACV se compone de cuatro fases, las cuales se ilustran en la **Figura 1**, y son definidas por la ISO 14040⁷⁵ de la siguiente manera:

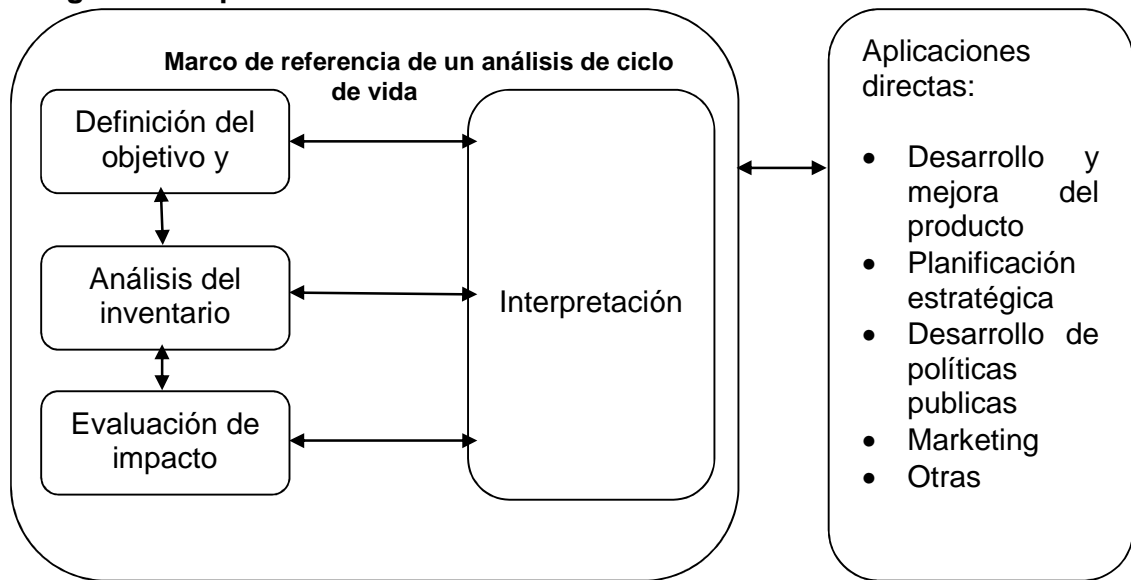
⁷² Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14040:2006. Madrid, p. 10.

⁷³ CHRISTENSEN, Thomas. Op. cit., p.12.

⁷⁴ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida-Requisitos y directrices. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14044:2006. Madrid, p. 8.

⁷⁵ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Op. cit., p. 19-23

Figura 1. Etapas de un ACV



Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14040:2006.

4.2.1 Definición del objetivo y del alcance. En esta etapa se definen los parámetros del estudio.

El objetivo establece:

- La aplicación
- Las razones para realizar el estudio
- El público previsto(a quienes se prevé comunicar los resultados)

El alcance debe incluir:

- El sistema del producto a estudiar
- Funciones y límites del sistema
- Unidad funcional
- Procedimientos de asignación
- Categorías de impacto, metodología de evaluación de impactos y de interpretación
- Requisitos relativos a los datos,
- Suposiciones
- Limitaciones
- Requisitos iniciales de calidad de datos entre otros.

4.2.2 Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV). El objetivo de este inventario es la recolección de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de todos los procesos que forman parte del sistema. Implica la recopilación de datos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio.

Una vez planteado el objetivo y alcance del estudio, el paso siguiente es la recolección de la información en la entrada y salida de los distintos procesos de la unidad funcional de estudio.

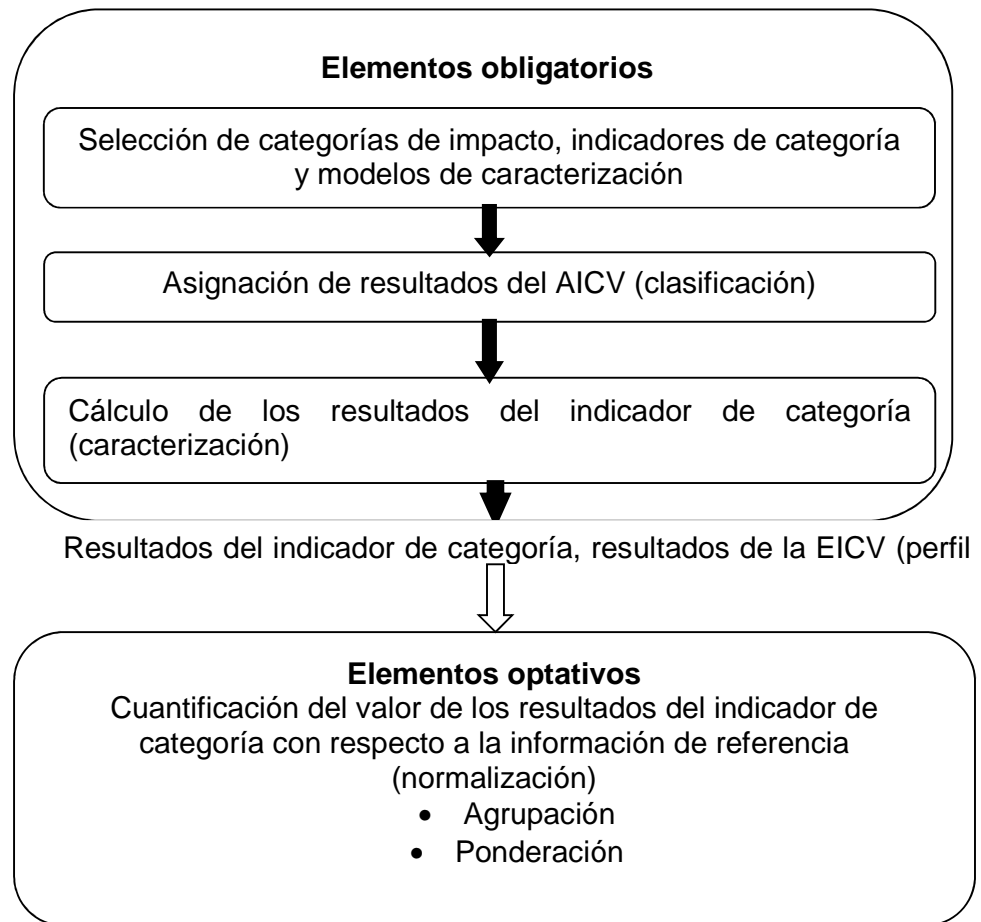
Tal como lo afirma Hauschild & Barlaz⁷⁶ realizar un inventario de ciclo de vida sin la ayuda de una herramienta se hace muy dispendioso, por ello se hace importante el uso de las bases de datos. Estas se crearon ya que en los sistemas de gestión de residuos se hace uso de diferentes materiales y químicos, así como de diferentes tipos de energía; este mismo sistema produce material secundario y una gama productos energéticos, la información requerida es abundante y la carencia de datos reales evidente, haciéndose esta problemática aún más crítica en países en vía de desarrollo como Colombia. Existen diversas bases de datos de los procesos ambientales de los materiales y procesos más comunes⁷⁷.

4.2.3 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV). Se basa en los resultados del AICV para evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales, también proporciona información para la fase de interpretación.

⁷⁶ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op cit., p. 125.

⁷⁷ *Ibíd.*, p. 125.

Figura 2. Elementos de la fase EICV



Fuente: Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14040:2006. Madrid

Esta fase debe incluir los siguientes elementos obligatorios, tal como lo dice la ISO 14044⁷⁸, y como se mostró en la Figura 2:

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- Asignación de resultados del AICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación)
- Cálculo de los resultados de indicadores de categoría (caracterización)

⁷⁸ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida-Requisitos y directrices. Op. cit., p. 25.

Además de los anteriores, existen elementos e información opcionales que pueden ser utilizados, como lo son⁷⁹:

- Normalización: los diferentes impactos potenciales y consumo de recursos están relacionados en una referencia común para facilitar las comparaciones entre las categorías de impacto.
- Ponderación: se asigna a las diferentes categorías de impacto y consumo de recursos la importancia relativa que refleja en el estudio de acuerdo con el objetivo del mismo.

Existen diferentes modelados para el AICV, está el modelado de punto medio (midpoint) y modelado de punto final (endpoint), estos se describen en el ítem **4.2.6** y en la Figura 3 se muestran algunas diferencias básicas entre ambos enfoques.

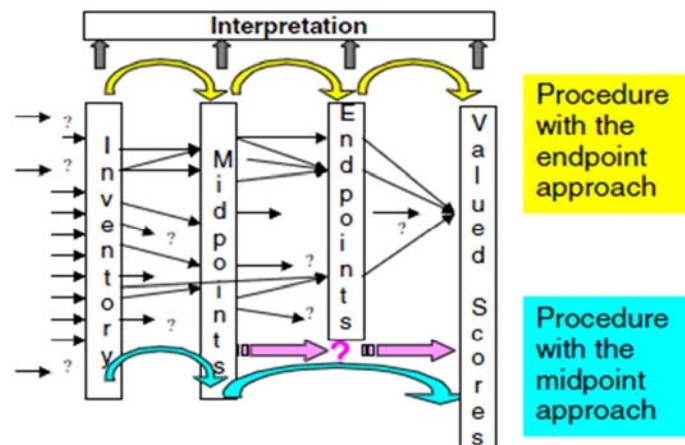
4.2.4 Interpretación. De acuerdo con lo reportado en la ISO 1404080, en esta fase se deben proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definido, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones, es decir, debe contener los siguientes elementos:

- Identificación de los asuntos significativos basados en los resultados de las fases de AICV y la EICV de un ACV
- Una evaluación que considera las verificaciones de los análisis de integridad , sensibilidad y coherencia
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

⁷⁹ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op cit., p. 126.

⁸⁰ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Op. Cit. p. 24.

Figura 3. Representación gráfica de algunas diferencias básicas entre el punto medio y el enfoque de punto final



Fuente: BARE, Jane; HOFSTETTER, Patrick; PENNINGTON, David; UDO DE HAES, Helias. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary Midpoint versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits [en línea]. Brighthon: EPA, 2000 [consultado 15 de Mayo de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.clu-in.org/conf/tio/lcia/ijlca-midpt-endpt.pdf>

Dentro de las actividades de este proyecto está la selección de una herramienta informática para la aplicación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali. Como se mencionó en los antecedentes, existen herramientas cuyo alcance es sólo la fase AICV como IWM-2, IWM Canadá y MSW-DST, herramientas como Simapro, EASETECH si incluyen la fase de EICV.

4.2.5 Categorías de impacto. Representa los asuntos ambientales de interés, la EICV asigna los resultados del ICV a las categorías de impacto; “para cada categoría de impacto, se selecciona un indicador de categoría de impacto de ciclo de vida y se calcula el resultado del indicador de categoría, la recopilación de resultados del indicador (resultados de la EICV) o el perfil de la EICV proporciona información sobre los asuntos ambientales asociados con las entradas y las salidas del sistema de producto”⁸¹. Cada categoría de impacto cuenta con un punto final de categoría, este es un atributo o aspecto del entorno natural, la salud humana o los recursos que identifica un asunto ambiental de interés⁸².

⁸¹ Ibid., p. 17.

⁸² Ibid., p. 19.

La SETAC (Sociedad de toxicología y Química ambiental) fue el primer órgano internacional en apoyar el desarrollo del ACV, su participación con esta metodología data de 1989. Su objetivo es el desarrollo científico en las áreas específicas de investigación y aplicación de los resultados en el campo de la gestión ambiental⁸³.

El grupo de trabajo sobre la evaluación de impacto de la SETAC elaboró una lista de las mejores prácticas disponibles de categorías de impacto, que sirve como una lista básica de categorías, se distinguen tres conjuntos de categorías de impacto⁸⁴:

Grupo A, “línea base de categoría de impactos”:

- Agotamiento de los recursos abióticos
- Impacto en el uso del suelo
 - Competencia por el suelo
- Cambio climático
- Agotamiento del ozono estratosférico
- Toxicidad humana
- Ecotoxicidad:
 - Ecotoxicidad acuática de agua dulce
 - Ecotoxicidad acuática marina
 - Ecotoxicidad terrestre
- Formación de foto-oxidantes
- Acidificación
- Eutrofización

Grupo B, “categorías de impacto estudio específico”:

- Impactos en el uso de la tierra
 - Pérdida de la función de soporte de vida
 - Pérdida de biodiversidad
- Ecotoxicidad
 - Ecotoxicidad sedimentos de agua dulce
 - Ecotoxicidad sedimentos marinos
- Efectos de las radiaciones ionizantes

⁸³ GUINÉE, Jeroen B; GORRÉE, Marieke; HEIJUNGS, Reinout; HUPPES, Gjalit; KONING, De Arjan; OERS, Laura van; SLEESWIJK Anneke Wegener; SUH, Sangwon; UDO DE HAES, Helias; BRUJIN, Hans de; DUIN, Robbert Van; HUIJBREGTS, Mark; LINDEIJER, Erwin; ROORDA, Aksel A.H.; VEN, Bernhard L. van der; WEIDEMA, Bo P. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. [en línea]. Dordrecht, 2002. [Consultado 26 de Noviembre de 2012]. Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

⁸⁴ Ibíd., p. 72-73.

- Olor
 - Malos olores en el aire
- Ruido
- Calor residual
- Bajas

Grupo C, “otras categorías de impacto”:

- Agotamiento de los recursos bióticos
- Desecación
- Olor
 - Malos olores en el agua.

4.2.6 Interpretación subyacente. La metodología ACV se encuentra todavía en desarrollo, a diferencia de las categorías de impacto mundial, calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico, no existe un único enfoque para modelar los impactos⁸⁵, esto dependerá del objetivo del estudio y de las preferencias del desarrollador. Bare et. al 2000⁸⁶ menciona que una de las principales diferencias entre los enfoques de punto medio y punto final es la forma en la que se toma en cuenta la relevancia ambiental de los indicadores de categoría, y las define de la siguiente manera:

- Modelado de punto medio: este enfoque se lleva a cabo por medio de indicadores de punto medio (midpoint), el cual se puede definir como un parámetro en una cadena de causa y efecto que está entre los datos del inventario y los puntos finales de categoría
- Modelado de punto final: se desarrolla por medio de indicadores de punto final (endpoint), los cuales se calculan para reflejar las diferencias entre los factores de estrés en un punto final de una cadena de causa y efecto y pueden ser de interés directo para la comprensión de la sociedad sobre el efecto final, como las medidas de cambio de la biodiversidad.

Las evaluaciones que se llevan a cabo por medio del enfoque de punto medio, arrojan como resultado las categorías de impacto, y las de punto final muestran la relevancia de los indicadores de categoría en áreas de protección como: salud humana, calidad del ecosistema, recursos naturales, etc. Estas áreas de

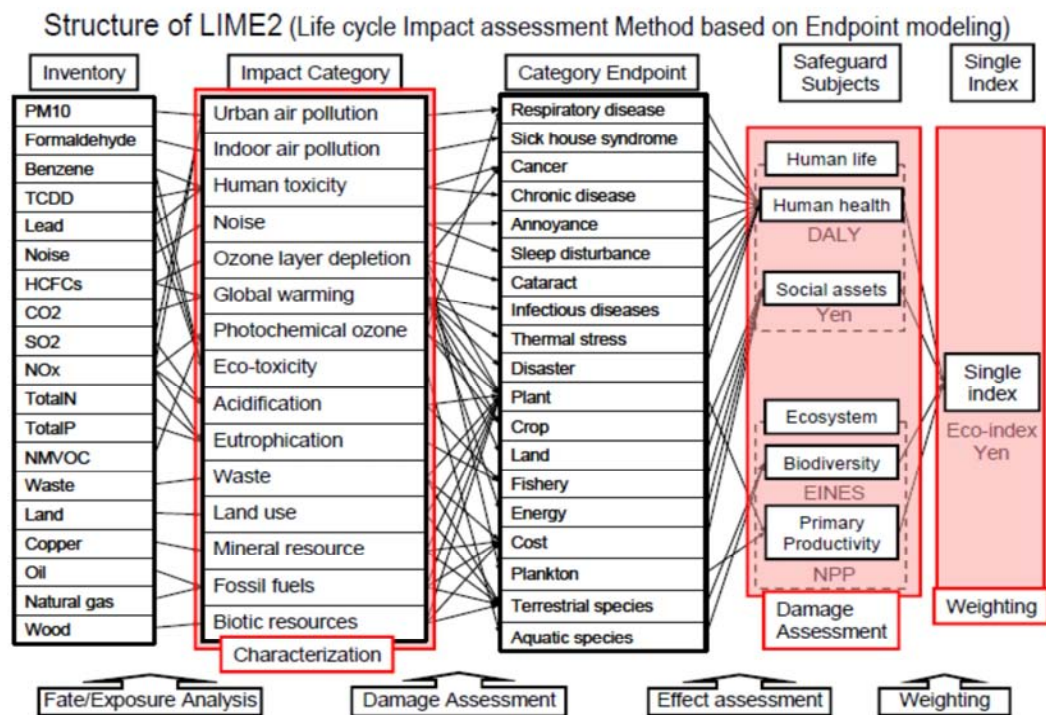
⁸⁵ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op. cit., p. 126.

