



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Civil
Facultad de Biología
Facultad de Ingeniería Química

Trabajo de tesis

“Caracterización y biodegradación de los residuos lignocelulósicos domésticos”

Como requisito para obtener el título profesional de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta

Karla Peña Contreras
Ingeniera Bioquímica

Asesor

Dra. Liliana Márquez
Benavides

Co-asesor

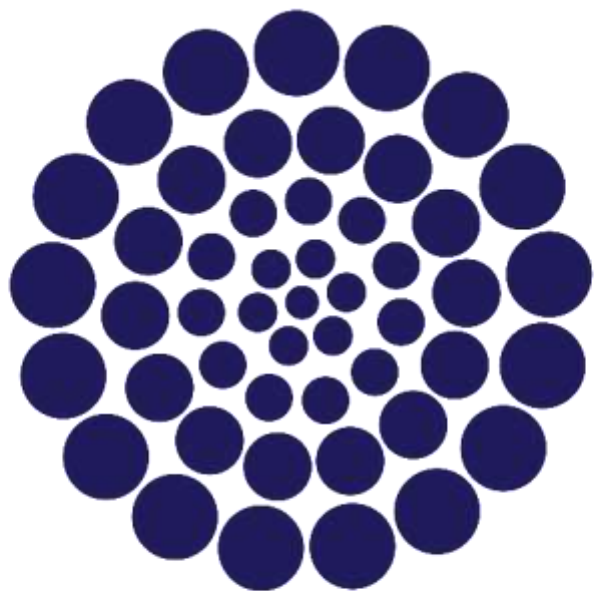
Dr. Otoniel Buenrostro
Delgado

Morelia, Michoacán, Agosto de 2016



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Residuos Sólidos y Uso Eficiente de la Energía del Instituto de Investigaciones Agrícolas y Forestales (IIAF) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, gracias a la asesoría de la Dra. Liliana Márquez Benavides y al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en México a través de la beca de maestría **631696**.



CONACYT

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado salud, por permitirme llegar hasta este punto de mi vida y concluir una etapa más de mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme una beca y contribuir en mi desarrollo profesional.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por permitirme cursar un posgrado de calidad en sus instalaciones.

A mi Asesora la Dra. Liliana Márquez Benavides, a mi co-asesor el Dr. Otoniel Buenrostro Delgado, al Dr. Juan Manuel Sánchez Yáñez, al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y a la Dra. Ma. del Consuelo Hernández Berriel por su tiempo y atinadas correcciones y sugerencias que hicieron posible este trabajo.

A Cony y Fer por su apoyo y amistad incondicional durante esta etapa de mi vida. Gracias por recorrer éste camino juntos.

A todos aquellos compañeros, amigos y familiares que me animaron y creyeron en mí.

DEDICATORIAS

A mi padre Armando Peña (1966-2012) mi más grande ejemplo de amor y superación. Por apoyarme y creer en mí siempre, por enseñarme que es posible alcanzar los sueños a pesar de las adversidades. Gracias por tu amor incondicional.

A mi madre y amiga Carmen Contreras por apoyarme en todo momento, por sus consejos, por sus valores y la motivación constante, pero más que nada, por tu inigualable amor, gracias.

A mi hermano Mandín, porque a pesar de que pareciera que siempre estamos en una constante batalla, la guerra siempre cesa y nos unimos para lograr nuestros sueños [*“...Tienes ese silencio, esos ojos tan magos, un hermano pequeño al que quiero y extraño...nada te haría tan especial, discutir o hablar...”*]. Eres tú quien me motiva a superarme, gracias.

A mi confidente Isabel Morales por su constante apoyo y por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y malos, por su paciencia y amor incondicional. Gracias por impulsarme a ser la mejor versión de mí.

NOTACIÓN

Abreviatura	Significado
ANOVA	Análisis estadístico de Varianza
CO ₂ eq	CO ₂ equivalente
CH ₄	Metano
DA	Digestión anaerobia
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
FE	Factor de emisión
FO	Fracción orgánica
GEI	Gases de efecto invernadero
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
IPCC	Panel intergubernamental del cambio climático
NaClO ₂	Clorito de sodio
N ₂	Nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
PB	Papel bond
PC	Papel cartón

PCG	Potencial de calentamiento global
PG	Papel glossy
pH	Potencial de hidrogeno
PP	Papel periódico
PS	Papel sanitario
O ₂	Oxígeno
RESA	Relleno sanitario
RLD	Residuo(s) lignocelulósico(s) doméstico(s)
RME	Residuo de manejo especial
RO	Residuos orgánicos
RP	Residuos peligroso
RS	Residuo(s) sólido(s)
RSD	Residuo(s) sólido(s) doméstico(s)
RSU	Residuo sólido urbano
ST	Sólidos totales
STV	Sólidos totales volátiles
VIS	Vivienda de interés social
Y _{CH4}	Rendimiento de metano.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Cambio climático y las emisiones de gas de efecto invernadero	4
2.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero en México	7
2.2 Sector habitacional en México.....	8
2.3. Residuos	10
2.3.1 Definición y clasificación de los residuos	10
2.3.1.1 Residuos lignocelulósicos domésticos.....	10
2.3.1.1.1 Composición química de los residuos lignocelulósicos domésticos	11
2.4 Sitios de disposición final: vertedero y relleno sanitario.....	15
2.4.1 Definición	15
2.4.2 Degradación de los residuos sólidos domésticos en un sitio de disposición final.....	16
2.4.3 Situación en México.....	20
2.5 Biorreactor anaeróbico	20
3. ANTECEDENTES	22
3.1 Producción, uso y disposición final del papel y cartón en México	22
3.2 Generación y composición de residuos lignocelulósicos domésticos	24
3.3 Generación de metano por tipo de residuo sólido doméstico.....	26
3.3.1 Generación de metano por residuos lignocelulósicos.....	27

4. JUSTIFICACIÓN.....	30
5. HIPÓTESIS.....	31
6. OBJETIVOS	32
6.1 Objetivo general	32
6.2. Objetivos particulares	32
7. METODOLOGÍA.....	33
7.1 Plan general de trabajo.	33
7.2. Desarrollo metodológico	35
7.2.1 Estudio de generación y composición de RSD y RLD generados en VIS	35
7.2.1.1 Sitio de muestreo	36
7.2.1.2 Composición.....	38
7.2.1.3 Generación	39
7.2.2 Caracterización química de los residuos lignocelulósicos domésticos	40
7.2.2.1 Cuantificación de sólidos totales y sólidos volátiles totales.....	40
7.2.2.2 Cuantificación de lignina y holocelulosa.....	41
a) Extracción preliminar de lignina.....	41
b) Holocelulosa	41
c) Lignina	42
7.2.3 Prueba de biodegradabilidad de los residuos lignocelulósicos domésticos.....	43
7.2.3.1 Obtención de inóculo productor de biogás	43
7.2.3.2 Prueba batch para biodegradar los residuos lignocelulósicos domésticos	45
7.2.4 Estimación del volumen de CH ₄ generado por la degradación de los residuos lignocelulósicos domésticos respecto a su tasa de generación	47

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
8.1 Estudio de generación y composición de los residuos sólidos domésticos	48
8.1.1 Tasa de generación de los residuos sólidos domésticos	48
8.1.2 Composición de los residuos sólidos domésticos.....	49
8.1.3 Generación de los residuos lignocelulósicos domésticos	52
8.2 Caracterización química de los residuos lignocelulósicos domésticos	54
8.3 Biodegradabilidad de los residuos lignocelulósico domésticos	58
8.3.1 Rendimiento de CH ₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos	58
8.3.2 Lignina y holocelulosa degradada en los residuos lignocelulósicos domésticos	63
8.3.3 Metano relativo a la tasa de generación domiciliaria	65
9. CONCLUSIONES	66
10. TRABAJOS FUTUROS.....	67
11. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	68
11.1 Objetivo general	68
11.2 Objetivos particulares	68
12. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS.....	69
12.1 Hipótesis	69
13. REFERENCIAS	70
ANEXO I	79
ANEXO II.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Título	Página
Figura 1.	Concentraciones de gases de efecto invernadero en el mundo en los últimos 2000 años.....	6
Figura 2.	Estructura de la celulosa.	12
Figura 3.	Representación esquemática de los componentes de la hemicelulosa.....	13
Figura 4.	Modelo estructural de la lignina	14
Figura 5.	Fases de la generación de gases y lixiviados en un relleno sanitario durante la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos.....	16
Figura 6.	Productos y subproductos de la degradación anaerobia de los residuos sólidos domésticos.....	19
Figura 7.	Porcentaje del consumo aparente de los productos de papel en México	22
Figura 8.	Diagrama del desarrollo metodológico del estudio de composición y generación de los residuos lignocelulósicos domésticos	35
Figura 9.	Ubicación del Conjunto habitacional de viviendas tipo interés social “San Mateo” al suroeste de Morelia, Michoacán.....	37
Figura 10.	Reactor de digestión anaerobia interconectado a un sistema de medición de biogás por desplazamiento.....	44
Figura 11.	Generación per cápita de residuos sólidos domésticos durante una semana	49
Figura 12.	Contenido de sólidos totales de los residuos lignocelulósicos domésticos.....	54
Figura 13.	Contenido de sólidos volátiles totales de los residuos lignocelulósicos domésticos	55