⁸⁶ BARE, Jane; HOFSTETTER, Patrick; PENNINGTON, David; UDO DE HAES, Helias. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary Midpoint versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits [en línea]. Brighthon: EPA, 2000 [consultado 15 de Mayo de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.clu-in.org/conf/tio/lcia/ijlca-midpt-endpt.pdf>

protección al igual que las categorías de impacto dependerán de cada metodología de evaluación de impacto, tal como se muestra en la **Figura 4**.

En el taller realizado en el 2000 por Bare, Hofstetter, Pennington, & Haes⁸⁷, una de las conclusiones a las que llegó es que los indicadores de punto medio se pueden utilizar para la toma de decisiones por ser más seguros, pero pueden tener una importancia menor para apoyo a las decisiones en algunos casos. Los indicadores de punto final también pueden ser utilizados para la toma de decisiones pues menudo tienen una relevancia mayor, pero menor certeza.

Figura 4. Vías de asignaciones para el modelado de punto medio y punto final para la metodología LIME2.



Fuente: Análisis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

⁸⁷ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.clu-in.org/conf/tio/lcia/ijlca-midpt-endpt.pdf>

4.2.7 Metodologías de evaluación de impacto. Existen diversos modelos de caracterización o también llamados metodologías de evaluación de impacto, estas cumplen con los elementos obligatorios de EICV (clasificación y caracterización), y algunas contienen los pasos opcionales de esta fase (normalización y ponderación). Cada metodología considera un grupo de categorías de impacto, indicadores de categorías y tiene definida su interpretación subyacente; así como también existen modelos que integran las dos (midpoint and endpoint).

Según la ISO⁸⁸ los modelos de caracterización se utilizan para derivar los factores de caracterización, por medio de los cuales se convierten los resultados del AICV a una unidad común del indicador de categoría, este indicador es la representación cuantificable de una categoría de impacto. Estos factores de caracterización se utilizan para modelar cuantitativamente el impacto de cada una de las emisiones que viene del inventario de ciclo de vida y se expresa como un indicador de categoría⁸⁹.

Las primeras metodologías de evaluación de impacto para la evaluación del ciclo de vida se remontan a antes de 1992⁹⁰:

- La EPS (Environmental Priority Strategies): está basada en la interpretación de punto final (endpoints) que expresa los resultados en valores monetarios.
- Swiss Ecotoxicity (or Ecopoints): con base en la distancia del objetivo principal
- CML (1992): se basa en la interpretación de punto medio (midpoint).

Las anteriores fueron la base del desarrollo de las metodologías recientes. Los grupos de trabajo del PNUMA-SETAC comenzaron a trabajar en prácticas recomendadas para la aplicación del ACV, lo que ha dado lugar a un consenso relativamente amplio sobre los mejores enfoques, los principios subyacentes y, en algunos casos, los modelos. En conclusión los elementos obligatorios del EICV (clasificación y caracterización), dependerá de cada metodología de cálculo, de igual manera dependerá si se incluye los elementos optativos; las metodologías más utilizadas para el ACV son⁹¹:

⁸⁸ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida-Requisitos y directrices. Op. cit., p. 26.

⁸⁹ Life Cycle Impact Assessment (LCIA) [en línea]. LC-IMPACT [consultado 05 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.lc-impact.eu/life-cycle-impact-assessment-lcia>

⁹⁰ Análisis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

⁹¹ *Ibíd.*, Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

- CML 2002
- Eco-indicador 99
- EDIP97 and EDIP2003
- EPS 2000
- IMPACT 2002+
- LIME
- LUCAS
- ReCiPe
- Ecological Scarcity Method (Ecopoints 2006)
- TRACI
- MEEuP

La selección y uso de las metodologías de cálculo se define de acuerdo con el objetivo y alcance del proyecto, es decir dependerá de las necesidades de cada contexto. En la sección 7.3.1 de análisis y resultados se presenta una evaluación y selección de estas, para el caso de estudio de este proyecto.

5 CARACTERIZACIÓN DEL CONTEXTO. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE CALI

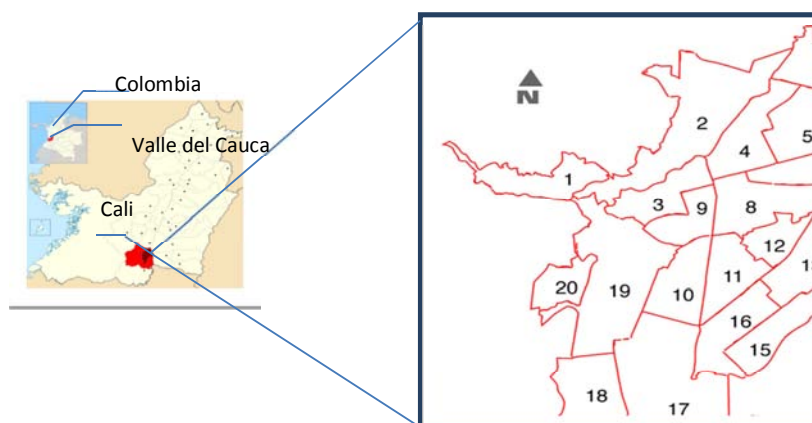
El objeto de estudio de este proyecto es la gestión de los biorresiduos en la ciudad de Cali, por ello a continuación se hace una descripción general de la zona, caracterización fisicoquímica de los residuos, aspectos técnicos y operativos del sistema de aseo, desde la generación hasta la disposición final de residuos, y generación y caracterización de subproductos (lixiviados y gases).

5.1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA CIUDAD DE CALI

Con una población de 2.258.025 habitantes⁹², la ciudad de Cali se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca como se muestra en la Figura 5, limitando al norte con los municipios de la Cumbre y Yumbo, al oriente con Palmira, Candelaria y Puerto Tejada, al sur con Jamundí y al occidente con Buenaventura y Dagua. Su latitud norte es 3°27'26" y longitud oeste 76°31'42". Su temperatura promedio es de 24.6 °C y una precipitación anual de 1,588 mm.

La sectorización del municipio de Cali se encuentra dada por 22 comunas en el área urbana y 15 corregimientos en el área rural, todo esto basado en la información de la Alcaldía de Cali⁹³.

Figura 5. Ubicación de la ciudad de Cali en el departamento del Valle del Cauca, Colombia y su distribución por comunas.



⁹² DANE. Informe: Estimaciones de población 1985 - 2005 y proyecciones de población 2005 - 2020 total departamental por área. Disponible en Internet : <http://www.dane.gov.co/>

⁹³ ALCALDÍA DE SANTIAGO DE CALI. Cali en cifras 2011 [en línea]. Santiago de Cali, 2011. [Consultado 24 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: http://planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali_en_Cifras/Caliencifras2010.pdf

Fuente: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Colombia - Valle del Cauca - Santiago de Cali.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Colombia_-_Valle_del_Cauca_-_Santiago_de_Cali.svg)
<http://www.cali.gov.co/publico2/mapas/mapcomunasbaja.htm>

5.2 GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS

En el año 2006 se realizó una caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali⁹⁴, los resultados obtenidos se muestran en el **Cuadro 6**, donde se evidencia que los biorresiduos (comida y jardín) generados en Cali para el 2006 representaron el 65,54% de los residuos totales generados, también se realizó la caracterización química de los residuos sólidos residenciales, los cuales se exponen en el **Anexo 1**.

Cuadro 6. Composición Física de los residuos sólidos residenciales (%) por estrato socioeconómico y global.

Categoría	Estrato socioeconómico						Global
	1	2	3	4	5	6	
Comida	61,30	61,90	61,03	54,36	54,48	48,37	59,00
Jardín	4,31	2,26	3,09	8,64	16,14	24,06	6,54
Papel	2,75	3,13	3,85	5,31	4,34	6,26	3,84
Cartón	1,87	2,25	2,47	2,81	3,14	2,75	2,39
Bolsas y Empaques	6,72	7,08	7,68	7,21	6,71	4,80	6,93
Plástico soplado	2,86	3,14	3,43	3,98	3,30	2,66	3,21
Caucho y Cuero	1,56	1,38	0,87	0,26	0,17	0,23	0,98
Textiles	2,82	2,28	1,88	1,07	2,04	0,50	1,98
Madera	0,68	0,93	0,48	0,75	0,14	0,23	0,62
Metálicos	0,94	1,00	1,12	1,47	0,95	0,93	1,06
Vidrio	2,19	2,02	2,63	3,35	3,62	3,15	2,56
Cerámicos	0,99	2,18	1,12	1,58	0,78	0,43	1,34
Huesos	0,32	0,31	0,33	0,33	0,21	0,21	0,30
Higiénicos	8,30	8,91	8,19	7,80	3,24	4,79	7,73
Otros	2,38	1,24	1,83	1,09	0,73	0,62	1,52

⁹⁴ ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI, Departamento administrativo de planeación municipal. Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali-2006 [en línea]. Santiago de Cali, 2006. [Consultado 15 de Octubre de 2013]. Disponible en Internet: http://objetos.univalle.edu.co/files/Caracterizacion_residuos_solidos_residenciales_en_Santiago_o_Cali.pdf

Fuente: ALCALDÍA DE SANTIAGO DE CALI, Departamento administrativo de planeación municipal. Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali-2006 [en línea]. Santiago de Cali, 2006. [Consultado 15 de Octubre de 2013]. Disponible en Internet: http://objetos.univalle.edu.co/files/Caracterizacion_residuos_solidos_residenciales_en_Santiago_Cali.pdf

Este estudio de caracterización realizado en Santiago de Cali⁹⁵ se realizó la estimación de la generación de residuos sólidos en el municipio por medio de la estimación de la producción per cápita (ppc), arrojando los siguientes resultados:

- Ppc de residuos sólidos residenciales en la zona urbana de Cali es de 0,39 kg/hab.día en promedio.
- Ppc de residuos sólidos residenciales en la zona rural de Cali es de 0,29 kg/hab.día en promedio.

En el desarrollo de este mismo estudio, realizaron el análisis fisicoquímica de las muestras tomadas en los lados de las manzanas seleccionadas para dicho muestreo (véase **Cuadro 6**)

Entre la información que fue posible recolectar no se encontró información relacionada con la generación de los residuos sólidos municipales, pero si se cuenta con un promedio diario de toneladas mensuales dispuestas en el Relleno Sanitario Colombia- El Guabal que se exponen más adelante en el **Cuadro 8**.

5.3 RECOLECCIÓN

Tal como se indica en el Cuadro 7 los servicios de recolección, barrido y la limpieza de vías y áreas públicas se atiende por medio de 4 operadores y sus zonas de atención de la siguiente manera:

⁹⁵ Ibíd., Disponible en Internet: http://objetos.univalle.edu.co/files/Caracterizacion_residuos_solidos_residenciales_en_Santiago_o_Cali.pdf

Cuadro 7. Zonas de atención

	Operador	Zona Atención
Zona 1	PromoAmbiental Cali	Comunas: 2, 4, 5, 6, 7 y 8
		Corregimientos: Altos de Menga, Bataclan y las Minas.
Zona 2	Emas	Comunas: 11, 12, 13, 14, 15 y 21
Zona 3	PromoAmbiental Valle	Comunas: 10, 16, 17, 18 y 22
		Corregimientos: Pance, El Hormiguero, Villa Carmelo, La Buitrera, Navarro, La Luisa, La Reforma, Canta Claro, La Trinidad y La Sirena
Zona 4	Ciudad Limpia	Comunas: 1, 3, 9, 19 y 20
		Corregimientos: Montebello, El Saladito, Vía al Mar, La Felidia, La Leonera, La Castilla, La Elvira, Pichindé, Los Andes, La Paz y Golondrinas

Fuente: EMSIRVA, 2013

Estas empresas dirigen los residuos sólidos hasta la estación de transferencia, operada por INTERASEO DEL VALLE S.S E.S.P., donde se transfieren 2000 toneladas al día, esto solo incluye Cali, Candelaria, Yumbo, Jamundí y Florida), como lo indica Aluna Consultores Limitada⁹⁶.

5.4 RECUPERACION Y APROVECHAMIENTO

Aluna Consultores y Asociados⁹⁷ expresa que “durante más de 30 años la recuperación de materiales en el sitio de disposición final se llevó a cabo por un sin número de recicladores, los cuales recuperaban aproximadamente 120 toneladas diarias, que por ahora se están depositando en el relleno sanitario Colomba – El Guabal, dentro de este relleno sanitario no existe presencia de recicladores, pues así lo establece la ley”.

De manera oficial no se evidencia ninguna recuperación y/o aprovechamiento de los biorresiduos, es decir, están siendo dispuestos en su totalidad en el relleno sanitario Colomba – El Guabal.

⁹⁶ ALUNA CONSULTORES LIMITADA. Estudio nacional del reciclaje y los recicladores: caracterización del servicio de aseo en los municipios objeto de estudio [PDF]. Bogotá, Marzo 2011. p. 73

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 68.

5.5 DISPOSICIÓN FINAL

Actualmente, los residuos sólidos de la ciudad de Cali son dispuestos en el relleno sanitario Colomba- El Guabal, el cual empezó su funcionamiento a mediados del año 2008, después del cierre definitivo del sitio de disposición final Navarro que se efectuó este mismo año. El relleno sanitario Colomba – EL Guabal es un relleno regional donde se disponen los residuos sólidos de diferentes municipios del Cauca y Valle del Cauca, estos municipios según la SSPD⁹⁸ son:

- **Departamento del Cauca:** Padilla y Villa Rica
- **Departamento del Valle del Cauca:** Cali, Candelaria, Dagua, Florida, Jamundí, La Cumbre, Yotoco y Yumbo.

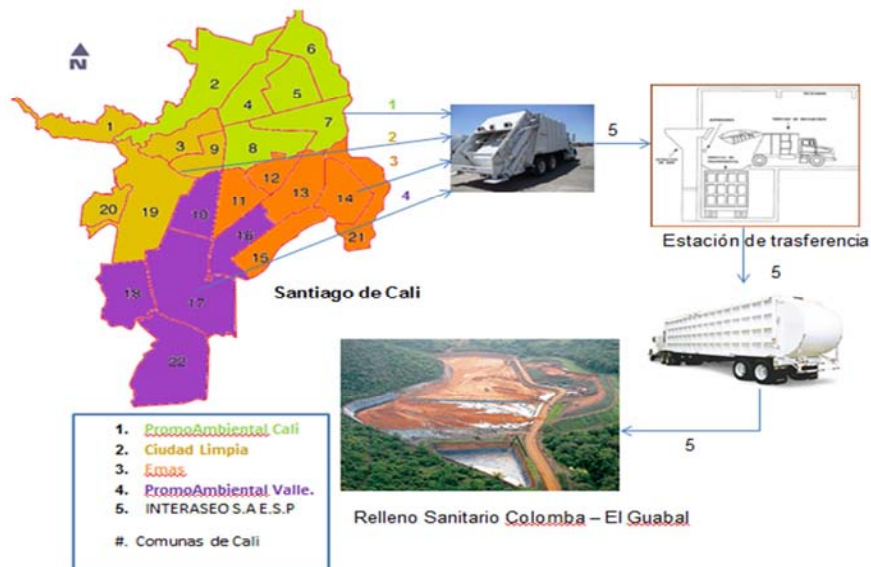
Como indica la Contraloría General de Santiago de Cali⁹⁹, este relleno se localiza a 32.5 km del municipio de Yotoco, su área correspondiente es de 363 ha donde sólo se puede disponer residuos sólidos domiciliarios, residuos sólidos ordinarios provenientes de instituciones de salud, residuos hospitalarios previa desactivación de alta eficiencia y residuos sólidos comerciales e industriales. Se estima que en este relleno sanitario se podrá disponer 19.487.769 t de residuos sólidos, distribuidos en 31.2 años correspondientes a la vida útil del relleno.