Figura 14. Contenido de lignina y holocelulosa de los residuos lignocelulósicos domésticos.	56
Figura 15. Dinámica de la generación de CH ₄ (Y _{CH₄} acumulado) de los residuos lignocelulósicos domésticos durante su digestión anaerobia en régimen mesófilo de 35°C. ...	58
Figura 16. Curvas típicas de biodegradabilidad de los compuestos orgánicos.	62
Figura 17. Curvas de degradación de los residuos lignocelulósicos domésticos de acuerdo a Battersby (1989)	63
Figura 18. Degradación del material lignocelulósico (lignina y holocelulosa).....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Número	Título	Página
Tabla 1.	Potencial de calentamiento global de los principales gases de efecto invernadero.....	5
Tabla 2.	Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero para el 2013.....	7
Tabla 3.	Clasificación de la vivienda.....	9
Tabla 4.	Características y usos de diversos tipos de papel y cartón	11
Tabla 5.	Compuestos químicos adicionados durante la fabricación del papel.	15
Tabla 6.	Comparación entre la degradación aerobia y anaerobia	20
Tabla 7.	Consumo, residuos generados y acopio de papel y cartón	23
Tabla 8.	Composición de los residuos sólidos urbanos en México	26
Tabla 9.	Características de los RSU de un vertedero de 30 años de edad.	28
Tabla 10.	Materiales para obtención de inóculo productor de biogás	43
Tabla 11.	Composición de residuos orgánicos para alimentación.....	45
Tabla 12.	Montaje de prueba para biodegradar los residuos lignocelulósicos domésticos	46
Tabla 13.	Porcentaje de los subproductos generados en el conjunto habitacional de vivienda de interés social.	50
Tabla 14.	Composición de los residuos sólidos domésticos del presente trabajo y el promedio nacional de residuos sólidos urbanos	52
Tabla 15.	Residuos lignocelulósicos domésticos generados por el conjunto habitacional "San Mateo".	53

Tabla 16. Caracterización química de los residuos lignocelulósicos domésticos en la literatura.	57
Tabla 17. Rendimiento de CH ₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos	59
Tabla 18. Rendimiento de CH ₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos reportados en la literatura y el de esta investigación.....	60
Tabla 19. Lignina y holocelulosa degradada en residuos lignocelulósicos después de una digestión anaerobia.	65
Tabla 20. Producción de CH ₄ relativo a la tasa de generación doméstica.....	65

RESUMEN

En México el 77% de los residuos sólidos urbanos provienen de la vivienda, los cuales son dispuestos principalmente en vertederos y rellenos sanitarios. En el caso de los residuos de papel y cartón son considerados “residuos de lenta degradación” debido a que están constituidos químicamente por lignina. Estos materiales lignocelulósicos tienen características particulares como el color, el gramaje, la composición química, la textura, la forma, entre otros. Sin embargo, a pesar de éstas diferencias son categorizados como un solo rubro de residuos; lo cual impide que se lleve a cabo una adecuada gestión. El objetivo general de este trabajo fue caracterizar los residuos de papel y cartón domiciliarios. Esta caracterización incluyó tres aspectos: la tasa de generación y composición en la corriente domiciliaria, la caracterización química y el potencial de generación de CH₄ (escala laboratorio). De acuerdo a los resultados obtenidos se concluyó que el papel y el cartón son una categoría diversa dentro de la corriente de RSD; esto implicó también distintos contenidos de lignina y holocelulosa. El cartón se identificó como el residuo lignocelulósico de mayor generación en la corriente domiciliaria, mientras que el papel bond resultó el de mayor rendimiento de CH₄. Se demostró que la generación en la corriente doméstica y la biodegradación anaeróbica deben considerarse variables interdependientes en la generación de CH₄.

Palabras clave: Papel, cartón, biodegradación anaerobia, residuos sólidos domésticos, lignina

ABSTRACT

In Mexico 77% of municipal solid waste are household waste. Mainly the household waste (HW) are disposed in landfills and landfills. Waste paper and cardboard are considered "slow degradation waste" because they are chemically composed of lignin. These lignocellulosic materials have particular characteristics such as color, weight, chemical composition, texture, shape, among others. However, despite these differences are categorized as one item and which prevents it from carrying out proper management. The overall objective of this study was to characterize the HW paper and cardboard. This characterization included three aspects: the generation rate and composition at the HW, the chemical characterization and methane generation potential (laboratory scale). The conclusion was that there are many categories of paper and cardboard at the HW and also these have different lignin and holocelulosa contents. The cardboard was the highest lignocellulosic waste, while the bond paper was the highest methane yield. It was shown that the HW generation and the anaerobic biodegradation must be considered interdependent variables in the generation of methane.

1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades concentran la mitad de la población mundial a pesar de que cubren menos del 1% de la superficie terrestre (Sovacool & Brown, 2010), consumen 75% de la energía del planeta y emiten una proporción aun mayor de gases de efecto invernadero (GEI) (Satterthwaite, 2008). Se estima que las emisiones de GEI están en constante aumento debido a varios factores entre ellos el constante aumento de los residuos sólidos urbanos, es por esto que las ciudades juegan un rol mayor en cuanto al abatimiento de emisiones de GEI (IEA, 2013).

Actualmente en México es evidente el aumento del parque habitacional de la vivienda de interés social (VIS) que es considerada económica y accesible a la demanda de la población de clase media-baja y baja, por lo que aunado a diversos factores como el aumento de la población y los cambios de hábitos, la cantidad de residuos sólidos domésticos (RSD) también ha incrementado y es un problema que se va agrava con el tiempo. En México no existe una normativa que regule la gestión de los RSD, lo que genera un problema con los residuos lignocelulósicos domésticos (RLD) que se disponen inadecuadamente en los rellenos sanitarios (RESA), donde se degradan lentamente y generan GEI como el CH₄. El objetivo de este trabajo fue caracterizar los residuos de papel y cartón domiciliarios. Esta caracterización incluyó tres aspectos: la tasa de generación y composición en la corriente domiciliaria, la caracterización química y el potencial de generación de CH₄ (escala laboratorio).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS EMISIONES DE GAS DE EFECTO INVERNADERO

El incremento en la temperatura global del planeta es un hecho que se ha registrado de manera sistemática a partir del siglo XIX (Solórzano-Ochoa, 2003). Hasta hace poco no había elementos suficientes para establecer de forma categórica que la actividad humana tenía influencia en este fenómeno. Sin embargo, el Tercer Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático conocido como IPCC por sus siglas en inglés (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) aportó parte de los elementos que hacían falta para establecer los nexos entre el calentamiento global y las actividades humanas. De forma complementaria se elaboró el Protocolo de Kioto, inscrito en el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, aprobado en Nueva York el 9 de mayo de 1992 el cual compromete a los países industrializados a reducir sus emisiones de GEI (Solórzano-Ochoa, 2003).

Para el IPCC el cambio climático, el término como tal, denota un cambio en el estado del clima identificable, por ejemplo, mediante análisis estadísticos, a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos de tiempo (Díaz, 2012). Por otro lado, Solórzano-Ochoa (2003) menciona que el cambio climático es atribuido principalmente a las actividades antropogénicas relacionadas con la quema de combustibles fósiles, en la agricultura y la generación de residuos.

El objetivo último de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debe lograrse en un plazo que posibilite a los ecosistemas adaptarse naturalmente al cambio climático, que asegure la producción de alimentos y permita el desarrollo económico sostenible.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que siempre ha existido y permite la vida en el planeta; este efecto hace posible almacenar calor en la superficie de la Tierra por los GEI. Sin estos gases en la atmósfera (**Tabla 1**), la temperatura en las noches descendería por debajo de los 10°C, como en la Luna, lo que haría que la vida tal como la conocemos no existiese en el planeta. Sin embargo, este fenómeno que es natural y beneficioso para la vida del hombre, se convirtió en un problema debido a que el ser humano, con el progreso desde la era industrial hasta la actualidad, ha elevado los niveles de GEI, incrementando la capacidad de almacenar calor y causa el calentamiento global (**Figura 1**). El calentamiento global ha modificado los ciclos climáticos del planeta, fenómeno conocido como cambio climático (Álvarez, 2010).

Tabla 1. Potencial de calentamiento global de los principales gases de efecto invernadero.

Gases de efecto invernadero	PCG*	Vida media en la atmosfera (años)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1	50 - 200
Metano (CH ₄)	23	12
Óxido nitroso (N ₂ O)	296	120
Hidrofluorocarbonados (HFC)	140 - 11,700	1.5 - 264
Perfluorocarbonos (PFC)	6,500 - 9,200	2,600 - 50,000

*Potencial de calentamiento global después de 100 años. **Fuente.** IPCC (2007)

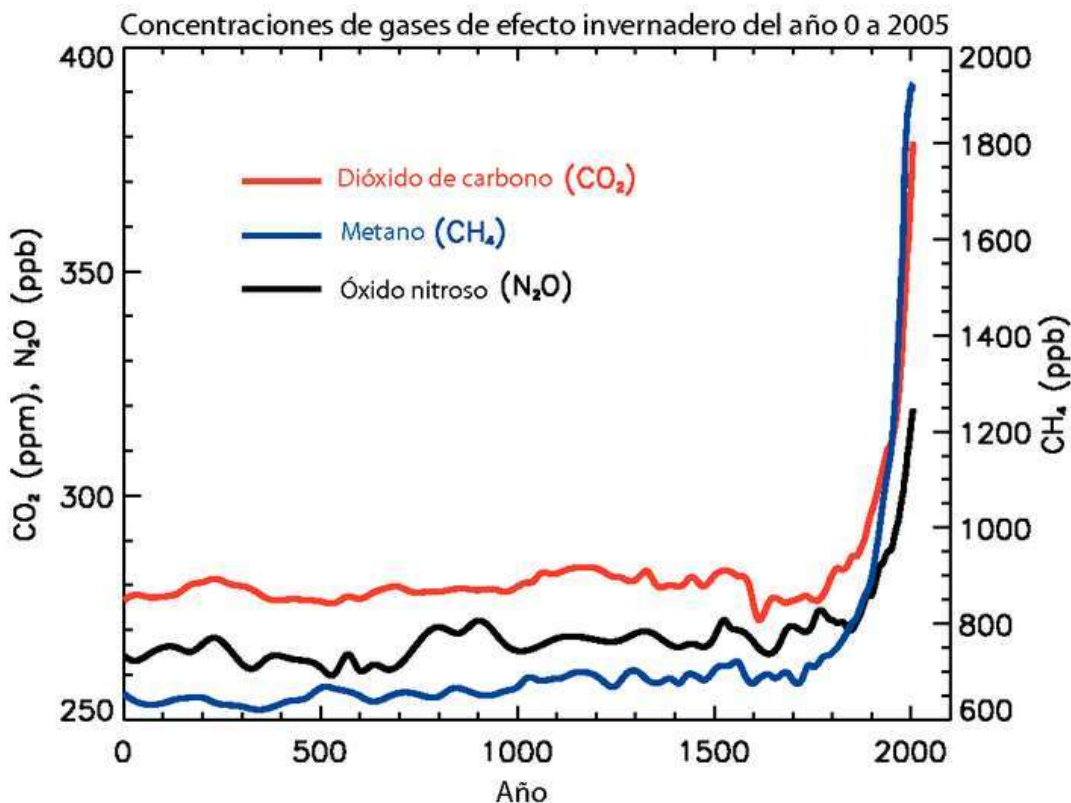


Figura 1. Concentraciones de gases de efecto invernadero en el mundo en los últimos 2000 años.

El incremento registrado desde el año 1750 se atribuye a las actividades humanas de la era industrial. Las unidades de concentración se miden en partes por millones (ppm) o partes por miles de millones (ppb) e indican la cantidad de moléculas de GEI por millones o miles de millones de moléculas de aire, respectivamente en una muestra de la atmosférica.

Fuente: IPCC (2007)

Los GEI están compuestos principalmente por CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso) y los halocarbonos que son gases que contienen I (flúor), Cl (cloro) y Br (bromo), y difieren en la influencia al calentamiento (forzamiento radiativo) debido a las diferentes propiedades y su tiempo de vida en la atmósfera (**Tabla 1**). Esta influencia se expresa con una medida común basada en el forzamiento radiativo del CO₂. De acuerdo con IPCC (2013) las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂ eq) son la cantidad de emisión de CO₂ que causaría el mismo forzamiento radiativo igual a una cantidad emitida de un GEI mezclado homogéneamente, todo ello multiplicado por su respectivo potencial de calentamiento global

(PCG), es decir la capacidad del gas para atrapar el calor en la atmósfera y el tiempo que ahí permanecerá.

2.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero en México

En México la contribución de las emisiones de los GEI para los seis gases enunciados en el Protocolo de Kioto se muestran en la **Tabla 2**. Se observa para el 2013 se generaron 665, 305 Gg de CO₂ eq., siendo la categoría de fuentes móviles de autotransporte y no carreteros la de mayor contribución con un 26% (INECC y SEMARNAT, 2015); sin embargo, es importante señalar que las emisiones de GEI provenientes de la categoría residuos aumentaron en un 97% entre 1990 y 2002 (INEGI, 2006).

Tabla 2. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero para el 2013.

Sectores	Participación sectorial (%)	Emisiones de GEI en términos de CO ₂ equivalente (Gg)
Fuentes móviles	26.2	174, 156.5
Generación eléctrica	19.0	125, 966.8
Industria	17.3	97, 864.4
Petróleo y gas	12.1	49, 510.6
Agropecuario	12.0	80, 169.1
USCUSS ^b	4.9	31, 461.6
Residuos ^a	4.6	44, 130.8
Residencial y comercial	3.9	25, 639.4
Total	100	665, 304.9

^a Incluye RSU y residuos peligrosos, así como tratamiento y eliminación de aguas residuales municipales se industriales. ^b Uso del suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura. Incluye las absorciones de tierras convertidas a tierras forestales.

Fuente: INECC y SEMARNAT (2015)

2.2 SECTOR HABITACIONAL EN MÉXICO

Se pronostica que el aumento total de viviendas particulares habitadas en México podría llegar de 42.2 millones para el 2030, lo cual representa un incremento del 37.2% en relación a 2012 en un escenario alto, es decir, un incremento promedio anual de 636 mil viviendas. El primer lugar por entidad federativa lo ocupa el Estado de México con un aumento de 19.1% y Michoacán el noveno lugar con un 3% (CONAVI, 2014).

En México, estas cifras indican que aun para la misma población se requerirá una mayor cantidad de vivienda para atender la demanda durante las próximas décadas. En un contexto de vertiginosa urbanización en el que aproximadamente 33 % de las familias mexicanas tienen un rezago habitacional, es decir viviendas en hacinamiento y construidas con materiales precarios o que requieren mejorar su estado por el uso de materiales de poca duración (CONAVI, 2014).

Según el Código de Vivienda (CONAVI, 2014) existe una clasificación por precio (**Tabla 3**) en la que la vivienda se clasifica en económica, popular y tradicional, llamadas comúnmente como VIS, así como las viviendas media, residencial y residencial plus, construidas en conjuntos habitacionales y fraccionamientos.

Tabla 3. Clasificación de la vivienda

Promedios	Vivienda de Interés Social			Media	Residencial	Residencial Plus
	Económica	Popular	Tradicional			
Superficie construida promedio (m²)	30	43	63	98	145	225
Veces salario mínimo mensual del D.F.	≤ 118	118 < 350	200 < 350	350 < 750	750 < 1,500	> 1,500
Número de cuartos	Baño, cocina y área de usos múltiples.	Baño, cocina, estancia-comedor y de 1 a 2 recámaras.	Baño, cocina, estancia-comedor y de 2 a 3 recámaras.	Baño, 1/2 baño, cocina, sala, comedor, de 2 a 3 recámaras y cuarto de servicio.	De 3 a 5 baños, cocina, comedor, de 3 a 4 recámaras, cuarto de servicio y sala familiar.	De 3 a 5 baños, cocina, comedor, de 3 a más recámaras, de 1 a 2 cuartos de servicio y sala familiar.

Fuente: CONAVI (2010).

La mayoría de las viviendas que se ofrecen en el mercado pertenecen a la categoría de tipo interés social, ya que en México los rangos de ingreso requeridos para su adquisición están por encima de los niveles de ingreso de la mayoría de la población (CESOP, 2006)

2.3. RESIDUOS

2.3.1 Definición y clasificación de los residuos

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003), un residuo es un material o producto cuyo propietario desecha y está en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.

Los residuos se clasifican en función de sus características y orígenes en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP) (LGPGIR, 2003). Sin embargo, también existen otras clasificaciones que toman en cuenta ciertas características como: su composición química, el riesgo que presentan, el encargado de su gestión, el tipo de generador, entre otros (Centro Guaman Poma de Ayala, 2011).

2.3.1.1 Residuos lignocelulósicos domésticos

En la clasificación por tipo de generador se encuentra los residuos sólidos domésticos (RSD), que son aquellos residuos sólidos generados exclusivamente en la vivienda. Dentro del flujo de RSD, se encuentran los residuos constituidos químicamente por material lignocelulósico como son los diversos tipos de papel y cartón, los pañales desechables, las toallas femeninas, la madera y los residuos de jardinería, etcétera.

En la **Tabla 4** se muestran las características generales y los usos de diferentes tipos de papel que son objeto de estudio del presente trabajo.

Tabla 4. Características y usos de diversos tipos de papel y cartón

Tipo de papel	Características y usos
Papel bond (PB)	También llamado papel carta y es un papel de alta calidad y resistencia, sin ningún recubrimiento. Es utilizado en sobres, cartas, folletos, notas (pos-it), manuales, facturas, recibos, planos, etc.
Papel sanitario (PS)	También denominado papel higiénico o papel de baño. Utilizado para la limpieza anal y genital tras el acto de la defecación o la micción.
Papel periódico (PP)	También conocido como papel de diario y es utilizado para la impresión de noticias.
Papel glossy (PG)	También nombrado papel estucado, couché o papel de revista. Es de apariencia brillante o mate y tiene una capa triple de estuco, que combina adhesivos y pigmentos minerales. Es usado para la impresión de volantes, folletos, catálogos, revistas, etc.
Cartón (PC)	Formado por varias capas superpuestas de papel, tiene consistencia rígida y es más resistente que otros tipos de papel. Es utilizado en embalajes y envases.

2.3.1.1.1 Composición química de los residuos lignocelulósicos domésticos

Los RLD como el papel bond (PB), papel glossy (PG), papel sanitario (PS), papel periódico (PP) y cartón (PC) están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa (al conjunto de estos se le denomina homocelulosa) y lignina, sin embargo, su contenido depende del método utilizado durante su fabricación.