En la **Figura 6** se plantea el esquema explicativo del funcionamiento del servicio de aseo en la ciudad de Cali para los residuos sólidos ordinarios.

⁹⁸ SUPERINTENDENCIA PÚBLICA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS. Listado de sistemas de disposición final de residuos sólidos por municipio [EXCEL]. Santiago de Cali, 2011-2012.

⁹⁹ CONTRALORIA GENERAL DE SANTIAGO DE CALI. Informe ejecutivo estado actual proyecto de disposición final de residuos sólidos en Yotoco EMSIRVA ESP. Santiago de Cali, Abril 2008. p.14

Figura 6. Esquema explicativo del funcionamiento del servicio de aseo de la ciudad de Cali (residuos sólidos ordinarios).



Fuente: Imágenes varias tomadas de www.google.com

Cuadro 8. Promedio diario de toneladas mensuales dispuestas en el Relleno Sanitario Colomba- El Guabal

Municipio	Ton/día dispuestas
Cali	1.650
Candelaria	51
Yumbo	69
Jamundí	72
Florida	40
La Cumbre	8
Dagua	25
Caloto	12
Padilla	6
Villa Rica	10
Total	1.943

Fuente: ALUNA CONSULTORES LIMITADA. Estudio nacional del reciclaje y los recicladores: caracterización del servicio de aseo en los municipios objeto de estudio [PDF]. Bogotá, Marzo 2011. p. 72

El **Cuadro 8** muestra el promedio diario de toneladas mensuales dispuestas en el Relleno Sanitario Colomba- EL Guabal, siendo Cali el mayor contribuyente. Con base en la información suministrada por EMSIRVA, para el año 2012 en el relleno sanitario se dispusieron 690.582,14 t de residuos sólidos domiciliarios provenientes de la ciudad de Cali y al mes de agosto de 2013 se dispusieron 492.008, 14 toneladas.

Se mencionó en párrafos anteriores que en la gestión actual de los biorresiduos no se presenta la recuperación y/o aprovechamiento de estos, pero se debe tener en cuenta que esta actividad se puede dar antes de la fase de recogida. También se debe tener en cuenta que este aprovechamiento informal se enfoca más en los materiales de reciclaje y no en los biorresiduos.

5.6 CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS: LIXIVIADOS Y GASES

A pesar que el relleno sanitario de Yotoco está en funcionamiento desde el año 2008 no se encuentra disponible la información acerca de la caracterización de sus gases y lixiviados, esta información se solicitó a la empresa encargada del manejo del relleno sanitario, para este caso INTERASEO DEL VALLE S.A E.S.P, no habiendo sido posible tener acceso a la misma al momento de la realización de este proyecto; a continuación, a manera de contar con datos locales para estos parámetros se presenta la caracterización de los subproductos del sitio de disposición final de Navarro.

5.6.1 Lixiviados. Valencia et. al.¹⁰⁰ realizó el análisis de lixiviados que se consideran viejos o parcialmente estabilizados. Las características encontradas se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Características del lixiviado crudo almacenado en las grandes lagunas del sitio de disposición final Navarro.

Parámetro	Valor
pH (un)	9.09
DBO ₅ (mg/l)	424
DQO(mg/l)	3552
Detergentes (mg/l)	2.08
Color (UPC)	11745
Arsénico (mg/l)	8.86

¹⁰⁰VALENCIA, V.; AGUDELO, J.; RESTREPO, I.; CAJIGAS, A. Evaluación del tratamiento fisicoquímico de lixiviados parcialmente estabilizados, estudio de caso: vertedero de Navarro [en línea]. Cali, Noviembre 2007. [Consultado 17 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/108.pdf>

Cuadro 9. (Continuación)

Cianuro (mg/l)	5.39
N-NH ₃ (mg/l)	546.7

Fuente: VALENCIA, V.; AGUDELO, J.; RESTREPO, I.; CAJIGAS, A. Evaluación del tratamiento fisicoquímico de lixiviados parcialmente estabilizados, estudio de caso: vertedero de Navarro [en línea]. Cali, Noviembre 2007. [Consultado 17 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/108.pdf>

En esta caracterización de lixiviados se evidencia la presencia de amoníaco, el cual como se dijo anteriormente está relacionado con la acidificación y la eutrofización. Es importante destacar que la caracterización se realizó a lixiviados viejos o parcialmente estabilizados. Dado que en el relleno sanitario Colomba – El Guabal se presenta tanto lixiviados jóvenes como viejos, se podría esperar una concentración mayor de amoníaco en los lixiviados jóvenes a la reportada en el **Cuadro 10**.

5.6.2 Emisión de gases. A continuación se presentan los resultados de mediciones realizadas de las emisiones en el sitio de disposición final de Navarro (BN) para algunos gases, realizadas por Gómez et al.¹⁰¹, en un perímetro de 3 km alrededor y algunos en el propio Navarro (BN), como se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Emisiones al aire de gases en un perímetro de 3km alrededor de Navarro.

Emisiones al aire	En el perímetro (0-3 km)	BN
MP ₁₀ (µg/m ³)	22.1	—
SO ₂ (µg/m ³)	0.86	—
CH ₄ (µg/m ³)	39	62.5
C ₆ H ₆ (µg/m ³)	2.92	8.03

Fuente: GÓMEZ, Rosa María; FILIGRANA, Paola Andrea; MÉNDEZ, Fabián. Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del botadero de Navarro [en línea], Cali, Colombia. Cali, Julio – Septiembre 2008. [Consultado 18 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.scielo.org.co/pdf/cm/v39n3/v39n3a6.pdf>.

¹⁰¹ GÓMEZ, Rosa María; FILIGRANA, Paola Andrea; MÉNDEZ, Fabián. Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del botadero de Navarro [en línea], Cali, Colombia. Cali, Julio – Septiembre 2008. [Consultado 18 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.scielo.org.co/pdf/cm/v39n3/v39n3a6.pdf>

6 METODOLOGÍA

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este proyecto comprende la ciudad de Cali (véase Figura 6), como la fuente de generación de los residuos sólidos, específicamente de los biorresiduos, que es la fracción de interés en este proyecto y el relleno sanitario Colomba – El Guabal ubicado en el Municipio de Yotoco a 32,5 km de la ciudad de Cali. Ambos, la ciudad de Cali y el Municipio de Yotoco pertenecen al departamento del Valle del Cauca, localizados en Colombia, Sur América.

A continuación se exponen las actividades realizadas para llevar a cabo con el cumplimiento de los objetivos:

6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Identificar los requerimientos técnicos y de información para la aplicación de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali.

- Identificación de herramientas informáticas:

Para el desarrollo de este proyecto lo primero que se realizó fue una revisión bibliográfica de la aplicación de herramientas informáticas para la implementación de la metodología ACV, reconociendo las más utilizadas y sus aplicaciones como se muestra en el capítulo de antecedentes.

- Reconocimiento de los impactos ambientales generados por la gestión de biorresiduos de origen municipal:

Una vez realizada esta revisión bibliográfica, se procede a la identificación de los diferentes impactos ambientales generados por la gestión de los biorresiduos, haciendo un énfasis en los generados por la producción de gases y lixiviados.

- Caracterización del contexto de la generación de los residuos sólidos en la ciudad de Cali:

Se realizó la búsqueda de la información disponible sobre el servicio de aseo en Cali, desde la generación hasta la disposición final.

- Construcción del marco conceptual de la metodología ACV:

Con un panorama claro sobre los impactos ambientales de interés, el paso a seguir realizar una descripción completa de la metodología ACV, para identificar las fases que la componen. Para esto se realizó una investigación exhaustiva en la bibliografía de ACV para comprender y explicar cada uno de sus componentes.

- Evaluación de la metodología ACV en función de los requerimientos de este proyecto:

Agotadas las fases anteriores, se procedió con la evaluación de la aplicabilidad de cada una de las fases de la metodología ACV en el contexto planteado, de acuerdo con lo que se describe a continuación:

- **Fase 1: Definición de objetivo y alcance**

En esta fase se definió el objetivo y alcance del sistema teniendo como base el objetivo general de este proyecto y los requerimientos establecidos en la ISO para cada uno de ellos.

- **Fase 2: Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (AICV)**

La fase siguiente es el AICV, aunque el objetivo de esta fase es la recolección de datos y procedimientos de cálculo, en el marco del desarrollo del objetivo de este proyecto no se realiza una recolección de datos como tal, pues lo que se está realizando es una evaluación de la aplicabilidad de esta metodología.

El objetivo de esta fase es la recolección de datos y procedimientos de cálculo, en el marco de este proyecto que es la evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV en la gestión de biorresiduos, mas no su implementación, por se realizó una caracterización del contexto de la gestión de los biorresiduos en Cali para entender cómo se lleva a cabo esta gestión y para identificar la información disponible , teniendo en cuenta que a la hora de la realización de este proyecto no fue posible tener acceso a la información solicitada a INTERASEO DEL VALLE S.A E.S.P.

- **Fase 3: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida EICV**

En esta se relacionaron los impactos ambientales identificados con las categorías de impacto del ACV seleccionando así las categorías de impacto a evaluar. También se seleccionó el enfoque de modelado. Seguido se realizó la selección del modelo de caracterización, para lo cual se plantearon 4 criterios

de selección y posteriormente se realizó un contraste de estos con los modelos de caracterización más utilizados en ACV, obteniendo así el CML como modelo de caracterización seleccionado. Dentro de la fase de EICV se encuentra la normalización que es un paso opcional, así que se realiza un análisis de esta con base en la bibliografía encontrada. Los criterios de selección fueron:

- Categorías de impacto consideradas: la metodología de evaluación debe modelar las categorías de impacto seleccionadas para este estudio, en el marco del objeto planteado.
- Enfoque de punto medio: cada metodología de evaluación se basa en un enfoque para modelar, en este caso el enfoque seleccionado es el de punto medio, la metodología a seleccionar debe considerar dicho enfoque.
- Horizonte de tiempo: como se mencionó anteriormente dado que los impactos ambientales que se generan en los rellenos ocurren por varios, hasta cientos de años después de ser clausurados, la metodología seleccionada debe considerar un horizonte de tiempo amplio, para este caso de estudio se plantea un horizonte de tiempo infinito.
- Contexto de desarrollo: el contexto de desarrollo de la metodología, hace referencia al desarrollo de los factores de caracterización, que son utilizados para modelar cuantitativamente el impacto de las emisiones. Por ello es óptima aquella metodología con un contexto de desarrollo global.

- **Fase 5: interpretación**

El último paso en la implementación de un ACV es la interpretación, al igual que AICV esta fase no se desarrolla bajo las premisas de este estudio, pues el objetivo no es obtener los resultados sino evaluar la aplicabilidad de la misma, pero se destacan aspectos importantes de esta fase.

- Normalización:

Esta fase es un elemento optativo de EICV, se realizó un análisis entorno a la aplicación de este en los estudios relacionados con ACV y los requerimientos para su aplicación.

- Selección de la herramienta informática

Posteriormente se identificó el o los modelos de caracterización implementados en cada una de las herramientas informáticas estudiadas, identificando

aquellas que trabaja con el modelo de caracterización seleccionado (CML) y así preseleccionar un grupo de herramientas informáticas que podría ser usadas para la evaluación cuantitativa de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos en la ciudad de Cali, esto de acuerdo con los criterios evaluados hasta el momento.

- Identificación de los requerimientos de información

Para realizar la identificación de los requerimientos de información se hizo uso de la herramienta LCA-IWM, puesto que no se tuvo acceso a las demás herramientas informáticas que contaban con la metodología de cálculo seleccionada; también se utilizó el estudio realizado por Güereca¹⁰² donde se implementa la herramienta informática TEAM, para identificar la información requerida.

6.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Plantear las necesidades de mejoramiento de la aplicación de la metodología ACV para la evaluación de los impactos ambientales de la gestión actual de los biorresiduos en la ciudad de Cali.

La actividad realizada para dar cumplimiento a este objetivo fue el planteamiento de necesidades de mejoramiento para la aplicabilidad del ACV, con base en toda la información adquirida a través del cumplimiento del objetivo específico 1.

Con todas las actividades planteadas anteriormente para el cumplimiento de los objetivos específicos, también se da cumplimiento al objetivo general de este proyecto que es: Evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales en la ciudad de Cali.

¹⁰² GÜERECA, Leonor Patricia. Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Doctorado de ingeniería ambiental. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña. 2006.

7 EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL ACV PARA EL CONTEXTO PLANTEADO

Como se planteó anteriormente en el ítem 4.2, la metodología ACV está compuesta de 4 etapas (véase Figura 1.) definición de objetivo y alcance, AICV, EICV e interpretación. A continuación se presenta la evaluación de la aplicabilidad del ACV para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos, para esto, es necesario realizar el planteamiento del objetivo y alcance, para definir el contexto en el cual se desarrolla la evaluación.

7.1 PLANTEAMIENTO DEL OBJETIVO Y ALCANCE

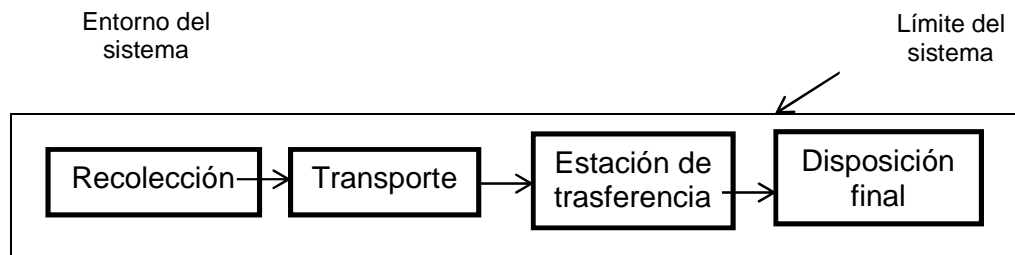
7.1.1 Objetivo. El objetivo de este estudio es evaluar la aplicabilidad del análisis de ciclo de vida para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos de origen municipales de la ciudad de Cali, con el apoyo de una herramienta informática. Los resultados aquí obtenidos pueden ser posteriormente utilizados por el Municipio, empresas prestadoras del servicio de aseo, actores de la academia interesados en la aplicación del análisis del ciclo de vida para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión de residuos sólidos.

7.1.2 Alcance. En este estudio se define un único escenario de evaluación, donde el objeto de estudio son los biorresiduos de origen municipal de la ciudad de Cali que son dispuestos en el relleno sanitario Colomba - El Guabal, ubicado en el municipio de Yotoco. Para este estudio se tiene en cuenta residuos biodegradables de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumos al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos, no se tiene en cuenta residuos agrícolas o forestales, el estiércol, los lodos de depuración, ni otros residuos biodegradables como textiles naturales, papel o madera tratada. Se estudiará la gestión de estos biorresiduos en la recolección, transporte, estación de transferencia y disposición final.

Para implementar las etapas de análisis del inventario y evaluación de impacto, previamente se debe realizar la selección de las categorías de impacto a evaluar seguido por la selección de la metodología de cálculo que se va a implementar teniendo en cuenta la interpretación subyacente que se desea utilizar, estos aspectos condicionarán la selección de la herramienta informática.

En la **Figura 7** se muestra el esquema de producto de este proyecto. A pesar de que la etapa de generación no se encuentra en el sistema de producto, esta influye en la etapa de recogida, pues está directamente relacionado con la cantidad de residuos generados.

Figura 7. Sistema de producto



7.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (AICV)

En esta fase se establece los requerimientos de información para cada componente definido del sistema de producto, como se ha mencionado anteriormente es uno de los aspectos más decisivos de la aplicación de la metodología ACV, debido a la necesidad de grandes cantidades de información, que además debe soportarse en su calidad, con el fin de garantizar buenos resultados. El desarrollo de esta fase se complementa en el ítem 7.6, en donde se hace énfasis en los requerimientos de información que implica la aplicación de la metodología.

7.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)

La fase de la EICV debe incluir los siguientes elementos obligatorios según la ISO¹⁰³ como se mostró anteriormente en la Figura 2:

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- Asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación)
- Cálculo de los resultados de indicadores de categoría (caracterización)

Estos dos últimos elementos son desarrollados con el soporte de una herramienta informática.

¹⁰³ Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida-Requisitos y directrices. Op. cit., p. 25.

7.3.1 Selección de las categorías de impacto. Los resultados del ICV se traducen en contribuciones a las categorías de impacto, para poder realizar la fase de AICV, se hace necesario seleccionar las categorías de impacto relevantes para el objetivo de nuestro caso de estudio Guinée et al. , que es la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión de biorresiduos en la ciudad de Cali.

La selección de las categorías de impacto se debe realizar con base en el objeto de estudio, para este caso particular esta selección se debe realizar teniendo en cuenta los impactos ambientales asociados con la gestión de los biorresiduos, los cuales fueron expuestos anteriormente en el ítem 4.1, quedando como categorías de interés las siguientes:

- Impactos en el uso del suelo: competencia por el suelo (grandes extensiones de tierra requerida)
- Cambio climático (producción de gases)
- Formación de oxidantes fotoquímicos (producción de gases)
- Acidificación(transporte)
- Eutrofización(transporte)
- Ruido

A continuación se describen brevemente cada una de las categorías a evaluar y sus ecuaciones de cálculo, de acuerdo con lo expresado por Guinée et al. 2002¹⁰⁴, donde se corrobora la relación de las mismas con el objeto de estudio:

- Impactos en el uso del suelo, competencia por el suelo: se refiere a la pérdida de la tierra como un recurso, en el sentido de no estar disponible temporalmente.

Competencia por el suelo = $a * t * 1 = [m^2/año]$

Dónde:

a: área usada;

t: tiempo durante el cual se va a utilizar el terreno,

1 es el factor de caracterización.

- Cambio climático: abarca los cambios climáticos producto de la acumulación de gases efecto invernadero en la atmósfera, estos gases son de larga vida y absorben la radiación infrarroja de la tierra. El

¹⁰⁴ Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. Op. cit., Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

calentamiento resultante de la atmósfera se propaga por los océanos y continentes, generando el calentamiento de la tierra¹⁰⁵.

Cambio climático: $\Sigma_i = \text{GWP}_i * m_i$

Dónde:

GWP: Potencial de Calentamiento Global del compuesto i;

m_i : cantidad de sustancia i emitida en kg

El indicador resultante es el potencial de Calentamiento Global (GWP) que se expresa en kg de CO₂ equivalentes

- Formación de oxidantes fotoquímicos: se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles (COV) y el monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x). El ozono es considerado el más importante de estos compuestos oxidantes, junto con el nitrato de peroxiacetilo (PAN). Estos compuestos reactivos pueden ser perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas, y también puede dañar los cultivos.

Formación de oxidantes fotoquímicos: $\Sigma_i = \text{POCP}_i * m_i$

Donde:

POCP_i: Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico del compuesto i;

m_i : cantidad de sustancia i emitida

El indicador resultante es el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) que se expresa en kg de etileno equivalentes

- Acidificación: los contaminantes acidificantes impactan el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, organismos biológicos, ecosistemas y bienes materiales. Los mayores contaminantes acidificantes son : SO₂, NO_x y NH_x.

Acidificación: $\Sigma_i: \text{AP}_i * m_i = [\text{kg SO}_2\text{-Eq}]$

Donde:

AP_i: Potencial de Acidificación

m_i : cantidad de sustancia i emitida

¹⁰⁵ HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. Op cit., p. 121.

El indicador resultante es el Potencial de Acidificación (AP) que se expresa en kg de SO₂ equivalentes.

- Eutrofización: hace referencia a los impactos potenciales causados por niveles excesivamente altos de macronutrientes. Los principales macronutrientes son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), el enriquecimiento de estos macronutrientes puede causar cambios indeseables en la composición de especies y eleva la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos y terrestres; en los ecosistemas acuáticos esto puede llevar a una depresión en los niveles de oxígeno, lo cual conduce a un incremento en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Además concentraciones elevadas de estos nutrientes pueden hacer que las aguas superficiales no sean aptas como fuente de agua potable.

Eutrofización: $\sum_i EP_i * m_i$

Donde:

EP_i: Potencial de Eutrofización

m_i: cantidad de sustancia i emitida

El indicador resultante es el Potencial de Eutrofización (EP) que se expresa en términos de kg PO₄³⁻ equivalentes.

- Ruido: también se le llama contaminación acústica, hace referencia a los impactos ambientales de sonido. La ecuación para el cálculo del ruido no se encuentra expresada en Guinée et al.¹⁰⁶

A lo largo de las ecuaciones anteriores se expresó m_i y fue definida como la cantidad i de sustancia emitida, esta variable proviene del inventario de ciclo de vida.

¹⁰⁶ Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. Op. cit., Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

7.3.2 Selección de interpretación subyacente. Anteriormente se mencionó que desde el punto de vista de los procesos de toma de decisiones, el enfoque de modelado de punto medio tiene menor relevancia y mayor certeza, que en contraste, el enfoque de punto final a menudo tiene mayor relevancia pero menor certeza, haciendo referencia a que el enfoque de punto final no es lo suficientemente amplia y aún se encuentra en desarrollo como lo afirma Guinée et al.¹⁰⁷.

En diferentes estudios relacionados con los impactos generados por la gestión de los residuos sólidos como: Zhao et al.¹⁰⁸, Boldrin et al.¹⁰⁹, Bovea et al.¹¹⁰, Zaman¹¹¹, Méndez¹¹², entre otros, se han desarrollado bajo en enfoque de punto medio.

Basados en los antecedentes de la implementación de este método y que el enfoque de punto final aún está en desarrollo, se selecciona el enfoque de punto medio para este proyecto.

7.3.3 Selección del modelo de caracterización. Una vez seleccionadas las categorías de impacto y el enfoque de interpretación con el cual se desea realizar el modelado del ACV, se debe seleccionar los modelos de caracterización también conocidos como metodologías de evaluación, en este estudio esto se realizará con base los siguientes criterios:

- Categorías de impacto consideradas: la metodología de evaluación debe modelar las categorías de impacto seleccionadas para este estudio, en el marco del objeto planteado.
- Enfoque de punto medio: cada metodología de evaluación se basa en un enfoque para modelar, en este caso el enfoque seleccionado es el de

¹⁰⁷ Ibíd., Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

¹⁰⁸ ZHAO, Yan; CHRISTENSEN, Thomas; LU, Wenjing; WU, Huayong; WANG, Hongtao. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City, China. En: Waste management. Diciembre, 2011, n° 31, p 793-799.

¹⁰⁹ BOLDRIN, Alessio; NEIDEL, Trine Lund; DAMGAARD, Anders; BHANDER, Gurbakhash; MOLLER, Jacob; CHRISTENSEN, Thomas. Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. En: Waste management. Diciembre, 2010, n°31, p.616-630..

¹¹⁰ Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. Op. cit., En: Waste Management.

¹¹¹ Comparative study of municipal solid waste treatment technologies. Op. cit., Disponible en Internet: <http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf>

¹¹² Aplicación de técnicas de ciclo de vida al diseño de un sistema de gestión de residuos urbanos para la ciudad de Chihuahua. Op. cit.

punto medio, la metodología a seleccionar debe considerar dicho enfoque.

- **Horizonte de tiempo:** como se mencionó anteriormente dado que los impactos ambientales que se generan en los rellenos ocurren por varios, hasta cientos de años después de ser clausurados, la metodología seleccionada debe considerar un horizonte de tiempo amplio, para este caso de estudio se plantea un horizonte de tiempo infinito.
- **Contexto de desarrollo:** el contexto de desarrollo de la metodología, hace referencia al desarrollo de los factores de caracterización, que son utilizados para modelar cuantitativamente el impacto de las emisiones. Por ello es óptima aquella metodología con un contexto de desarrollo global.

A continuación se presenta en el **Cuadro 11** las metodologías de evaluación más utilizadas como lo indica el informe de las Comunidades Europeas¹¹³ y las categorías de impacto que modelan.

Dentro de las categorías de impacto seleccionadas se encuentra el ruido, a pesar de esto, esta categoría no se tomó en cuenta a la hora de la evaluación de las metodologías, solo se hace alusión a que metodología la incluye en su evaluación.

Cuadro 11. Comparación de los diferentes modelos, respecto a sus enfoques de modelado y las categorías de impacto modelados

Metodología de evaluación	Interpretación subyacente	1	2	3	4	5	R	Total
CML 2002	Midpoint	1	1	1	1	1	0	5
Eco-indicador 99	Endpoint	1	1	0	1	1	0	4
EDIP97	Midpoint	0	1	1	1	1	1	4
EDIP 2003	Midpoint	0	1	1	1	1	1	4
EPS 2000	Endpoint	0	0	0	0	0	0	0
IMPACT 2002+	Midpoint/Endpoint	1	1	1	1	1	0	5
LIME	Midpoint/Endpoint	1	1	1	1	1	1	5
LUCAS	Midpoint	1	1	1	1	1	0	5
ReCiPe	Midpoint/Endpoint	1	1	1	1	1	0	5
Ecopoints 2006	Midpoint. Endpoint	0	1	1	0	0	0	2

¹¹³ Analysis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

Cuadro 11. (Continuación)

Metodología de evaluación	Interpretación subyacente	1	2	3	4	5	R	Total
TRACI	Midpoint	0	1	1	1	1	0	4
MEEuP	Midpoint	0	1	1	1	1	0	4

0: no lo evalúa; 1: si lo evalúa

Fuente: Analysis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

Tabla 2. Evaluación cualitativa

CALIFICACIÓN	SIGNIFICADO
1	Competencia por el suelo
2	Cambio climático
3	Formación de oxidantes fotoquímicos
4	Acidificación
5	Eutrofización
R	Ruido

Continuando con el análisis de las metodologías, se seleccionan aquellas que trabajan bajo un enfoque de punto medio, en el **Cuadro 12** se expone la comparación de cada una de estas, con el contexto de desarrollo, horizonte de tiempo y total de categorías de impacto que evalúa el conjunto de las seleccionadas

Cuadro 12. Comparación de las metodologías de punto medio de acuerdo con el contexto de desarrollo, horizonte de tiempo y categorías de impacto modeladas.

Metodología de evaluación	Contexto de desarrollo de la metodología	Horizonte de tiempo	Total
LIME	Japón, excepto para los impactos globales como cambio climático y agotamiento de ozono estratosférico	Depende de la categoría de impacto	5
CML 2001/2002	Global, excepto por acidificación (Europa) y formación de oxidantes fotoquímicos (trayectoria	Infinito en la mayoría de las categorías	5

Cuadro 12. (Continuación)

Metodología de evaluación	Contexto de desarrollo de la metodología	Horizonte de tiempo	Total
	Europea).		
IMPACT 2002+	Europeo para la versión básica. La versión multicontinental evalúa las emisiones que se producen en todos los continentes.	Infinito(independiente de la persistencia de las sustancias)	5
LUCAS	Global para cambio climático y agotamiento del ozono. Canadá para categorías de impacto regional.	Horizonte de tiempo a largo plazo se ve favorecido en cada categoría	5
ReCiPe	Europa. Global para cambio climático y agotamiento de la capa de ozono.	20 años, 100 años o indefinido, dependiendo de la perspectiva cultural	5
TRACI	Emisiones en los Estados Unidos. Impactos en Norte América para: acidificación eutrofización, formación de smog. Global para agotamiento del ozono y calentamiento global	A largo plazo	4
MEEuP	Estados Unidos	No especificado	4
EDIP97	Global	Largo	4
EDIP 2003	Europeo. global para las categorías de impacto global	Infinito	4
Ecopoints 2006	Suiza, y existe una versión japonesa.	Flujos reales y críticos se definen en función de cada año. Objetivos de algunos impactos, como el cambio climático, la demanda de recursos de energía o emisiones de metales pesados reflejan los objetivos políticos a largo plazo.	2

Total: total de categorías de impacto evaluadas

Fuente: Analysis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

De acuerdo con el **cuadro 11**, las siguientes metodologías de evaluación abarcan las categorías de impacto seleccionadas y tienen el enfoque de punto medio:

- IMPACT 2002+
- LIME
- LUCAS
- ReCiPe
- CML 2002

Metodologías como IMPACT 2002+, LIME y ReCiPe cuentan además con enfoque de punto final, esta última fue desarrollado en base en la metodología CML para punto medio y el Eco-indicador para punto final¹¹⁴. Así pues estas 5 metodologías cumplen con dos de los 4 criterios de selección.

En el **cuadro 12** se puede evidenciar, que la mayoría de las metodologías de evaluación se han desarrollado para Europa, región en la cual se han llevado a cabo la mayoría de los estudios realizados de ACV enfocados en la evaluación de la gestión de residuos sólidos, pues la carencia de información primaria es un limitante para su aplicación en los países en vía de desarrollo como lo afirma Laurent et al.¹¹⁵; en contraste, el uso limitado del ACV en la región ALC redundaba en la inexistencia de una metodología para la cual esta región sea el contexto de aplicación.

En tal medida, será importante seleccionar para este estudio una metodología cuya aplicación se extienda a un contexto global, basados en la premisa de evitar el sesgo que pueda tener por efectos de la regionalización.

¹¹⁴ GOEDKOOPT, Mark; HEIJUNGS, Reinout; HUIJBREGTS, Mark; SCHRYVER, An De; STRUIJS, Jaap; ZELM, Rosaline van. ReCiPe 2008 a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. [en línea]: Report I: Characterisation. Holanda: PRé Consultants, 2009 [consultado 18 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.pre-sustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf

¹¹⁵ LAURENT, A.; CLAVREUL, J.; BAKAS, I.; BERNSTAD, A.; NIERO, M.; GENTIL, E.; HAUSCHILD, M.Z.; CHRISTENSEN, T.H. A critical review of life cycle assessment applied to solid waste management systems [PDF]. Dinamarca: 2013. p. 4.

En el **cuadro 13** se presenta mayor información del contexto de desarrollo de las diferentes metodologías, según la categoría de impacto.

Cuadro 13. Categorías de impacto de la metodología CML 2001, implementadas en la base de datos Ecoinvent.

Categorías de impactos de la línea base	Nombre	Unidades	Ubicación
Potencial de acidificación	Generic	kg SO ₂ -Eq	Global
Cambio climático	GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	Global
Potencial de eutrofización	Generic	kg PO ₄ -Eq	Global
Uso del suelo	Competition	m ² /año	Global
Oxidación fotoquímica (Smog de verano)	High NO _x POCP	kg Etileno-Eq	Regional

Fuente:¹¹⁶ ALTHAUS et al. Implementation of Life cycle Impact Assessment Methods. Data v2.0 (2007) [en línea].Dübendorf, Diciembre 2007. [Consultado 28 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/EcoinventImpactAssessmentMethods.pdf>

Considerando lo anterior y de acuerdo con lo consignado en el **cuadro 12**, entre las 5 metodologías preseleccionadas, para este caso, puede ser de interés, el uso de las metodologías tales como ReCipe y CML, las cuales plantean un contexto de desarrollo global para la mayoría de las categorías de impacto seleccionadas, considerando las excepciones planteadas.