Por ejemplo, el PP y el PC son fabricados mediante un método mecánico y son considerados papel de baja calidad (por su alto contenido de lignina). En el caso del PB, PG y PS se utiliza un método químico (adicional al mecánico) para disolver y reducir el contenido de lignina (Wang et al. 2015 y Dara et al., 2016). Según los reportes de Yuan *et al.* (2014), el contenido de lignina en el papel oscila del 2% al 25%.

La *celulosa* ($C_6H_{10}O_5$) $_n$ es un biopolímero que tiene un mínimo de 200 moléculas de glucosa, (**Figura 2**). La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosídico mediante enlaces β -1,4-glucosídico que se estructura en largas cadenas lineales de microfibrillas unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals intramoleculares que forman una estructura cristalina muy resistente e insoluble al agua (Rincón, 2014).

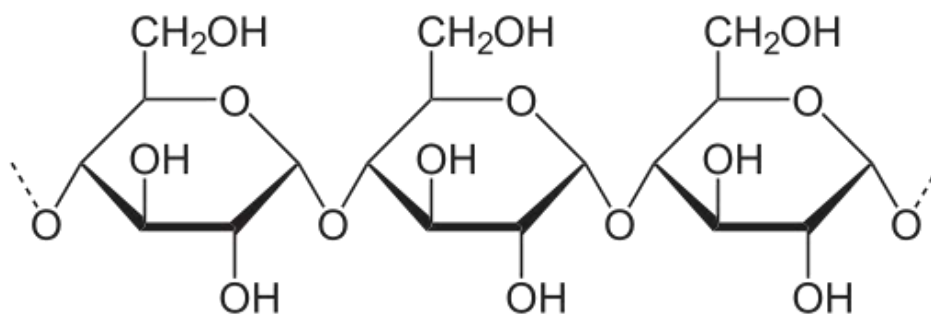


Figura 2. Estructura de la celulosa.

Fuente: Rincón (2014)

La *hemicelulosa* es un complejo homo y heteroglucano formado por pentosas (D-xilosa y L-arabinosa) y hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) que forman cadenas ramificadas unidos por enlaces β -1,4 y ocasionalmente por enlaces β -1,3. A diferencia de la celulosa, cuya estructura es la misma en los diferentes materiales lignocelulósicos, en las hemicelulosas existe una considerable variación entre las diferentes especies. La **Figura 3** muestra una representación esquemática de algunos componentes de la hemicelulosa (Rincón, 2014).

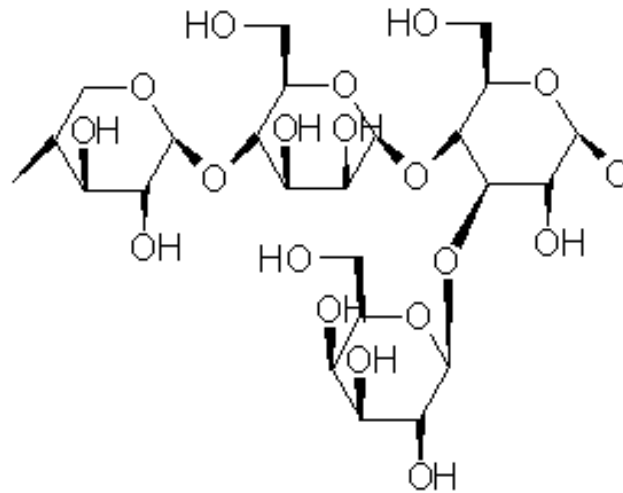


Figura 3. Representación esquemática de los componentes de la hemicelulosa (Xilosa β (1,4)-Manosa β (1,4)-Glucosa α (1,3)-Galactosa)

Fuente: Rincón (2014)

La *lignina* es un polímero de alcoholes de fenilpropanoide de alto peso molecular, amorfo e hidrofóbico (Rincón, 2014). Éste sistema complejo se entrelaza y/o recubre a la homocelulosa y actúa como una barrera física y química que evita su degradación anaerobia (Wang *et al.*, 2013). En la **Figura 4** se muestra un modelo estructural de acuerdo con Melián (2013).

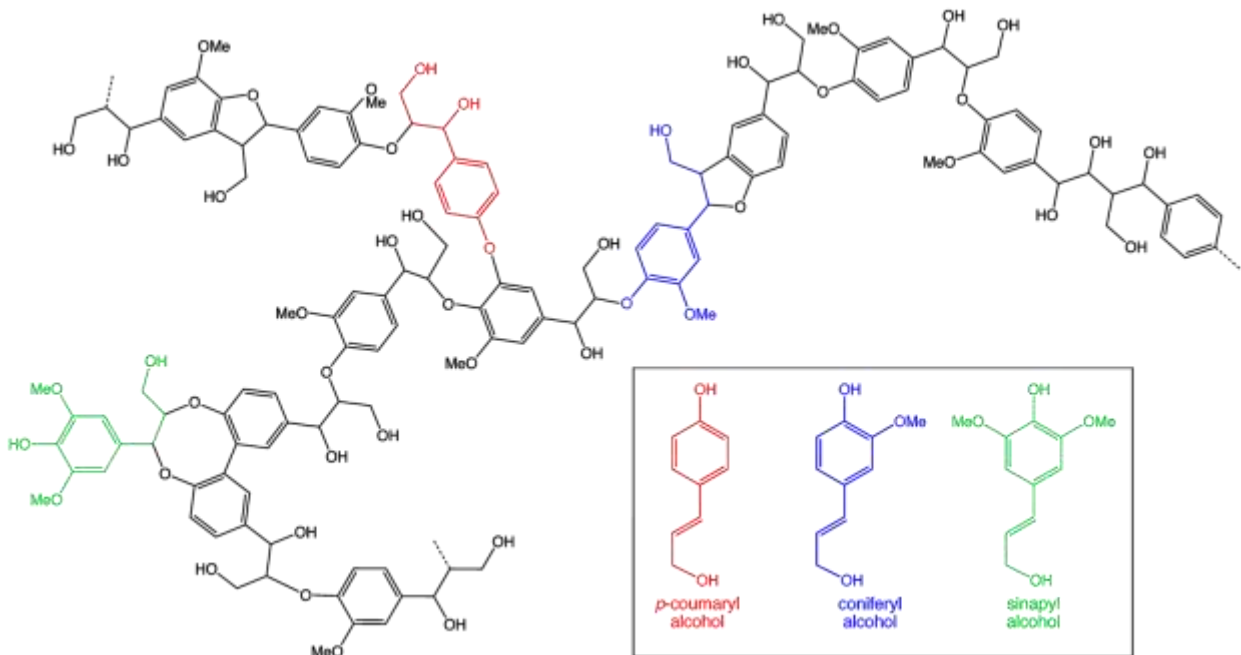


Figura 4. Modelo estructural de la lignina

Fuente. Melián (2013)

Además de la lignina y homocelulosa, los RLD contienen pequeñas trazas de compuestos químicos (**Tabla 5**). Éstos compuestos químicos son adicionados por la industria del papel, de acuerdo a las características y a la calidad que se desea en el producto, ya que pueden mejorar la resistencia, la suavidad y el brillo del papel (Dara *et al.*, 2016).

Tabla 5. Compuestos químicos adicionados durante la fabricación del papel.

Compuesto químico	Característica	Efecto principal
Derivados de alcohol	Antiespumante	Suprimir la formación de espuma durante el proceso y el propio producto
Almidón y carboximetilcelulosa	Aglutinante	Aumentar la resistencia
Peróxido de sodio	Blanqueador	Aumentar la blancura
Etoxilatos	Dispersante	Prevenir la coagulación o precipitación de pigmentos
Polímeros	Fijador	Mejorar la adición en fibras
Rojo de metilo	Colorante	Coloración o sombreado
Resinas	Adhesivo y resistencia	Reducir la absorción de agua
Sosa caustica	Regulador de pH	Cambio de la acidez
Sulfocianuros	Bactericida	Inhibición del crecimiento bacteriano
Arcilla china	Rellenos	Mejorar la capacidad de impresión

Fuente: Dara *et al.* (2016)

2.4 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL: VERTEDERO Y RELLENO SANITARIO

2.4.1 Definición

De acuerdo a las características del sitio de disposición final, es el término usado para éste. Un *RESA* es una obra ingenieril para la disposición final de los RSU y RME que cumple con lo establecido en la Norma Oficial NOM-083-SEMARNAT-2003 para controlar los impactos ambientales. Entre las características que debe cumplir es, estar a una distancia mínima de 500 m (contados a partir de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano, así como de cualquier cuerpo de agua), tener una membrana geológica natural mayor o equivalente a un metro de espesor, un sistema de captación y recirculación de lixiviado y drenaje pluvial. Por otro lado, un *vertedero* es un sitio de disposición final que no cumple con las especificaciones oficiales de un RESA y puede estar controlado o no.