No obstante lo anterior, el CML ha sido ampliamente utilizado en estudios realizados relacionados con el objeto de este proyecto, tales como los ejecutados por Zaman¹¹⁷, Bovea et al.¹¹⁸, Güereca¹¹⁹. Esta metodología esta

¹¹⁶ ALTHAUS, Hans-Jörg; BAUER, Christian; DOKA, Gabor; DONES, Roberto; HISCHIER, Roland; HELLWEG, Stefanie; HUMBERT, Sébastien; KÖLLNER, Thomas; LOERINCIK, Yves; MARGNI, Manuele; NEMECEK, Thomas. Implementation of Life cycle Impact Assessment Methods. Data v2.0 (2007) [en línea].Dübendorf, Diciembre 2007. [Consultado 28 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/EcoinventImpactAssessmentMethods.pdf>

¹¹⁷ Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. Op. cit., disponible en Internet: <http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf>

¹¹⁸ Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. Op. cit., *En*: Waste Management, 2010.

¹¹⁹ Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Doctorado de ingeniería ambiental. Op. cit

soportada en un manual para las mejores prácticas para el indicador de punto medio realizado por Guinée et al.¹²⁰. A demás desde la primera versión de esta metodología en 1992, se han realizado dos versiones más, siendo la versión actual el CML 2013, siendo así la metodología más actualizada.

Teniendo como fundamento las razones expuestas, como resultado de la evaluación realizada, en este estudio se plantea la adopción de la metodología de caracterización CML; siendo importante tener en cuenta que las demás metodologías no se descartan absolutamente, pues un factor determinante en la implementación de estas metodologías son las herramientas informáticas, las cuales en algunas ocasiones permiten modificar los datos que traen por defecto o que están relacionados con su base de datos, por datos específicos del contexto de estudio, en el ítem 7.6 se hará una evaluación de las herramientas informáticas existentes en relación con los requerimientos definidos para este estudio.

7.3.4 Normalización. Una vez evaluadas las etapas obligatorias del ACV, a continuación se analizará la etapa de normalización, la cual es considerada un elemento optativo de la metodología (véase Figura 3).

Según Lindeijer, citado por Güereca¹²¹ “el principal objetivo de la normalización es relacionar las cargas ambientales de un producto o servicio con las cargas ambientales de su entorno. En otras palabras la normalización relaciona el micro-mundo de un ACV con el macro-mundo en el cual los procesos y servicios están inmersos”.

En capítulos anteriores se planteó que uno de los objetivos de la aplicación del ACV en la gestión de los residuos sólidos es apoyar la toma de decisiones, por ello adicional a realizar el estudio con datos de calidad, se debe analizar los datos de una forma en la que se pueda interpretar el nivel de contribución de cada categoría, es decir poder compararlas entre ellas.

Aunque la mayoría de los estudios realizados de ACV no implementa la normalización, actualmente existen investigaciones como las realizadas por Güereca¹²² y Wegener¹²³ orientadas al desarrollo de metodologías para la implementación de la normalización.

¹²⁰ Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. Op. cit., Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

¹²¹ Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Op. cit., p.38.

¹²² *Ibíd.*, p.38.

¹²³ WEGENER, Anneke. Regional LCA in a global perspective: a basic for spatially differentiated environmental life cycle assessment. Tesis doctoral. Netherlands: Universiteit Leiden. 2010.

A pesar de ser un elemento optativo se considera importante evaluar su implementación, teniendo en cuenta que se han realizado investigaciones específicas para este tema. Tal como lo afirma Güereca¹²⁴ “la referencia para la normalización es un indicador de impacto por categoría, caracterizado a partir de las intervenciones de todas las actividades de la sociedad para alguna región determinada y en un período de referencia”. A estas referencias de normalización se les llaman emisiones de referencia, para el caso del CML 2013¹²⁵ se encuentran disponibles las siguientes:

- *Netherlands 1997-1998*
- *West Europe 1995*
- *World 1995*
- *World 1990*
- *EU25+3 2000 (25 países de Europa más Islandia, Noruega y Suiza)*
- *World 2000*

Así pues, si lo que se desea es entender de una manera clara los resultados arrojados por el EICV, y se desea regionalizar los datos en la medida de lo posible, ya sea seleccionando unas emisiones de referencia que se consideren se adapten al contexto de estudio o desarrollando las propias del contexto de evaluación, la aplicación de la normalización deberá ser discutida a profundidad dependiendo del objetivo del proyecto.

En concordancia con lo anterior, siendo consecuentes con el objetivo y alcance planteado, que se refiere a la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali, no se considera necesaria la implementación de esta fase.

7.4 INTERPRETACIÓN

Dada la naturaleza de esta etapa, la cual está relacionada con los resultados obtenidos producto de la aplicación de las fases ICV y EICV, en este proyecto no aplica su desarrollo, en tanto que el alcance se limitó a la evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV.

¹²⁴ Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Op. cit., p. 1.

¹²⁵ INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML) [en línea]. Nederlands: Universiteit Leiden [consultado 15 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

7.5 EVALUACIÓN DE LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS

Como resultado de la revisión bibliográfica realizada, las herramientas informáticas ampliamente utilizadas para la evaluación de los impactos ambientales de la gestión de los residuos sólidos, mediante el uso de la metodología ACV, son:

- WASTED
- EASETECH
- IWM-2
- IWM-Canada
- WISARD
- LCA-IWM
- IMPACT 2002+
- SIMAPRO 8
- IPCC

En el **Cuadro 14** se muestra las metodologías de evaluación implementadas en las diferentes herramientas informáticas.

Cuadro 14. Herramientas informáticas y metodologías de evaluación.

Herramienta informática	Metodología de evaluación
WASTED	N.E
EASETECH	EDIP 97 EDIP 2003 ReCiPe CML (2013)
IWM-2	No realiza EICV solo ICV
WM-Canada	No realiza EICV solo ICV
WISARD	N.E
LCA-IWM	CML 2001
IMPACT 2002+	IMPACT 2002
SIMAPRO 8	BEES CML 1992 CML 2001 Cumulative Energy Demand Cumulative Exergy Demand (CExD) Eco-indicador 95 Eco-indicador 99 Huella ecológica Ecopoints 97 Ecological Scarcity 2006

Cuadro 14. (Continuación)

Herramienta informática	Metodología de evaluación
	Ecosystem Damage Potencial (EDP) EDIP/UMIP 97 EDIP 2003 EPD 2007 EPS 2000 IMPACT 2002+ IPCC 2001 GWP IPCC 2007 Selected LCI results TRACI 2
IPCC	Tier 1 y Tier 2
TEAM 5	CML 2001 Eco-indicador 99 CML 92 EB CST USES FRED IPCC WMO

N.E: No encontrada

Teniendo en cuenta que la metodología de evaluación CML fue seleccionada como la más apropiada para este estudio, entre aquellas evaluadas (véase sección 7.3.2.); en el **Cuadro 14**, se puede ver que ésta ha sido implementada en varias herramientas informáticas, tales como: Simapro, LCA-IWM, TEAM y EASETECH.

Para el caso de SIMAPRO 8, se identificó que es una herramienta muy robusta, que además del CML (2001 y 1992) considera otras 18 metodologías de evaluación (véase **Cuadro 14**), varias de las cuales fueron preseleccionadas para el desarrollo de este proyecto (véase **Cuadro 12**), no obstante lo anterior, a pesar de la evidencia de su uso en evaluaciones realizadas a la gestión de residuos sólidos como Bovea et al.¹²⁶ y Zaman¹²⁷ no es una herramienta específica para este campo, lo que obliga a llevar a cabo adaptaciones de la misma, que pueden ser posibles contando con cierta experticia, como resultado de un entrenamiento especializado en su uso. Lo cual impidió completar la evaluación integral de esta herramienta, en el desarrollo de este trabajo. Es necesario tener en cuenta que esta herramienta no es de uso libre; sin

¹²⁶ Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. Op. cit., En: Waste Management.

¹²⁷ Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment. Op. cit., Disponible en Internet: <http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf>

embargo se puede acceder a una licencia académica para ella y su base de datos Ecoinvent 3, como es el caso de este proyecto

Al método CML ¹²⁸ se le han implementado mejoras en los factores de caracterización desde el año de su desarrollo con la ayuda de muchos estudios realizados para el desarrollo de estos factores, la última versión fue en el 2013, la cual es implementada por el EASETECH.

Por su parte el LCA-IWM está desarrollado sobre la base de la metodología de evaluación CML, además de que es una herramienta informática especializada en la evaluación de la gestión de residuos sólidos, presenta una interfaz que facilita su utilización y es de uso libre.

En cuanto a la herramienta informática TEAM, esta es de acceso limitado, lo cual no permitió obtener mayor información para su evaluación en este proyecto.

Por último, el EASETECH cuenta con el CML (2013), que es la versión más reciente, y también implementa la metodología ReCiPe que modela de forma conjunta el CML (2013) y Eco-indicador 99. Es importante destacar que es una herramienta informática especializada en la evaluación de la gestión de los residuos sólidos, constituyéndose en la mejor opción para este proyecto; sin embargo, no es de uso libre, dado que su accesibilidad está condicionada a un entrenamiento especializado en el uso e interpretación del modelo.

7.6 IDENTIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA

En el marco de la evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV, se considera importante la revisión de la información requerida para la implementación de la metodología ACV; con el apoyo de herramientas informáticas.

Para facilitar esta tarea, se procedió a identificar los requerimientos de información de las herramientas informáticas preseleccionadas a las que se tuvo acceso, bien sea a través del uso de la misma; como a través de bibliografía reportada al respecto. Así las cosas, a continuación se presentan los resultados de la revisión realizada para las herramientas LCA-IWM y TEAM 4.0.

¹²⁸ INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML). Op. cit.. Disponible en Internet: <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

7.6.1 De acuerdo con LCA-IWM (Municipal Solid Waste Management System Assessment Tool). Como se mencionó anteriormente en el ítem 1 LCA-IWM está compuesto por dos módulos, una de predicción de la cantidad y composición de residuos y de valoración del sistema de gestión de residuos. La primera herramienta presenta muchos requerimientos de tipo social, soportado en la relación entre la generación de residuos y factores sociales, de acuerdo con los estudios realizados durante su desarrollo¹²⁹; por su parte, con la herramienta de valoración se puede determinar los impactos medioambiental, económico y social para cada escenario evaluado.

Es importante tener en cuenta que el módulo de predicción de residuos se utiliza porque en la mayoría de los casos que se desea evaluar son los escenarios de gestión futuros. Por ello incluye tantos factores sociales pues la generación de residuos tiene relación con el crecimiento de las poblaciones y otros factores. Con lo anterior se evidencia por estos resultados se ingresan en el módulo de valoración, para poder evaluar escenarios futuros.

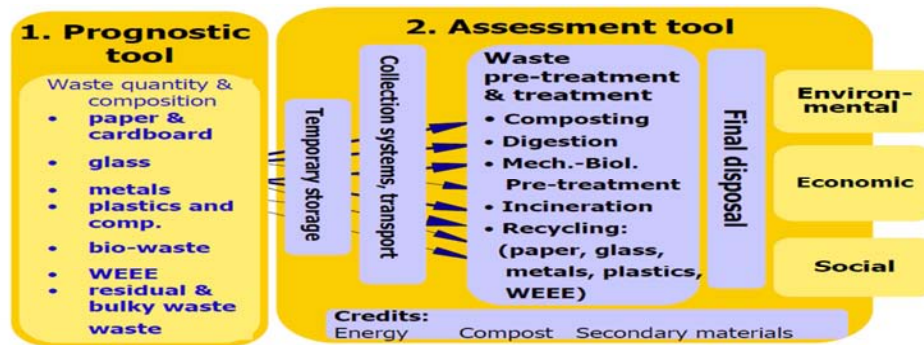
LCA-IWM contiene valores sugeridos y valores por defecto, los valores por defecto solo pueden ser modificados por usuarios expertos en los módulos correspondientes, que funciona en segundo plano de la herramienta y los sugeridos se usan en caso de no disponer de los valores propios¹³⁰. Estos valores sugeridos aparecen al arrastrar el cursor sobre la casilla donde se debe ingresar el dato. En la **Figura 8** se muestra la relación y composición de LCA-IWM¹³¹.

¹²⁹ Planificación y optimización de la gestión de residuos: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

¹³⁰ Ibid., Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

¹³¹ WASSERMANN, Gudrun; BEIGL, Peter; MENESES, Montse; DEN BOER, Jan. Life Cycle Assessment based Tools for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and regions with Rapid Growing Economies (LCA-IWM) [en línea]. Orleans, Marzo 2005. [Consultado 19 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.wastesolutions.org/fileadmin/user_upload/wastesolutions/S3P6_-_Montse_Menses.pdf

Figura 8. Relación y composición LCA-IWM



Fuente: WASSERMANN, Gudrun; BEIGL, Peter; MENESES, Montse; DEN BOER, Jan. Life Cycle Assessment based Tools for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and regions with Rapid Growing Economies (LCA-IWM) [en línea]. Orleans, Marzo 2005. [Consultado 19 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: [http://www.wastesolutions.org/fileadmin/user_upload/wastesolutions/S3P6 -_Montse_Menses.pdf](http://www.wastesolutions.org/fileadmin/user_upload/wastesolutions/S3P6_-_Montse_Menses.pdf)

De acuerdo con Boer¹³², a continuación se presenta las características de los módulos del LCA-IWM:

- **Módulo de Predicción:** permite la estimación de las futuras cantidades de residuos generados sobre la base de una cantidad limitada de parámetros de entrada tales como cantidad actual y composición de los residuos domésticos, predicciones de algunos indicadores socioeconómicos generales por una parte y datos históricos de estos factores por otra.

En esta herramienta se consideran los tipos de residuos sólidos municipales generados que se exponen en el **Cuadro 15**

¹³²Planificación y optimización de la gestión de residuos : Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Op. cit., Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Cuadro 15. Tipos de residuos sólidos municipales considerados

Grupos según el material	Tipos de residuos considerados
Reciclables	Papel y cartón Vidrio Metales Plásticos y compuestos
Residuos orgánicos	Biorresiduos Residuos de jardín
Residuos peligrosos	Residuos peligrosos Residuos de maquinaria eléctrica y electrónica (RAEE)
Otros materiales	Residuos mezclados ^a o desechos ^b Residuos voluminosos

a Por residuos mezclados se entiende un residuo doméstico o asimilable a doméstico recogido de un municipio donde no se lleva a cabo una recogida selectiva.

b los desechos están formados por aquellos residuos que quedan para la recogida tras la separación en origen de los reciclables

Fuente: DEN BOER, Emilia; DEN BOER, Jan; JAGER, Johannes. Planificación y optimización de la gestión de residuos [en línea]: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [Consultado 17 de Abril de 2013]. Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Para tener una visión más clara de cómo funciona este módulo de predicción de la generación de residuos, su procedimiento simplificado consiste en: introducción de los datos sobre la generación y composición actual de los residuos, suministrar los indicadores socioeconómicos del año en curso, introducción de tendencias socioeconómicas hasta el año de valoración, posteriormente se calcula la generación de residuos sólidos municipales sobre la base de los parámetros previstos del modelo, tan como lo afirma Den Boer et. al.¹³³

En el **Cuadro 16** se listan los requerimientos de información para el módulo de predicción para la gestión de todos los residuos, es decir, no es exclusivo para biorresiduos por lo cual habrá alguna información requerida que no aplica directamente con estos.

¹³³ Ibíd., Disponible en Internet: http://www.iwar.tudarmstadt.de/lcaiwmlca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Cuadro 16. Requerimientos de información para la herramienta de predicción

Requerimientos para la herramienta de predicción	
Información general	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de la ciudad - Nombre del país - Número de habitantes de la ciudad - Año de referencia - Año de valoración
Cantidades recogidas de residuos sólidos municipales (t/año)	<ul style="list-style-type: none"> - Residuos mezclados/residuos desecho <ul style="list-style-type: none"> - Papel y cartón - Vidrio - Metal - Plásticos y compuestos - Biorresiduos - Residuos de jardín - Residuos voluminosos (recogidos por separado) <ul style="list-style-type: none"> - Desechos peligrosos - Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
Composición de los desechos (%)	<ul style="list-style-type: none"> - Papel y cartón - Vidrio - Metales - Plásticos y compuestos - Residuos orgánicos - Residuos peligrosos
Composición de los residuos orgánicos dentro de los desechos (%)	<ul style="list-style-type: none"> - Biorresiduos - Residuos de jardín
Condiciones socioeconómicas reales (urbanos)	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de personas entre los 15 y los 59 años de la población total de la ciudad - Número medio de miembros en una vivienda - Tasa de mortalidad infantil urbana - Esperanza de vida urbana
Condiciones socioeconómicas reales (nacionales)	<ul style="list-style-type: none"> - Producto interno bruto per cápita - Tasa de mortalidad infantil - Porcentaje de personas que trabajan en la agricultura como porcentaje de la mano de obra de la ciudad
Tendencias socioeconómicas (urbanos y nacionales)	<ul style="list-style-type: none"> - Para cada una de las condiciones socioeconómicas anteriores se deben realizar las tendencias para el año que se desea valorar
Medidas de prevención de residuos a nivel	<ul style="list-style-type: none"> - Pegatinas de buzón (no correo basura) - Promoción de los servicios de reparación

Cuadro 16. (Continuación)

Requerimientos para la herramienta de predicción	
municipal (publicas)	<ul style="list-style-type: none"> - Promoción de productos reutilizables - Promoción de los servicios de alquiler - Promoción de los servicios de pañales - intensificación de las relaciones públicas - Promoción de haga-usted-mismo el compostaje
Medidas de prevención de residuos a nivel municipal (internas)	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto interno- material reutilizables - Decreto interno- uso de papel por ambas caras - Decreto interno- toallas reutilizables
Plan de recogida selectiva (%)	<ul style="list-style-type: none"> - Papel y cartón - Vidrio - Metales - Plásticos y compuestos - Residuos biodegradables - Residuos peligrosos - WEEE

Biorresiduos: residuos de cocina o apartamentos, como frutas y verduras, peladuras, sobras, plantas, tierra de maceta, etc. Y si no se recoge selectivamente también residuos de jardín.

Residuos de jardín: césped cortado, hierbas y plantas, hojas muertas, podas de árboles, etc.

Residuos orgánicos: biorresiduos y residuos de jardín

Instalación: hace referencia a las zonas de tratamiento de los residuos, es decir, plantas de manejo integral¹³⁴.

Las medidas de prevención municipal son basados en las normas Europeas, donde se planten los porcentajes de reducción de residuos con los que deben cumplir todos los países Europeos.

Herramienta de valoración: permite la planificación y la valoración de las estrategias de gestión de los residuos; es decir de las opciones tecnológicas para su gestión. Aquí se pueden crear y comparar hasta cuatros escenarios diferentes y dividir cada escenario hasta en 3 sectores, cada escenario cuenta con las entradas generales del usuario y consiste en tres subsistemas básicos de gestión de residuos¹³⁵:

- Almacenaje temporal
- Recogida y transporte
- Tratamiento, disposición y reciclado.

¹³⁴ Ibíd., Disponible en Internet: http://www.iwar.tudarmstadt.de/lcaiwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

¹³⁵ Ibíd., Disponible en Internet: http://www.iwar.tudarmstadt.de/lcaiwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Como se planteó en la **Figura 8**, los resultados de la herramienta de predicción de residuos son utilizados para la herramienta de valoración, pues el objetivo de esta herramienta como el de muchas es la evaluación de escenarios de gestión futuros, de igual manera, se puede ingresar la composición de los residuos que se desea estudiar, dicho esto, los requerimientos de información se muestran en el **Cuadro 17**.

Como ya se mencionó esta herramienta realiza no solo evaluación medioambiental, sino también social y económica por ello si se desea hacer estas valoraciones se va a requerir información de este tipo; el objetivo de este proyecto se enmarca solo en la evaluación medioambiental, sin descartar que las otras valoraciones puedan ser un valor agregado a la hora de aplicar el LCA-IWM

Cuadro 17. Requerimientos de información para la valoración medioambiental

Requerimientos medioambientales	
Entradas generales	<ul style="list-style-type: none"> - Número de habitantes del país - Número de habitantes de la ciudad - Número de viviendas - Área (km²) - Precipitación anual (mm/año) - Temperatura promedio de la ciudad (C°)
Almacenamiento temporal	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de residuos recogidos actualmente - Cantidad de residuos que se recogerá selectivamente - Detalles de los contenedores y sacos
Recogida	<ul style="list-style-type: none"> - Distancia media desde el garaje hasta el sector de recogida - Distancia media de la estación de transferencia al sector de recogida - Distancia de la estación de transferencia al garaje - Distancia desde la estación a la instalación - Distancia desde el sector a la instalación
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de diseño de los vehículos - Capacidad por fracción (% de la capacidad de diseño) - Consumo de diesel por 100km - Consumo de diesel mientras se carga(mientras está quieto) - Consumo de diesel entre recogidas (<100m) - Número de recolectores por tripulación - Distancia media entre dos contenedores - Velocidad media entre dos contenedores - Promedio de la capacidad de vehículo que no es

Cuadro 17. (Continuación)

Requerimientos medioambientales	
	<ul style="list-style-type: none">utilizada- Velocidad media entre sector y estación de transferencia- Velocidad media entre estación de transferencia y relleno sanitario- Tiempo promedio para la descarga y espera en el relleno sanitario o la estación de transferencia.- Tiempo promedio de operación usado por vehículo(días en el año y horas en el día)- Tiempo de operación máximo por tripulación de vehículo
Disposición final	<ul style="list-style-type: none">- Total de residuos vertidos en el área de estudio (t/año)- Total de residuos dispuestos procedentes de áreas vecinas (t/año)- Capacidad de diseño del relleno sanitario (t/año)- Tiempo de operación previsto para la celda del relleno (años)

En párrafos anteriores ya se planteó el hecho que esta herramienta es desarrollada para un contexto europeo, al cual lo rigen diferentes normas que tienen como objetivo la disminución de los residuos sólidos vertidos en rellenos sanitarios, en consecuencia la herramienta requiere la composición de los residuos sólidos para el año 1995 y así evaluar la disminución del vertido de residuos biodegradables en rellenos sanitarios. Bajo este mismo contexto, la herramienta de predicción requiere información sobre medidas de prevención de residuos a nivel municipal e internas. Es válido aclarar que estos estimados de separación no son obligatorios, es decir, la herramienta esta en toda la capacidad de evaluar un escenario sin aprovechamiento. En caso de evaluar el aprovechamiento, esto se realiza en base a la normatividad europea por lo que la composición de los residuos para el año 1995 será obligatoria.

La herramienta permite hacer la diferencia entre el tipo de vehículos para el transporte, pues están los de recogida y los del transporte a la estación de transferencia y plantas de manejo integral (PMI). El requerimiento de las velocidades y distancia entre los contenedores se hace teniendo en cuenta que la herramienta cuenta con la opción de recogida selectiva.

Algunos de los requerimientos de información hacen referencia a los sistemas de tratamiento de los residuos o a una recolección selectiva, para el caso de este estudio el escenario que se desea evaluar es la recolección de los residuos mezclados y la disposición final en relleno sanitario. Esta posibilidad y sus requerimientos de información serán útiles para estudios cuyo objetivo es

evaluar diferentes escenarios en los cuales se realice algún tipo de tratamiento a los residuos.

Cuando se ingresan los parámetros de disposición final, el modelo solicita indicar si se desea utilizar los gases generados por el relleno sanitario para la producción de energía, o si es posible recuperar (vender) el calor generados por estos gases. De igual manera solicita que se indique si los lixiviados se deben tratar antes de su vertido. Es decir, para estos 3 requerimientos de información sólo se le indica al modelo sí o no, según sea el caso.

Las opciones de tratamiento que se pueden modelar en la herramienta son las siguientes¹³⁶:

- Compostaje de la materia orgánica recogida selectivamente
- Digestión de la materia orgánica recogida selectivamente
- Pre tratamiento mecánico biológico (PMB) aeróbico y anaeróbico de los residuos mixtos/desecho
- Incineración con recuperación de energía de los residuos mixtos/desecho.
- Vertido de los residuos mixtos/desecho
- Reciclado de materiales recogidos selectivamente.

Los biorresiduos y los residuos de jardín se pueden tratar en plantas de compostaje y digestión anaeróbica.

A continuación en los **Cuadros 18, 19, 20, 21, 22 y 23** se exponen los valores por defecto que incorpora la herramienta de valoración medioambiental, no se incluye los valores relacionados con la normativa Europea, pues el enfoque de estos valores es evaluar el cumplimiento de la normativa europea para los residuos sólidos municipales lo cual no es de interés para el contexto planteado.

¹³⁶

Ibíd.,

Disponible

en

Internet:

http://www.iwar.tudarmstadt.de/lcaiwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Cuadro 18. Características por defecto de las fracciones de desecho

Composición	Biorresiduos	Residuos de jardín
MS (%)	45	43
MOS (%MS)	87	84
MOS bio (%MOS)	100	100
C (%MOS)	51	50
C biogénico (%C)	100	100
H (%MOS)	6.2	7.9
O (%MOS)	44	32
N (%MOS)	0.5	0.0
Cl (%ODM)	0.1	0.7
S (%ODM)	0.1	0.0

MS= materia seca=DM

MOS= materia orgánica seca

MOS bio= materia orgánica seca degradable biológicamente

Fuente: DEN BOER et al. Planificación y optimización de la gestión de residuos [en línea]: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 17 de Abril de 2013]. Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Cuadro 19. Contenido de metales pesados de las fracciones

Metales pesados(mg/kgDM)	Biorresiduos	Residuos de jardín
As	30	30
Cd	1	1
Cr	55	55
Cu	153	153
Hg	0.5	0.5
Ni	28	28
Pb	90	90
Zn	500	500

DM: Materia seca

Fuente: DEN BOER et al. Planificación y optimización de la gestión de residuos [en línea]: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 17 de Abril de 2013]. Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp

Cuadro 20. Valores por defecto de consumo de diésel para diferentes etapas de recolección y transporte.

Vehículo	Consumo de Diesel		
	Carga (l/hora)	Entre contenedores (l/hora)	Transporte (l/100 km)
Vehículo de recolección estándar	1.3	8.5	27
Vehículo de recolección alternativo	1.3	8.5	30
Vehículo estándar con dos ejes			27
Vehículo de transporte con tráiler			40
Vehículo alternativo			30
Todos los desechos, transporte de material secundario			32

Fuente: DEN BOER et al. Deliverable Report on D3.1 and 3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3) [en línea] Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 5 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.eukn.org%2Fdsresource%3Fobjectid%3D147430%26type%3Dorg&ei=dWwfU7TVONGMkAeBu4EQ&usg=AFQjCNHTr_pA7_1YP7LGbn7hggvxyf7Zxg&bvm=bv.62788935,d.eW0&cad=rja

Cuadro 21. Contenido de contaminantes en gas de relleno sanitario

Contaminante	Valor por defecto (mg/m ³)
1,1,1- Tricloroetano	6,1E+00
1,1-Dicloroetano	2,5E+01
1,2-Dicloroetano	5,0E-01
Benceno	5,8E+00
Butano	1,2E+01
Cadmio	5,6E-03
Tetraclorometano	3,0E-01
Cloro (Cl total)	6,5E+01
Clorobenceno	1,0E-01
Cloruro de Etilo	1,3E+02
Triclorometano	5,5E+00

Cuadro 21. (Continuación)

Contaminante	Valor por defecto (mg/m ³)
Cromo	6,6E-04
Diclorometano	4,2E+01
Diclorodifluorometano (CFC-12)	5,1E+01
Etano	2,4E+01
Etilbenceno	6,9E+01
Fluorotriclorometano(CFC-12)	1,0E+01
F- tot	1,3E+01
Hexano	7,1E+00
Sulfuro de hidrogeno	2,0E+02
Mercurio	4,1E-05
Plomo	5,1E-03
Policlorobifenilos (PCB)	1,6E-03
Pentano	6,0E+00
Propano	5,0E+00
Tetracloroetileno	4,1E+01
Tolueno	2,0E+02
Isómeros de xileno	4,0E+01
Tricloroetileno	5,6E+01
Cloruro de vinilo	2,0E+01

Fuente: DEN BOER et al. Deliverable Report on D3.1 and 3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3) [en línea] Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 5 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.eukn.org%2Fdsresource%3Fobjectid%3D147430%26type%3Dorg&ei=dWwfU7TVONGMkAeBu4EQ&usq=AFQjCNHTr_pA7_1YP7LGbn7hggvxyf7Zxq&bvm=bv.62788935,d.eW0&cad=rja

Cuadro 22. Valores por defecto para la composición del lixiviado durante la operación del relleno/sector (fase A), después de clausurar el relleno/sector (B), 20 años después de clausurado el relleno/sector (C).

Compuesto	A (mg/l)	B (mg/l)	Tasa de reducción de contaminante en 20 años después de la clausura	C (mg/l)
pH	7,4	7,6		
DBO₅	1529	275	75%	69
COD₅	3147	1585	75%	396
Amonio	502	555	25%	416
Nitrato (NO₃⁻)	5,6	12	50%	6

Cuadro 22. (Continuación)

Compuesto	A (mg/l)	B (mg/l)	Tasa de reducción de contaminante en 20 años después de la clausura	C (mg/l)
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0,34	0,50	50%	0,3
Hidrocarburos halogenados (AOX)	2,3	1,5	75%	0,4
Cloruros	1717	1760	50%	880
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	122	93	50%	46
Sulfuros (HS ⁻)	5,8	2,0	50%	1
Sodio	970	905	75%	452
Potasio	1065	965	75%	347
Magnesio	247	145	75%	72
Hierro	32,5	9,9	75%	2,5
Arsénico	0,02	0,04	75%	0,01
Cadmio	0,01	0,00	75%	0,00
Cromo	0,19	0,16	75%	0,04
Cobre	0,39	0,06	75%	0,00
Niquel	0,18	0,14	75%	0,00
Plomo	0,11	0,07	75%	0,03
Zinc	1,3	0,53	75%	0,01

Fuente: DEN BOER et al. Deliverable Report on D3.1 and 3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3) [en línea] Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 5 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.eukn.org%2Fdsresource%3Fobjectid%3D147430%26type%3Dorg&ei=dWwfU7TVONGMkAeBu4EQ&usq=AFQjCNHTr_pA7_1YP7LGbn7hggvxyf7Zxg&bvm=bv.62788935,d.eW0&cad=rja.

Cuadro 23. Demanda de energía para el relleno sanitario

Energía/proceso	Valor	Unidad
Electricidad demanda por relleno sanitario	2	kWh / t residuo
Electricidad demanda para la recolección del gas	0,15	kWh / m ³ LG
Electricidad demanda para el tratamiento de lixiviados	22	kWh / m ³ lixiviado
Consumo de diesel	1	L / t residuo

Fuente: DEN BOER et al. Deliverable Report on D3.1 and 3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3) [en línea] Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 5 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.eukn.org%2Fdsresource%3Fobjectid%3D147430%26type%3Dorg&ei=dWwfU7TVONGMkAeBu4EQ&usg=AFQjCNHTr_pA7_1YP7LGbn7hggvxyf7Zxg&bvm=bv.62788935,d.eW0&cad=rja

Para realizar el inventario de electricidad y calor, usa la base de datos Ecoinvent 2000-2003 para cada país europeo.

7.6.2 De acuerdo con TEAM 4.0. Es claro que el LCA-IWM no es la única herramienta en la cual se puede realizar el modelado del ACV para la gestión de residuos sólidos, Güereca ¹³⁷ plantea los requerimientos para la implementación del ACV para la gestión de los residuos sólidos en Cataluña, por medio de la herramienta TEAM 4.0 (véase cuadro 24).

¹³⁷ Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Op. cit.