2.4.2 Degradación de los residuos sólidos domésticos en un sitio de disposición final

Dentro de un sitio de disposición final, los RSD son degradados por una diversidad microbiana que responde a diferentes niveles de O_2 (oxígeno). Como producto final de la degradación se genera biogás (45-60% CH_4 y 40-55% CO_2) y lixiviados. De acuerdo a la tasa de generación de biogás respecto al tiempo (**Figura 5**) se distinguen 5 fases secuenciales (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

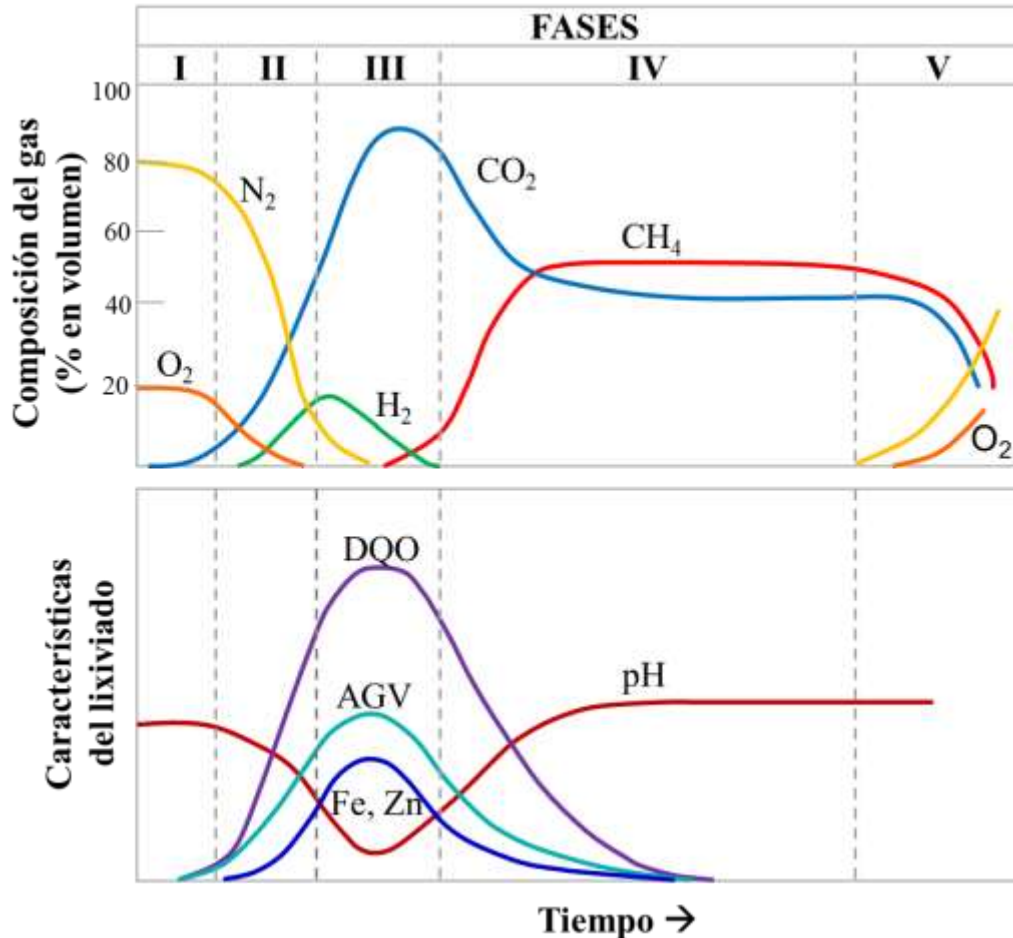


Figura 5. Fases de la generación de gases y lixiviados en un relleno sanitario durante la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

O_2 (oxígeno); N_2 (nitrógeno); CO_2 (bióxido de carbono); CH_4 (metano); H_2 (hidrógeno); DQO (demanda bioquímica de oxígeno); AGV (Ácidos grasos volátiles); Fe (hierro); Zn (Zinc); pH (potencial de hidrógeno).

Fuente: Tchobanoglous *et al.* (1994)

FASE I. Inicial: comienza cuando los RSD son depositados en las celdas del RESA, en las que microorganismos aerobios despolimerizan compuestos complejos en compuestos orgánicos simples y consumen el O₂ atrapado en el suelo, en consecuencia el pH disminuye gradualmente. Al comenzar esta fase la composición de gases es de: 79% de N₂ (nitrógeno) y 21% de O₂, los cuales disminuyen lentamente mientras se incrementan el nivel de CO₂, esta fase dura 2 semanas (**Figura 5**).

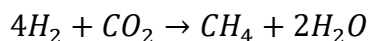
FASE II. Transición: se inicia la actividad bacteriana anaeróbica al descender el O₂, se generan ácidos orgánicos, aumenta la concentración de CO₂ hasta un 40-50% y de H₂ (hidrógeno) alrededor 10-20%. Los NO₃⁻ (nitratos) y los SO₄⁻ (sulfatos) que sirven como aceptores finales de electrones, se reducen a N₂ y sulfuro de hidrógeno (H₂S) respectivamente, por el bajo potencial de oxidación-reducción el pH del lixiviado disminuye a 5. Esta fase se completa entre 2 semanas a 2 meses (**Figura 5**).

FASE III. Ácida: se divide en 2 partes: 1) fermentación de ácidos orgánicos en alcoholes, 2) transformación de alcoholes en ácido acético, CO₂ y pequeñas cantidades de H₂, por bacterias anaerobias estrictas y facultativas denominadas acetogénicas. Se incrementa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la química de oxígeno (DQO) y el pH disminuye a 3-5. En esta etapa el biogás está compuesto principalmente por un 50-90% de CO₂ y <20% de H₂. El tiempo de duración de esta fase varía entre 2 meses a 2 años (**Figura 5**).

FASE IV. Fermentación del CH₄: dos grupos de bacterias anaerobias estrictas reducen el ácido acético y el CO₂ (generados en la fase anterior) a CH₄, las metanogénicas acetoclásticas y las hidrogenofílicas, respectivamente.

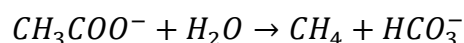
Las bacterias hidrogenofílicas no acetoclásticas obtienen su energía por la oxidación del H₂ con CO₂ como aceptor de electrones (**Ecuación 1**) Estas bacterias no utilizan el acetato como fuente de energía, pero unas pueden usarlo como fuente de C (carbono). Los ejemplos de géneros bacterianos más comunes son: *Methanobacterium formicum*, *Methanospirillum hungatei*, *Methanobrevibacter sp.*, etc.

Ecuación 1



Los géneros bacterianos metanogénicos acetilclásticos producen CH₄ a partir del grupo metilo del acetato según la **Ecuación 2**:

Ecuación 2



Esta reacción es de suma importancia para la DA, dado que el 73% del metano producido por los digestores anaerobios vienen de este tipo de bacterias.

En esta etapa la composición de la mezcla de gases en el RESA es principalmente: 40-55% de CO₂ y 45-60% de CH₄ y el pH se eleva entre 6.8 a 8, además disminuyen los valores de la DBO y la DQO. Esta fase es la más estable y dura aproximadamente desde 6 meses hasta 5-20 años (**Figura 5**).

FASE V. Maduración: se produce una disminución en la generación de biogás en el RESA ya que el acetato se consumió en el lixiviado o gases de las fases anteriores. La mayor parte de los compuestos de la FO se han degradado, sin embargo persiste la lignina y sus derivados: ácidos húmicos y fúlvicos, que son recalcitrantes en el RESA y se utilizan como indicadores de la DA. La emisión de CH₄ y CO₂ ocurre de manera intermitente en un periodo de 20 hasta 40 años posteriores a la clausura del RESA, mientras la concentración de N₂ y O₂ se incrementa gradualmente por el flujo atmosférico en el gas del RESA para restablecer la condición original (**Figura 5**).

La duración de cada fase dependerá de la distribución de los componentes orgánicos, la disponibilidad de nutrientes, la relación carbono/nitrógeno (C/N), la composición de los RSD, del grado de compactación, así como de factores ambientales como la temperatura y el contenido de humedad. Además de que el suelo, la adición de lodos de agua residual y la recirculación de lixiviados son fuentes de microorganismos aerobios y anaerobios que aceleran la degradación

de los residuos (Tchobanoglous *et al.*, 2005). En la **Figura 6** se muestran los productos y subproductos de la degradación de los RSD.