Cuadro 24. Requerimientos de información encontrados para TEAM 4.0

Requerimiento de información	Fuente
Cantidad y composición de residuos recogidos	Real
Requerimiento energético por tonelada recolectada, es decir, cantidad de combustible gastado por tonelada de residuo.	Estimado en base a los datos de otra ciudad
Energía eléctrica utilizada por tonelada compactada en la estación de transferencia (Wh/t)	Real
Generación de líquido de compactación por tonelada comprimida	Literatura
Consumo de energía para la depuración del líquido generado en la estación de transferencia	Literatura
Energía requerida para el transporte de la estación de transferencia al sitio de disposición final	Estimado por variables asumidos
Requerimientos de energía por concepto de uso de maquinaria de trabajo (MJ de diésel / tonelada de residuo)	Literatura
Arcilla requerida para la cobertura (arcilla/t)	Literatura
Producción de lixiviados (l/t depositada)	Literatura
Energía gastada en la recolección de lixiviado (kWh/m ³)	Literatura
Composición de lixiviados en vertedero	Literatura
Tasa de generación de biogás	Literatura
Eficiencia de recolección del biogás	Literatura
Eficiencia de recuperación de energía utilizada (kWh/m ³)	Literatura
Composición del biogás producido en vertederos (g/m ³)	Literatura
Emisiones generadas por motores de energía eléctrica (g/m ³)	Literatura
Emisiones al aire por tratamiento de biogás mediante antorchas	Literatura

En el estudio reportado se utilizó la versión 4.0 de TEAM, la metodología CML y la base de datos DEM, asociada a esta herramienta. De dicha base de datos se consideraron los siguientes procesos industriales¹³⁸:

- Producción de energía eléctrica de acuerdo al perfil de España
- Producción de gas natural
- Producción de diésel
- Producción de gasolina

¹³⁸ Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Capítulo 5.Op. cit., p.44.

- Producción de fertilizantes SuperFosfato (para compensar impactos por producción de compost)
- Producción de planchas de aluminio (para compensar impactos por reciclaje de aluminio)
- Producción de hojalata (para compensar impactos por producción de materiales férricos)
- Producción de papel Kraft blanqueado (para compensar impactos por reciclajes de papel y cartón)
- Producción de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) (para compensar impactos de reciclaje de PEAD)
- Producción de Polietileno de Baja Densidad (para compensar impactos por reciclaje de PEBD)
- Producción de vidrio blanco (para compensar impactos por reciclaje de vidrio)
- Producción de fibras acrílicas (para compensar impactos por reciclaje de textiles)

Con la revisión realizada de los requerimientos de información para la implementación del ACV, es evidente que se debe tener suma cautela con el manejo de los datos y supuestos, pues son la clave para obtener resultados confiables, Christensen ¹³⁹ afirma que los supuestos claves, variaciones e incertidumbre para la aplicación de ACV en la gestión de residuos sólidos son las siguientes:

- Composición de los residuos
- Tipo de sustitución de energía, marginal o media
- Datos externos en el reciclaje de materiales secundarios
- Efectos de cascada: grado en que debemos ir en la inclusión de consecuencias externas
- Falta de transparencia en los supuestos y en los datos agregados
- El “time windows”, se está modelando sistemas de gestión de futuro con datos del pasado.
- Incertidumbre de parámetros
- Criterios para la asignación de los impactos del calentamiento global a las emisiones de carbono y almacenamiento de carbono

Este último aspecto, está basado en que uno de los principales objetivos de la aplicación del ACV es para apoyo en la toma de decisiones, por ello en la mayoría de los casos lo que se modelan son escenarios futuros, para así poder analizar cuál de los escenarios planteados es el óptimo para las condiciones del contexto en el que se desarrolló la modelación.

¹³⁹ CHRISTENSEN, Thomas. LCA-modeling in waste management: Key assumptions, variations and uncertainties [en línea]. International Solid Waste Association (ISWA), 2009 [consultado 30 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/wte09-08.pdf

La *European Commission*¹⁴⁰ afirma que la influencia de la zona climática sobre el desempeño ambiental comúnmente no se modela en bases de datos, por lo que no se aplica por los practicantes de ACV. No obstante cuando este parámetro desempeñe un papel importante, se debe tener en cuenta en el modelado y cálculos. Otro factor que se debe tener en cuenta solo si es relevante para el estudio es la disponibilidad de agua, pues puede variar en gran medida en cada región.

El clima juega un papel importante en la frecuencia de recogida. Dependiendo de la temperatura y/o humedad, la frecuencia de recolección de los biorresiduos se ajusta para evitar malos olores o problemas de higiene en los contenedores de recolección. También puede influenciar en el tratamiento de los residuos que requieren una cierta temperatura de trabajo. Este tema se debe manejar cuidadosamente con los biorresiduos. A razón de esto en la herramienta LCA-IWM uno de los requerimientos de información es la temperatura media y la precipitación anual.

WEGENER¹⁴¹ concluye que las características ambientales específicas en las que las que tiene lugar las emisiones generalmente no se contabilizan en los factores de caracterización del ACV.

A pesar de todos los requerimientos de información y de la complejidad de la aplicación del ACV relacionado con la obtención de dicha información, existen diversas fuentes bibliográficas y bases de datos para apoyar la carencia de información, por ello la metodología ACV es aplicable para el contexto de estudio planteado, teniendo en cuenta las mejoras que se plantean a continuación.

¹⁴⁰ EUROPEAN COMMISSIONS-JOINT RESEARCH CENTRE- INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. Supporting Environmentally Sound Decisions for Waste Management [en línea]. Luxembourg, 2011 [consultado 30 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ReqNo-JRC65850-LB-NA-24916-EN-N.pdf>

¹⁴¹ LCA in a global perspective: a basic for spatially differentiated environmental life cycle assessment. Op. cit. p 128.

7.7 PLANTEAMIENTO DE NECESIDADES DE MEJORAMIENTO PARA LA APLICABILIDAD DEL ACV

A lo largo de esta investigación se confirmó la aplicabilidad del ACV para la cuantificación de los impactos ambientales generados por la gestión actual de los biorresiduos, en este proceso de evaluación de la aplicabilidad se identificaron necesidades de mejoramiento para la aplicabilidad de esta metodología, las cuales se analizan por fases y se plantean a continuación:

7.7.1 Fase 1: Objetivo y alcance. Para el desarrollo del objetivo de este proyecto no se planteó ninguna necesidad de mejoramiento.

7.7.2 Fase 2: AICV. Para la herramienta informática a utilizar, es importante revisar la información alimentada por defecto, y gestionar las posibilidades de modificación de aquella que se identifique como necesaria para contextualizar el estudio. En cuanto a esto, en el desarrollo de este proyecto no se encontró evidencias que las herramientas evaluadas permitieran estas modificaciones; sin embargo, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada esta acción es posible en el EASETECH.

En relación con los requerimientos de la metodología, es importante considerar el levantamiento de información primaria de aspectos que relacionan con las características propias del contexto de generación, y que para el caso de la herramienta estudiada, LCA-IWM, corresponden a valores por defecto, éstos son:

- Características de las de los biorresiduos (véase cuadro 18).
- Contenido de metales pesados de las fracciones (véase cuadro 19)
- Valores de consumo de diesel para diferentes etapas de recolección y transporte (véase cuadro 20)
- Contenido de contaminantes en el biogás generado por el relleno sanitario (véase cuadro 21)
- Características de los lixiviados, para este proyecto se enmarca en su composición durante la operación y después de clausurar el relleno/sector (véase cuadro 22)

7.7.3 Fase 3: EICV

- Para este proyecto se seleccionó la metodología CML, por ello se recomienda implementar su última versión 2013, y así incluir todas las mejoras realizadas a la metodología.
- Evaluar y seleccionar los factores de caracterización para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, ya que éstos no están disponibles para esta región.
- Es necesario evaluar la influencia del clima y la disponibilidad de agua para la gestión de los biorresiduos en nuestro contexto

7.7.4 Fase 4: Interpretación. Como se planteó en el ítem 3.3, aunque el objetivo y alcance de este proyecto no plantea directamente la necesidad de implementar la fase de normalización, puede ser conveniente evaluar como opción de mejoramiento, la incorporación de esta fase en tanto que permitirá comparar entre sí los resultados para las categorías de impacto evaluadas, mejorando la interpretación de los resultados.

8 CONCLUSIONES

La metodología ACV ha sido ampliamente desarrollada en los últimos años, recibiendo grandes contribuciones de organizaciones internacionales como la SETAC y la ISO. De la mano con el desarrollo de la tecnología, se desarrollaron diversas herramientas informáticas para la implementación de AICV y EICV, así como metodologías de cálculo y bases de datos. Algunas herramientas informáticas son generales para los ACV de productos y servicios como es el caso de Simapro, y otras son específicas para el ACV en la gestión de los residuos sólidos, tales como: LCA-IWM, IWM2, EASETECH, MSW-DST entre otras.

Para la implementación del ACV se sugiere apoyarse en una herramienta informática y una base de datos, pues los requerimientos de información son numerosos, razón por la cual casi todas las herramientas están ligadas a una base de datos. Aún con el uso de bases de datos, se requiere información propia del contexto de estudio, la cual también puede ser dispendiosa por la cantidad de la misma y la calidad que debe tener.

Con lo dicho anteriormente y lo evidenciado en la etapa de análisis y resultados, aunque los requerimientos de información para alimentar las diferentes herramientas pueden variar de una a otra, en su mayoría son los mismos. Los datos necesarios para alimentar estas herramientas son numerosos. Se requiere de diversas investigaciones para la obtención primaria de los datos requeridos y de la participación de las entidades involucradas en el proceso de gestión de residuos, para tener acceso a la información existente.

Se evidenció que el mayor desarrollo de las metodologías de evaluación y en general la aplicación del ACV para la gestión de residuos se encuentra en Europa, el motivo de esto es la disponibilidad de información, complementada con el desarrollo de bases de datos robustas con información relacionada con su contexto, derivados de estudios rigurosos.

Para el caso de su aplicación en la ciudad de Cali, que pertenece al contexto latinoamericano, aunque se pueden utilizar las metodologías con factores de caracterización globales para las categorías de impactos seleccionadas, excepto oxidación fotoquímica (véase Cuadro 14), no se debe perder de vista que la calidad de los resultados depende de la calidad de los datos ingresados, no obstante se debe evaluar la influencia de factores como el clima y la disposición de agua que comúnmente no se modela en las bases de datos y la posibilidad de obtención de factores de caracterización regionales aplicables para la categoría de oxidación fotoquímica.

No obstante la opción de mejoramiento planteada para la fase de interpretación que puede permitir una mayor comprensión de los resultados de la valoración de los impactos ambientales cuantificados, no se evidenció la necesidad e incorporar esta fase para el objetivo del proyecto que se centra en la cuantificación de los impactos ambientales. Del análisis realizado a esta fase se concluye que su implementación puede ser útil en proyectos o estudios cuyo fin sea evaluar opciones tecnológicas de gestión de biorresiduos, como soporte para toma de decisiones. Si este es el caso, debe ponerse atención especial en la elección de las emisiones de referencia a utilizar, o plantear la posibilidad de estimar dichas emisiones para el contexto a evaluar.

La obtención de los requerimientos de información se realizó con base en LCA-IWM, que fue desarrollada especialmente para Europa, por lo que muchos parámetros se ven sesgados para este escenario, además la herramienta no permite hacer el cambio de los valores por defecto con facilidad, se requiere ser un experto para ello, el manual no hace claridad de lo que esto significa.

En este estudio se evaluó la herramienta Simapro¹⁴², la cual es la más utilizada en el mundo para estudios de ACV, reconocida por la profesionalidad, flexibilidad y fiabilidad de sus resultados; sin embargo, no fue posible evidenciar claramente su aplicación en la evaluación de la gestión de residuos sólidos, reportada por autores como Bovea et al.¹⁴³, quienes lo implementaron para la evaluación de estrategias alternativas para la gestión de residuos sólidos urbanos. Esto pudo deberse a la falta de entrenamiento especializado de la herramienta, razón por la cual debe considerarse este aspecto en fases posteriores de este estudio.

El EASETECH, es una herramienta específica para la gestión de residuos sólidos. Como lo menciona Hansen¹⁴⁴, esta herramienta tiene en cuenta el impacto ambiental de los residuos desde la generación, recolección, tratamiento y disposición, incluyendo un sub-modelo para la evaluación de los impactos ambientales de la tierra por la aplicación de residuos orgánicos tratados; el cual a pesar de tener datos por defecto, permite introducir datos para diferentes condiciones. Se mencionó que la metodología CML tuvo unas actualizaciones en el año 2013, las cuales están implementadas en la herramienta. A pesar de no ser de uso libre, esta herramienta se recomienda para la implementación del ACV en nuestro contexto, es específica para la gestión de residuos, tiene numerosos reportes en la bibliografía, implementa la última versión del CML, tiene asociada una base de datos y permite hasta cierto punto introducir datos para caracterizar el contexto a estudiar.

¹⁴² Simapro [en línea]. Reino unido: Simapro, 2014. [consultado 30 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.simapro.co.uk/>

¹⁴³ BOVEA, M.D et al. Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. *En: Waste Management*, 2010

¹⁴⁴

Así pues, es viable la implementación del ACV para la cuantificación de impactos generados por la gestión actual de los biorresiduos en la ciudad de Cali, la calidad o uso de los resultados de ésta dependerá de la calidad e información con la que se alimente la herramienta. Si lo que se desea es la aplicación de la metodología para la toma de decisiones y para analizar escenarios futuros, el EASETECH es un candidato viable para esto, para el se ofrecen cursos de entrenamiento especializado, donde se podrá profundizar más sobre muchos aspectos de la implementación de ACV en nuestro contexto, así se obtendrá un conocimiento y manejo profundo de la herramienta para poder sacar el mejor provecho de los resultados obtenidos.

A pesar de las limitaciones para la implementación del ACV, se confirma su aplicabilidad en la evaluación de los impactos ambientales de la gestión actual de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali; teniendo en cuenta que la implementación de las necesidades de mejoramiento planteadas puede llevar a considerar aspectos específicos del contexto, que pueden influenciar los resultados obtenidos.

9 RECOMENDACIONES

Implementar una estrategia efectiva para la obtención de información existente, a lo largo del desarrollo de este proyecto no fue posible tener acceso a esta.

Para este proyecto, considerando el objetivo y alcance, no se requiere implementar la fase optativa de normalización; sin embargo, para el desarrollo de las fases futuras del proyecto que tiene como fin la evaluación de los impactos ambientales de opciones tecnológicas de la gestión de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali, con fines de apoyar procesos de toma de decisión, se hará necesario evaluar la implementación de esta fase, en ese caso se recomienda profundizar la estimación de las emisiones de referencia, que como se mencionó anteriormente deben definirse para el contexto de aplicación, referido a la localización del proyecto, de ser así, la estimación de estas emisiones de referencia se debe acotar solo para aquellas sustancias relacionadas con los biorresiduos.

Se recomienda para proyectos futuros encaminados a la evaluación de impactos ambientales de opciones tecnológicas para la gestión de biorresiduos municipales, capacitarse en el uso de las herramientas informáticas, en especial EASETECH, considerando que su acceso se ve limitado por este factor.

Si se requiere o se desea implementar el enfoque de punto final se recomienda la implementación de la metodología ReCiPe, en lugar de la CML.

BIBLIOGRAFIA

ALCALDÍA DE SANTIAGO DE CALI. Cali en cifras 2011 [en línea]. Santiago de Cali, 2011. [Consultado 24 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: http://planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali_en_Cifras/Caliencifras2010.pdf

ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI, Departamento administrativo de planeación municipal. Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali-2006 [en línea]. Santiago de Cali, 2006. [Consultado 15 de Octubre de 2013]. Disponible en Internet: http://objetos.univalle.edu.co/files/Caracterizacion_residuos_solidos_residenciales_en_Santiago_Cali.pdf

ALTHAUS, Hans-Jörg; BAUER, Christian; DOKA, Gabor; DONES, Roberto; HISCHIER, Roland; HELLWEG, Stefanie; HUMBERT, Sébastien; KÖLLNER, Thomas; LOERINCIK, Yves; MARGNI, Manuele; NEMECEK, Thomas. Implementation of Life cycle Impact Assessment Methods. Data v2.0 (2007) [en línea]. Dübendorf, Diciembre de 2007. [Consultado 28 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/EcoinventImpactAssessmentMethods.pdf>

ALUNA CONSULTORES LIMITADA. Estudio nacional del reciclaje y los recicladores: caracterización del servicio de aseo en los municipios objeto de estudio [PDF]. Bogotá, Marzo 2011.