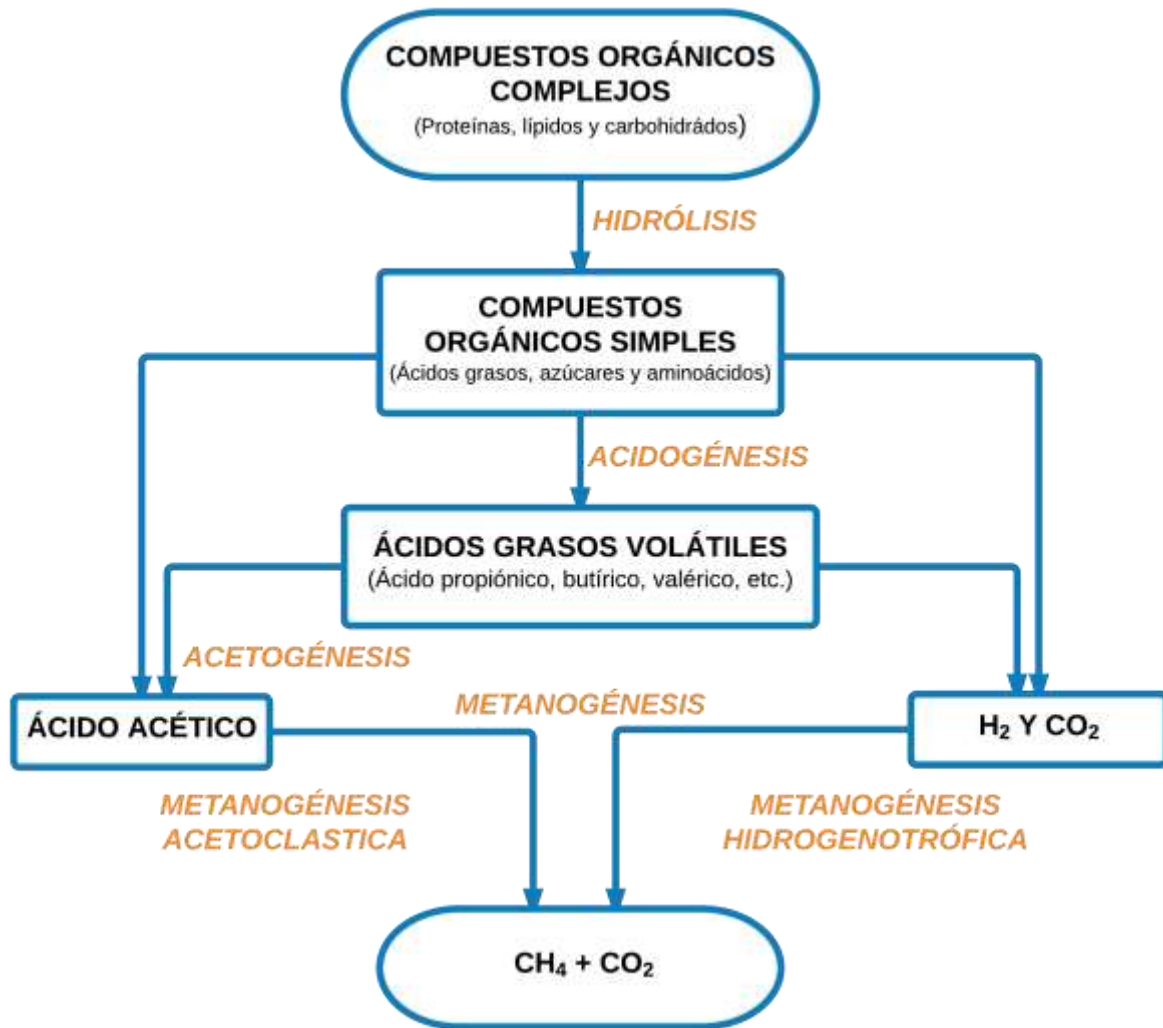


Figura 6. Productos y subproductos de la degradación anaerobia de los residuos sólidos domésticos.

Fuente: Lorenzo-Acosta et al. (2005)

2.4.3 Situación en México

En México, los RSU (incluyendo los RLD) y RME son enviados a vertederos y rellenos sanitarios (RESA). De acuerdo con el Instituto de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2012), estos sitios de disposición final representan la mayor fuente de emisiones de CH₄ (en el 2010 contribuyeron con el 53% de las emisiones de CH₄ país). Entre 1995 y 2011, el número de sitios de disposición final incrementó de 30 a 196, de los cuales en Michoacán hay 6 RESA y un vertedero controlado (SEMARNAT, 2012).

2.5 BIORREACTOR ANAERÓBIO

Un biorreactor o biodigestor anaerobio, es un contenedor hermético utilizado para simular la degradación de los RSD en un RESA. Comparado con la composta (**Tabla 6**), la tasa de generación de biogás por unidad de volumen es mayor en un biorreactor anaerobio, además de que tiene bajos requisitos de agua (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Tabla 6. Comparación entre la degradación aerobia y anaerobia

Característica	Aerobios	Anaerobios
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos finales	Humus, CO ₂ y H ₂ O	Fangos, CO ₂ y CH ₄
Reducción de volumen	Hasta el 50%	Hasta el 50%
Tiempo de procesamiento	20-30 días	20-40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de composta	Reducción de volumen y estabilización de residuos.

Fuente: Tchobanoglous *et al.* (1994)

El desempeño de un sistema anaeróbico se evalúa dependiendo de la tasa de generación de CH₄, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso (FAO, 2011). Entre los parámetros que influyen en el proceso de degradación anaerobia de un material son:

- a) Régimen de temperatura (mesófilo de 30 a 38 °C o termófilo de 55 a 60 °C)
- b) Composición química del material
- c) pH cercano a la neutralidad (6 a 8)
- d) Concentración de la unidad experimental (líquida: <10 %ST, semi-sólida: $10 \leq 20$ % ST y sólida: >20% ST)
- e) Nutrientes
- f) Toxicidad

La actividad metanogénica se puede medir empleando cromatografía de gases para medir el CH₄ producido durante el proceso de degradación del sustrato (Guyot *et al.*, 1990).

3. ANTECEDENTES

3.1 PRODUCCIÓN, USO Y DISPOSICIÓN FINAL DEL PAPEL Y CARTÓN EN MÉXICO

Según datos más recientes de la cámara del papel, en México para el 2012 existía una producción Nacional de 4,860 miles de ton, exporta 183 miles de ton e importa 2,140 miles de ton dando un consumo nacional de 6,017 miles de ton de productos de papel, de los cuales se dividen en los productos mostrados en la **Figura 7** (Cámara del papel, 2012).

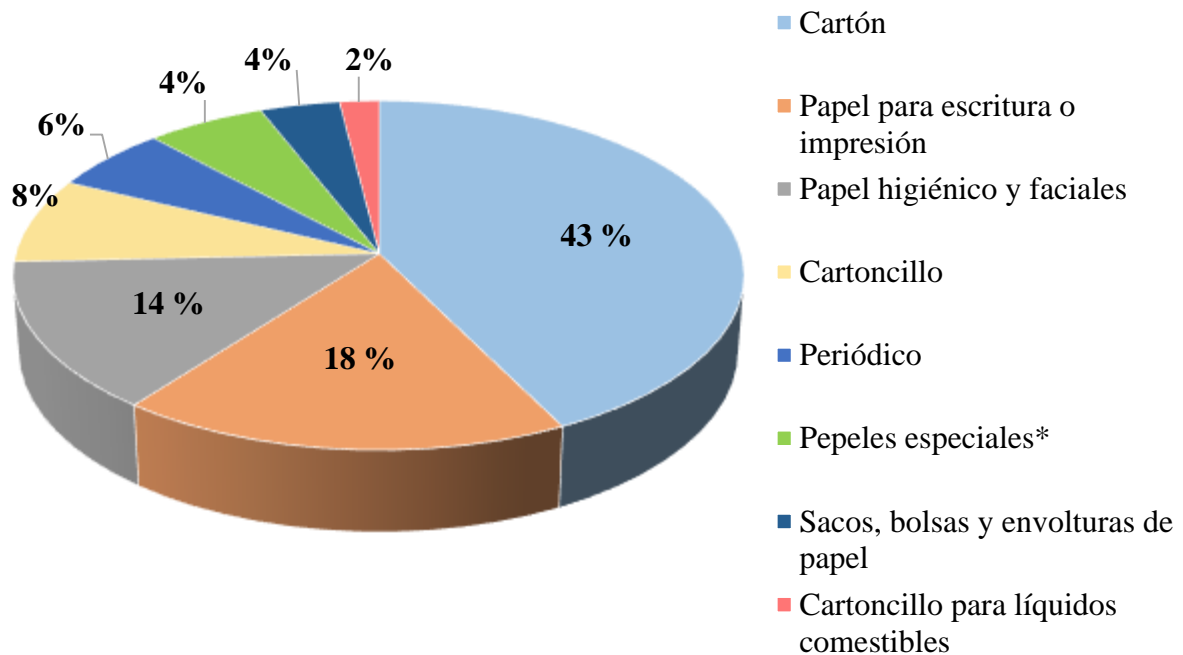


Figura 7. Porcentaje del consumo aparente de los productos de papel en México

*Papel glassine (resistente a grasas), china y otros. **Fuente:** Cámara del papel, 2012.

Estos productos de papel y cartón son utilizados en escuelas, oficinas, hospitales, hogares, etc. Terminada su vida útil son desechados por el consumidor y van al RESA o vertederos, en México se recicla 3,400 miles de ton del consumo total (**Tabla 7**). México tiene 37 empresas dedicada a la industria del papel y cartón que utilizan como materia prima fibra virgen y fibra secundaria o reciclada que debe cumplir con la Norma Mexicana (NMX-N-106-

SCFI-2010) que especifica la calidad del material recuperado y las proporciones para la fabricación de nuevos productos (Cámara del papel, 2012).

Tabla 7. Consumo, residuos generados y acopio de papel y cartón

Tipo de papel	Consumo^a	Residuos generados^a	Acopio actual total^a
Periódico	390	323	203
Escritura e impresión	1,250	649	541
Sacos, bolsas y envoltura	254	254	49
Cartón para caja	2,875	2682	2,313
Cartoncillo	526	278	81
Cartoncillo líquido comestibles	166	166	18
Papeles especiales ^b	391	10	10
Higiénicos y faciales	985	985	10
Total	6,837	5,348	3,400

^aMiles de toneladas; ^bPapel glassine (resistente a grasas), china y otros.

Fuente: Cámara del papel, 2012.

Un aspecto fundamental en el reciclaje de cualquier material de valor es el estado con el que llega a la planta recicladora. Para el cartón y papel algunas características deseables están especificadas en la norma mexicana (NMX-N-106-SCFI-2010), como: material de un solo tipo, libre de otros, limpios y secos; sin embargo la **Tabla 7** muestra que sólo el 50% de los residuos generados de papel y cartón se reciclan (Cámara de papel, 2012).

Entre los beneficios ambientales derivados del reciclaje de papel está la disminución de 2.5 m³ en los sitios de disposición final por ton de papel reciclado, mayor tiempo de vida útil en los RESA y disminución de 3 ton de emisiones de GEI por 1 ton de papel reciclado (Cámara de papel, 2012).

3.2 GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DOMÉSTICOS

Conocer la generación y composición de los RSD es importante para un manejo adecuado de los mismos y minimizar los posibles daños generados al ambiente, por ello se han realizado estudios por:

En Santo Domingo, República Dominicana, Rodríguez *et al.* (2010) reportaron los resultados de la caracterización de RSD. Analizaron el porcentaje de la composición de los RSD y en su valoración se cuantificó el volumen y el peso. La generación per cápita en los sectores de ingresos altos fueron de 1.27 kg/hab.día, la de ingresos medios de 1.00 kg/hab.día y la de ingresos bajos 0.74 kg/hab.día. De las cuales de acuerdo a la composición física promedio en los RSD generados en el sector alto para los desperdicios de cocina el 40.89%, papel y cartón 11.24%, hierba-madera 23%, en el sector medio para los desperdicios de cocina el 32.57%, papel y cartón 12.36%, hierba-madera 20.89% y para el sector bajo, desperdicios de cocina el 63.51%, papel y cartón 11.36%, hierba-madera 8.42%.

Taboada-González *et al.* (2011) reportaron el comportamiento en la generación de RSD en una comunidad urbana de Ensenada y dos rurales: San Quintín y Vicente Guerrero en Baja California, México, durante un año. Los RSD analizados provenían de los camiones colectores municipales, durante una semana. La generación per cápita se determinó con los RSD colectados por el número de habitantes. El mayor porcentaje de RSD fueron los reciclables orgánicos con un valor mayor del 55%, constituido por desechos alimenticios, papel, cartón y textiles. El estudio se realizó en dos etapas de Mayo a Junio de 1999 y de Marzo a Abril de 2000 y registró una generación de RSD de 0.979 kg/hab.día en Ensenada, 0.732 kg/hab.día en San Quintín y 1.171 kg/hab.día en Vicente Guerrero.

En Suzhou, China Binxian *et al.* (2014) evaluaron las características y generación de los RSD para identificar las oportunidades y beneficios de su reciclaje. El estudio se realizó durante una semana en verano de 2011 y en primavera de 2012. Se registró una tasa de generación de 0.281 kg/hab.día y una generación anual de 568,000 toneladas de los cuales el 65.7% pertenecía a residuos de comida, 14.3% a papel y el 8.9% a plástico.

Estos estudios reflejan que dentro del flujo de los RSD los RLD representan una fracción importante (papel, cartón, pañales, residuos de jardín, etc.) la cual no está siendo gestionada adecuadamente y va a parar a los RESA, lugar donde a pesar de que se degradan lentamente contribuyen a la generación de GEI.

En México la información más reciente sobre la composición de RSD es la reportada indirectamente dentro de la composición de RSU (**Tabla 8**) la cual incluye a los RSD y RSND (RS generados por comercios, instituciones y servicios municipales), así como la generación per cápita de 0.669 kg/hab.día para Michoacán (INECC, 2012a). Sin embargo, en México no se reportan estudios que reflejen la composición por tipo de vivienda como los es la VIS, ni que a su vez desglose la composición de los RLD, específicamente del PG, PP, PB, PS y PC.

Tabla 8. Composición de los residuos sólidos urbanos en México

Subproducto	Porcentaje
Cartón	6.5
Papel	6.2
Material ferroso	2.1
Material no ferroso	0.6
Plástico rígido y de película	7.2
Envase de cartón encerado	1.5
Fibras sintéticas	0.9
Poli estireno expandido	1.7
Hule	1.2
Lata	2.3
Vidrio de color	2.6
Vidrio transparente	4.0
Poliuretano	2.8
Cuero	0.5
Fibra dura vegetal	0.7
Residuos Alimenticios	25.6
Hueso	0.6
Residuos de jardinería	9.4
Madera	1.3
Residuo fino	3.8
Pañal desechable	6.5
Algodón	0.7
Trapo	3.6
Loza y cerámica	0.6
Material de construcción	1.5
Varios	5.9
Total	100.0

Fuente: INECC (2012a)

3.3 GENERACIÓN DE METANO POR TIPO DE RESIDUO SÓLIDO DOMÉSTICO

Existen estudios como los realizados por Thanh *et al.* (2010) en Vietnam en el que estimaron una tasa de generación de RSD promedio de 285.28 g per cápita al día de un promedio de 4.41 habitantes por hogar. Calcularon las emisiones de CH₄ generadas por la FO de los RSD: residuos alimenticios, papel, residuos de jardinería y textiles si se llegara a desviar del RESA, utilizaron la herramienta AM0025 y factores por defecto del nivel 1 del IPCC (2006) y encontraron que el ahorro de emisiones sería de 253.53 g CO₂ eq/hab.día por los residuos de cocina, seguido del papel con 4.74 g CO₂ eq/hab.día) y finalmente 1.135 g CO₂ eq/hab/día por residuos de jardinería.

De acuerdo con Vaccari *et al.* (2011), usar la metodología del IPCC y utilizar datos y parámetros nacionales provoca subestimaciones en el cálculo de las emisiones de GEI, ya que la degradación de los RSU depende de las condiciones específicas de cada RESA o vertedero, así como de la composición química del RSU. Vaccari *et al.* (2011) proponen recopilar datos específicos o elegir los factores de emisión adecuados.

En el Reino Unido, el *Department for Environment Food & Rural Affairs* (DEFRA, 2011) cada año publica listados de factores de emisión (FE) de GEI para diferentes actividades. Para el caso de la disposición de residuos en vertederos, específicamente el papel y el cartón, se reporta un mismo FE por tonelada de residuo dispuesto (580 kg/CO₂ eq). Sin embargo, estos FE por tipo de residuo fueron calculados por medio de análisis de ciclo de vida, tomando en cuenta las condiciones y características del Reino Unido y sólo son aplicables en esta región.

Actualmente en México no existen reportes de FE para RSD que permitan calcular las emisiones de GEI generadas por tipo de residuos, ni existen bases de datos del comportamiento a través del tiempo de los RSD. Una manera de estimar las emisiones de GEI generadas por la degradación de los RSD es por medio de la experimentación a escala laboratorio y relacionarlo con la generación per cápita lo que resultaría un avance para la creación de bases de datos.

3.3.1 Generación de metano por residuos lignocelulósicos

La tasa de degradación de la FO de los RSU en los RESA disminuye con el tiempo, por la acumulación de materiales de lenta degradación. Se han realizado estudios a escala laboratorio para medir la generación de CH₄ y la dinámica de degradación de diferentes tipos de RSU, ya que es difícil técnicamente determinarlo directamente en los RESA.

Jayasinghe (2011) realizó un estudio a nivel laboratorio para conocer el efecto del uso de enzimas para el aumento de la velocidad de degradación de la FO de RSU ricos en lignina. Los RSU ricos en lignina los tomó de una muestra de un pozo a una profundidad de 12 m de un vertedero de 30 años de edad (**Tabla 9**) y los trituró hasta un tamaño de 2 mm. Montó biorreactores de 125 ml y 2 g de RSU en régimen mesófilo durante 40 días. Las variables experimentales fueron el tipo de enzima, la dosis de enzima y la relación de enzima: H₂O. El

mayor rendimiento de CH₄ fue de 200 ml CH₄/g SVT y se obtuvo con la enzima Manganese Peroxidasa al día 30. El reactor control contenía solo RSU rico en lignina y tuvo un rendimiento de 5.7 ml CH₄/g SVT. La reducción de lignina en el reactor con el mayor rendimiento de CH₄ fue de 68.4% mientras que para el control fue de 6.2%.

Tabla 9. Características de los RSU de un vertedero de 30 años de edad.

Parámetro	Valor
Contenido de humedad (%)	18.0
Sólidos totales (%)	82.0
Sólidos volátiles (%)	18.6
Contenido de lignina (%ST)	81.9
Celulosa y hemicelulosa, relación $\left(\frac{C+H}{L}\right)$	0.2

Fuente. Tomada de Jayasinghe, 2011.

Yuan *et al.* (2012) estudiaron el efecto del pre tratamiento de los RSU en la degradación de la FO. Los RSU utilizados fueron PP con un contenido de lignina del 23.4%, PC con 17.8% lignina, PB con 1.4% de lignina y como control papel filtro Whatman No. 1 con 100% celulosa. Utilizaron como pre tratamiento un consorcio microbiano para aumentar la velocidad de degradación durante 20 días y después montaron biorreactores de 1 L con 750 ml de volumen de trabajo en régimen mesófilo (35 °C) durante 60 días. Obtuvieron el mayor rendimiento a los 55 días: El papel filtro 277 ml CH₄/g SVT con un porcentaje de degradación del 78.3%, el PB 287 ml CH₄/g SVT con 80.5% de degradación, el PP 192 ml CH₄/g SVT con 39.7% de degradación y el PC 131 ml CH₄/g SVT con un 49.7% de degradación.