Analysis of existing Environmental impact Assessment methodologies for use in life cycle assessment [en línea]. Unión Europea: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010 [Consultado 06 Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>

Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14040:2006. Madrid,

Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida-Requisitos y directrices. Comité técnico AEN/CTN 150 gestión medioambiental. ISO 14044:2006. Madrid

BARE, Jane; HOFSTETTER, Patrick; PENNINGTON, David; UDO DE HAES, Helias. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary Midpoint versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits [en línea]. Brighthon: EPA, 2000 [consultado 15 de Mayo de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.clu-in.org/conf/tio/lcia/ijlca-midpt-endpt.pdf>

BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran y ROTH, Liselott. Application of LCA in Waste Management. En: Solid Waste Techonology & Management. vol. 1. Wiley: 2011.1050 P.

BOLDRIN, Alessio; NEIDEL, Trine Lund; DAMGAARD, Anders; BHANDER, Gurbakhash; MOLLER, Jacob; CHRISTENSEN, Thomas. Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. En: Waste management. Diciembre, 2011, n°3.

BOVEA, M.D; IBÁÑEZ-FORÉS, A.; GALLARDO, A.; COLOMER-MENDOZA, F.J. Environmental assessment of alternative municipal solid management strategies. A Spanish case study. En: Waste Management, 2010.

CHRISTENSEN, Thomas. Introduction to waste management . En: Solid Waste Techonology & Management. Wiley: 2011.

CHRISTENSEN, Thomas & MANFREDI, Simone. Landfilling: Reactor Landfills. En: Solid Waste Techonology & Management. vol. 2. Wiley: 2011. 779 p.

CHRISTENSEN, Thomas; SCHARFF, Heijo y HJELMAR, Ole. Landfilling: Concepts and Challenges. En: Solid Waste Techonology & Management. vol. 2. Wiley: 2011.

CHRISTENSEN, Thomas. LCA-modeling in waste management: Key assumptions, variations and uncetainties [en línea]. International Solid Waste Association (ISWA), 2009 [consultado 30 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/wte09-08.pdf

CHERUBINI, Francesco; BARGIGLI, Silvia y ULGIATI, Sergio. Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. En: Waste Management. Enero, 2008, no. 28.

CLEARY, Julian. Life cycle assessment of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. En: Environmental International. Agosto, 2009.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. Libro verde sobre la gestión de los biorresiduos en la Unión Europea [en línea]. Bruselas, 2008. [Consultado 1 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:ES:PDF>

CONTRALORIA GENERAL DE SANTIAGO DE CALI. Informe ejecutivo estado actual proyecto de disposición final de residuos sólidos en Yotoco EMSIRVA ESP. Santiago de Cali, Abril 2008.

DANE. Informe: Estimaciones de población 1985 - 2005 y proyecciones de población 2005 - 2020 total departamental por área. Disponible en Internet : <http://www.dane.gov.co/>

DEN BOER, Emilia; DEN BOER, Jan; JAGER, Johannes; RODRIGO, Julio; MENESES, Montse; CASTELLS, Francesc; SCHANNE, Lothar.. Deliverable Report on D3.1 and 3.2: Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3) [en línea] Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 5 de Enero de 2014].Disponible en Internet:

http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.eukn.org%2Fdsresource%3Fobjectid%3D147430%26type%3Dorg&ei=dWwfU7TVONGMkAeBu4EQ&usq=AFQjCNHTr_pA7_1YP7LGbn7hggvxyf7Zxg&bvm=bv.62788935,d.eW0&cad=rja

DEN BOER, Emilia; DEN BOER, Jan; JAGER, Johannes. Planificación y optimización de la gestión de residuos [en línea]: Manual para la predicción de los residuos municipales y la valoración de la sostenibilidad de los sistemas de gestión. Darmstadt: Universidad Técnica de Darmstadt, 2005. [consultado 17 de Abril de 2013]. Disponible en Internet: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/lca-iwm/lca_iwm/project_results/results/index.en.jsp.

DIAZ, R. y WARITH, M. Life-cycle assessment of municipal solid wastes: Development of the WASTED model. En: Waste Management. Septiembre, 2005, no 26.

DUQUE, Ramón y COLLAZOS Héctor. Residuos Sólidos. **Bogotá**: Funpirs, 1993. 150 P.

ESPINOZA, Pilar T; MARTÍNEZ, Evelyn; DAZA, Diego; SOULIER FAURE, Martín; TERRAZA, Horacio. Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010 [en línea]. Banco Interamericano de Desarrollo, 2010 [Consultado 05 de Enero de 2013]. Disponible en Internet: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36466973>

EUROPEAN COMMISSIONS-JOINT RESEARCH CENTRE- INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. Supporting Environmentally Sound Decisions for Waste Management [en línea]. Luxembourg, 2011 [consultado 30 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ReqNo-JRC65850-LB-NA-24916-EN-N.pdf>

FINNVEDEN, Göran; JOHANSSON, Jessica; LIND, Per; MOBERG, Åsa. Life Cycle Assessments of energy from Solid Waste Universidad de Estocolmo. Agosto de 2000, 1 archivo de computador.

GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. En: Revista de ingeniería. 2001, vol. 14.

GOEDKOOOP, Mark; HEIJUNGS, Reinout; HUIJBREGTS, Mark; SCHRYVER, An De; STRUIJS, Jaap; ZELM, Rosaline van. ReCiPe 2008 a life cycle impact assessment method wich comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. [en línea]: Report I: Characterisation. Holanda: PRé Consultants, 2009 [consultado 18 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: http://www.pre-sustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf

GÓMEZ, Rosa María; FILIGRANA, Paola Andrea; MÉNDEZ, Fabián. Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del botadero de Navarro [en línea], Cali, Colombia. Cali, Julio – Septiembre 2008. [Consultado 18 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.scielo.org.co/pdf/cm/v39n3/v39n3a6.pdf>.

GÜERECA, Leonor Patricia. Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Doctorado de ingeniería ambiental. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña. 2006.

GUINÉE, Jeroen B; GORRÉE, Marieke; HEIJUNGS, Reinout; HUPPES, Gjal; KONING, De Arjan; OERS, Laura van; SLEESWIJK Anneke Wegener; SUH, Sangwon; UDO DE HAES, Helias; BRUJIN, Hans de; DUIN, Robbert Van; HUIJBREGTS, Mark; LINDEIJER, Erwin; ROORDA, Aksel A.H.; VEN, Bernhard L. van der; WEIDEMA, Bo P. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. [en línea]. Dordrecht, 2002. [Consultado 26 de Noviembre de 2012]. Disponible en Internet: <http://www.isa.utl.pt/der/ASAmb/DocumentosAulas/Recipe/Handbook%20on%20Life%20Cycle%20Assessment.pdf>

HAUSCHILD, Michael y BARLAZ, Morton A. LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method. En: Solid Waste Technology & Management. Wiley: 2011. 1052 P.

HINCAPIÉ, Ingrid; ESTÉVEZ, Sandra y GIRALDO, Eugenio. Análisis y comportamiento de compuestos orgánicos volátiles OV en las emisiones del biogás proveniente del relleno sanitario de Doña Juana. [En línea]. Bogotá, s.f. [consultado 19 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/517/mi_937.pdf?sequence=1

HONG, Jinglan; LI, Xiangzhi y ZHAOJIE, Cui. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. En: Waste Management, 2010.

HUMBERT, Sébastien; SCHRYVER, An De; BENGEOA, Xavier; MARGNI, Manuele; JOLLIET, Olivier. IMPACT 2002+: User Guide [en línea]. Quantis Sustainability counts [Consultado 15 Junio de 2013]. Disponible en Internet: http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf

INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML) [en línea]. Nederlands: Universiteit Leiden [consultado 15 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

IPCC Inventory Software [en línea]. Bratislava: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. [Consultado 13 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/files/IPCCInventorySoftwareUserManualV2_1.pdf

JUÁREZ, C.; GÜERECA, L.; GASSÓ, S. Análisis del ciclo de vida del sistema de gestión de residuos municipales de la ciudad de México [en línea] México,

2008.[Consultado 28 de Enero de 2013]. Disponible en Internet: <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/14195/1/Gasso.pdf>

Landfill Carbon Storage in EPA's Waste Reduction Model [en línea]: subtítulo. Ciudad: nombre de la empresa o persona dueña de la página, año de publicación del documento o actualización de la página [consultado 04 de octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://epa.gov/epawaste/conservation/tools/warm/pdfs/landfill-carbon-storage-in-warm10-28-10.pdf>.

LAURENT, A.; CLAVREUL, J.; BAKAS, I.; BERNSTAD, A.; NIERO, M.; GENTIL, E.; HAUSCHILD, M.Z.; CHRISTENSEN, T.H. A CRITICAL REVIEW OF LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEMS [PDF]. Dinamarca: 2013.

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) [en línea]. LC-IMPACT [consultado 05 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.lc-impact.eu/life-cycle-impact-assessment-lcia>

MANFREDI, Simone; CHRISTENSEN, Thomas. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. En: Waste Management. Abril, 2008, vol. 29.

MCDUGALL, Forbes; WHITE, Peter; FRANKE, Marina; HINDLE, Peter. Integrated solid waste management: a Lyfe Cycle Inventory. 2 ed. Blackwell Science, 2001.

MÉNDEZ, María Guadalupe Gómez. Aplicación de técnicas de ciclo de vida al diseño de un sistema de gestión de residuos urbanos para la ciudad de Chihuahua. Tesis doctoral. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili. Facultad de ingeniería química, 2009.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Política para la gestión integral de residuos. Santafé de Bogotá, 1997.

PONSIOEN, Tommie. PRÉ CONSULTANTS. What's new in SimaPro 8? [En línea]. Estados Unidos, 2013 [Consultado 04 de Diciembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/news-whats-new-in-simapro-8>.

Rellenos sanitarios, Guía ambiental [en línea]. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, 2002 [consultado 15 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/Rellenos_Sanitarios.pdf

ROMERO, Blanca Iris. El análisis de ciclo de vida y la gestión ambiental [en línea]. México, Julio de 2003 [Consultado 05 de Febrero de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/tend.pdf>.

Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. Ozono troposférico [en línea] Montreal: Comisión para la cooperación ambiental [Consultado 23 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>

Simapro7. Norte América: PRé Consultants [consultado 15 de Junio de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software>

SUPERINTENDENCIA PÚBLICA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS. Listado de sistemas de disposición final de residuos sólidos por municipio [EXCEL]. Santiago de Cali, 2011-2012.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS (SSPD). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia – Diagnóstico 2011 [en línea]. Bogotá D.C, 2011[Consultado 15 de Noviembre de 2012]. Disponible en Internet: http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=eef29b3e-9d73-4adb-8fdd-1e526981c01c&groupId=10122

TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994. 607 P.

TEAM 5.1 [en línea]. Francia: Price Wáter House Coopers [consultado 18 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://ecobilan.pwc.fr/en/boite-a-outils/team.ihtml>

TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK (DTU). Easetech [en línea]. Dinamarca [Consultado 26 de Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.easetech.dk/>

THORNELOE, Susan A.; WEITZ, Keith; JAMBECK, Jenna. Application of the US decision support tool for materials and waste management. En: Waste Management. Abril, 2007, vol. 27.

VALENCIA, V.; AGUDELO, J.; RESTREPO, I.; CAJIGAS, A. Evaluación del tratamiento fisicoquímico de lixiviados parcialmente estabilizados, estudio de caso: vertedero de Navarro [en línea]. Cali, Noviembre de 2007. [Consultado 17 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/108.pdf>

WASSERMANN, Gudrun; BEIGL, Peter; MENESES, Montse; DEN BOER, Jan. Life Cycle Assessment based Tools for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and regions with Rapid Growing Economies (LCA-IWM) [en línea]. Orleans, Marzo de 2005. [Consultado 19 de Enero de 2014]. Disponible en Internet: [http://www.wastesolutions.org/fileadmin/user_upload/wastesolutions/S3P6 -
_Montse Menses.pdf](http://www.wastesolutions.org/fileadmin/user_upload/wastesolutions/S3P6_-_Montse_Menses.pdf).

WEGENER, Anneke. Regional LCA in a global perspective: a basis for spatially differentiated environmental life cycle assessment. Tesis doctoral. Netherlands: Universiteit Leiden. 2010.

YOSHIDA, Hiroko; GABLE, Joshua J. y PARK, Jae K. Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction. En: Resources, Conservation and Recycling, 2011

ZAMAN, A. U. Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method [en línea]. Suecia, 2010. [consultado 09 de Agosto de 2013] . Disponible en Internet: [http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-
Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf](http://peopleforcleanmountains.org/wp-content/uploads/2013/04/Study-of-MSW-Technology-Using-Life-Cycle-Analysis.pdf)

ZAPATA, Andres. Un Método de Gestión Ambiental de Lixiviados Mediante una Biobarrera Secuencial. Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio ambiente, 2012.

ZHAO, Yan; CHRISTENSEN, Thomas; LU, Wenjing; WU, Huayong; WANG, Hongtao. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City, China. En: Waste management. Diciembre, 2011, no. 31.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras tomadas en los lados de las manzanas seleccionados

Numero de lado	Barrio	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)	C/N*
031	Poblado Segunda Etapa	53,58	2,45	2,35	11,62	N.D.	26
045	Laureano Gómez	39,63	3,25	1,15	22,26	N.D.	40
051	S. A. Los Chorros	41,25	5,43	1,26	50,52	N.D.	38
039	Petecuy Segunda Etapa	41,01	5,45	1,34	25,84	N.D.	36
069	Siete de Agosto	44,50	6,61	1,41	32,71	0,14	37
076	Petecuy Tercera Etapa	33,70	5,03	1,19	29,13	0,13	33
008	Los Andes	54,21	4,46	2,29	21,41	N.D.	27
050	Nápoles	33,18	4,35	1,86	29,60	N.D.	21
068	Alf. López Segunda Etapa	37,88	5,65	1,68	27,43	0,15	26
047	El Caney	29,72	5,77	0,55	31,56	N.D.	63
071	Urb. La Merced	41,10	10,56	1,70	26,10	0,15	28
074	Vipasa	19,72	4,38	1,05	30,22	0,16	22
049	El Caney	49,88	4,25	0,63	11,00	N.D.	92
052	San Joaquín	47,80	4,26	1,20	22,44	N.D.	46
073	Urb. La Flora	32,03	4,90	1,70	29,68	0,12	22
054	Santa Teresita	43,38	5,58	0,72	30,64	N.D.	70
056	Ciudad Jardín	33,18	4,35	1,86	29,60	N.D.	21
057	El Ingenio	43,99	5,76	1,57	15,73	N.D.	33

Numero de lado	Humedad total %	Cenizas %	Material volátil %	Carbono fijo %	Poder calorífico (kcal/kg)**	pH
031	75,54	30,00	67,27	2,73	887	6,65
045	62,76	33,71	53,47	12,82	1.261	9,69
051	66,1	1,25	81,78	16,97	1.216	6,24
039	78,48	26,36	55,51	18,13	1.124	9,69
069	74,85	14,63	71,18	14,19	1.007	9,56
076	71,1	3082	59,92	9,26	909	9,48
008	81,42	17,64	79,12	3,24	807	9,36
050	74,78	31,01	72,86	10,1	912	7,77
068	67,52	27,21	63,87	8,92	1.015	8,12
047	56,92	32,39	53,34	14,27	1.117	5,82
071	74,13	20,39	70,76	8,85	1.238	7,58

074	73,62	44,55	62,35	7,26	877	8,61
049	75,24	34,25	60,26	5,49	431	6,87
052	67,75	24,31	55,57	20,12	1.324	8,92
073	68,72	31,57	60,91	7,52	889	8,35
054	76,68	19,68	62,45	17,87	1.078	6,77
056	64,40	31,01	52,35	16,64	1.590	8,45
057	62,78	32,95	51,68	15,37	1.332	8,74

N.D: No detectado

* Estimada a partir de los resultados de C y N

** Base Húmeda

Fuente: ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI, Departamento administrativo de planeación municipal. Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali-2006 [en línea]. Santiago de Cali, 2006. [Consultado 15 de Octubre de 2013]. Disponible en Internet: http://objetos.univalle.edu.co/files/Caracterizacion_residuos_solidos_residenciales_en_Santiago_Cali.pdf