Trzcinski *et al.* (2012) en Inglaterra estudiaron el potencial bioquímico de metano de residuos de papel, residuos de jardín y RSU. Montaron reactores mesófilos (35°C) en base líquida por 255 días. Utilizaron como inóculo 2 g DQO/L y obtuvieron un rendimiento de 146.6 ml CH₄/g SVT para el papel, 113.7 ml CH₄/g SVT para los residuos de jardín y 243.8 ml CH₄/g SVT para la mezcla de RSU.

Yuan *et al.* (2014) realizaron un estudio con un consorcio microbiano termofílico (MC1) como método de pre tratamiento (14 días) con el fin de mejorar los rendimientos de producción de biogás y CH₄ de una mezcla de RSM 1:1:1 (PB, PP y PC) la cual tenía 14.2% de lignina, 70.2% de celulosa y 12.0% de hemicelulosa, utilizando blancos control que contenían el consorcio microbiano en medio de solución peptona celulosa. Montaron digestores anaerobios mesófilos de 1 L con 750 ml de volumen de trabajo durante 10 días. Concluyendo que las muestras pre tratadas con un consorcio microbiano mejoran el rendimiento en la producción de biogás y CH₄. El mayor rendimiento lo obtuvieron a los 8 días con el 5.0 % de sustrato de inóculo de MC1 (419 ml CH₄/g SVT vs 117 ml CH₄/g SVT), 134.1% más rendimiento que la muestra control (sin tratamiento).

A pesar de que se han realizado estudios a escala laboratorio para medir el rendimiento de CH₄ generado por la degradación de la FO de RSU, no existe alguno que compare los RLD como el PP, PC, PS, PG y PB en un biorreactor con un contenido de sólidos totales mayores al 10% ST, en régimen mesófilo y que tenga como objetivo conocer su dinámica de degradación sin pre tratamiento.

4. JUSTIFICACIÓN

Los RS han representado una problemática que se ha agravado a través del tiempo por diversos factores como son el aumento de la población, los cambios de hábitos de consumo y la variación en la composición de los residuos, entre otros, que al ser dispuestos en vertederos no solo contaminan el suelo y los mantos acuíferos, si no que al degradarse contribuyen a la emisiones de GEI y por consiguiente al cambio climático.

Actualmente en México se ha registrado un aumento en el parque habitacional de VIS, que ha provocado que en un área reducida se concentre una gran cantidad de población que genera residuos constantemente. Además, debido a que no existe una normativa que regule la disposición de los RSD, estos son enviados directamente a los RESA, vertederos controlados y no controlados.

Dentro de la corriente de RSD, se encuentran una gran variedad de residuos de papel y cartón (RLD), mismos que presentan características particulares como la composición química, la tasa de generación domiciliaría y su potencial de generación de CH₄. Sin embargo, no existe información fragmentada de este rubro Es importante que se realice una subdivisión de estos rubros ya que esta información ayudará a diseñar e implementar políticas públicas que permitan a la sociedad mitigar los efectos producto del cambio climático.

5. HIPÓTESIS

Los residuos de papel y cartón en la corriente domiciliaria son considerados una sola categoría como si fueran un solo tipo de material. Sin embargo, es sabido que se comercializan distintos tipos de papel y cartón, distinguiéndose por el uso al que se asignan. Se hipotetiza que las diferencias en sus tasas de generación como residuo domiciliar, aunado a sus características químicas representan una diferencia significativa en su tasa de producción de CH₄ individual.

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar los residuos de papel y cartón domiciliarios. Esta caracterización incluye tres aspectos: la tasa de generación y composición en la corriente domiciliaria, la caracterización química y el potencial de generación de CH₄ (escala laboratorio).

6.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Realizar un estudio de caracterización y generación de RSD y RLD provenientes de las VIS.
2. Caracterizar químicamente la corriente de RLD identificada.
3. Estimar el rendimiento de CH₄ de los RLD (PB, PP, PC, PG y PS) al degradarse en un biorreactor anaerobio a escala laboratorio
4. Estimar el volumen de CH₄ generado en un vertedero por la degradación de RLD provenientes de una VIS.

7. METODOLOGÍA

7.1 PLAN GENERAL DE TRABAJO.

El plan general de trabajo se dividió en cuatro fases:

FASE I. Estudio de generación y composición de RSD y RLD generados en una VIS

Actividad 1. Selección del área y obtención de permisos correspondientes

Actividad 2. Obtención de perfil de generación anual y composición de RSD

Actividad 3. Estimación de los RLD (PB, PG, PS, PP y PC) generados en una VIS

FASE II. Caracterización química de los RLD

Actividad 1. Cuantificación del contenido de ST y SVT de los RLD

Actividad 2. Cuantificación del contenido de lignina y holocelulosa de los RLD

FASE III. Biodegradabilidad de los RLD en sistema anaerobio mesófilo

Actividad 1. Obtención de inóculo productor de biogás

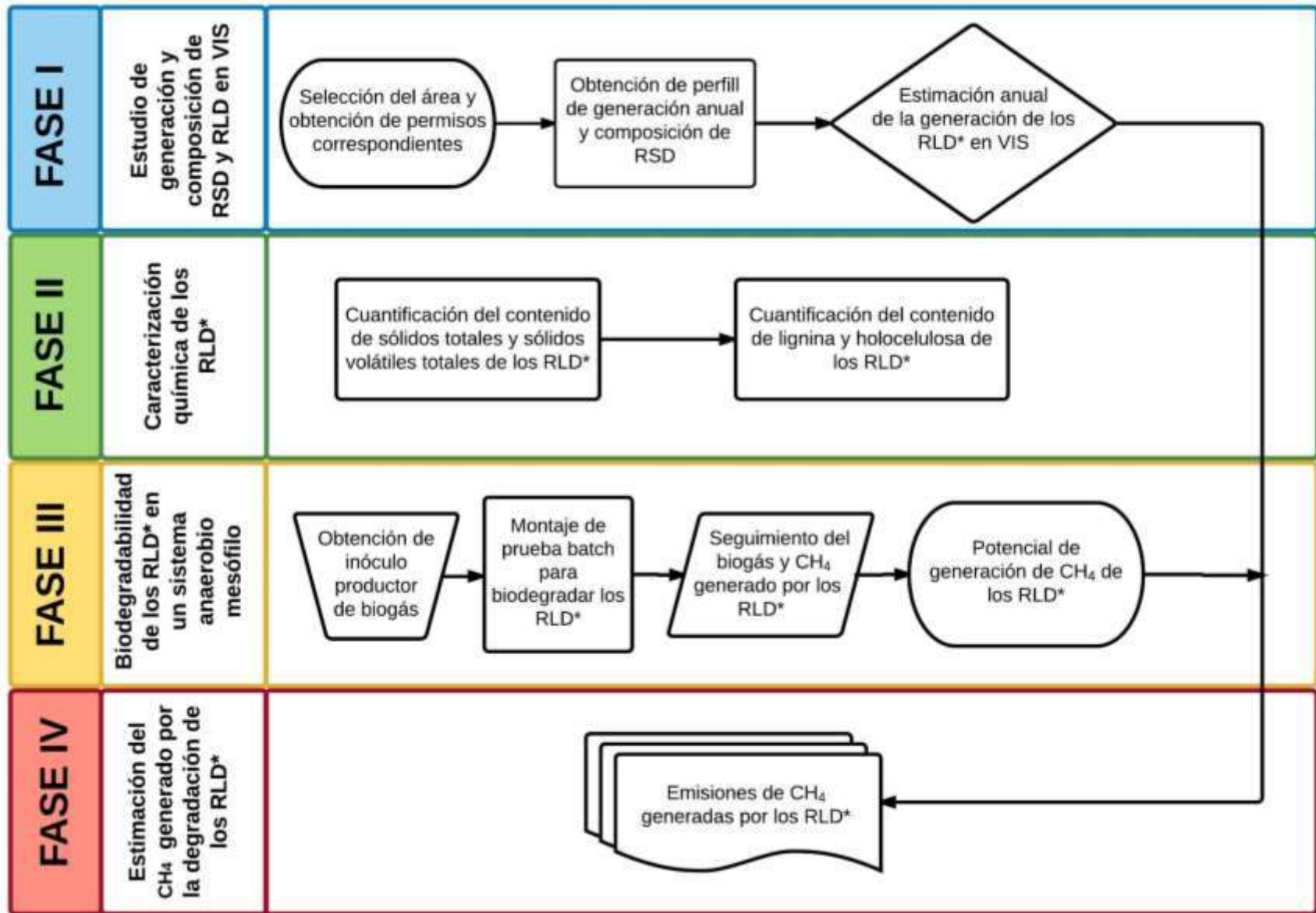
Actividad 2. Montaje de prueba batch para biodegradar los RLD

Actividad 3. Seguimiento del biogás y CH₄ generado por los RLD

Actividad 4. Estimación del potencial de generación de CH₄ de los RLD

FASE IV. Emisiones de CH₄ en un vertedero por la disposición y degradación de los RLD

Actividad 1. Estimación del CH₄ generado por los RLD en un vertedero



1 *PB, PG, PP, PS y PC

7.2. DESARROLLO METODOLÓGICO

7.2.1 Estudio de generación y composición de RSD y RLD generados en VIS

El estudio de generación y composición de RSD y RLD generados en VIS se realizó de acuerdo el diagrama de la **Figura 8**.

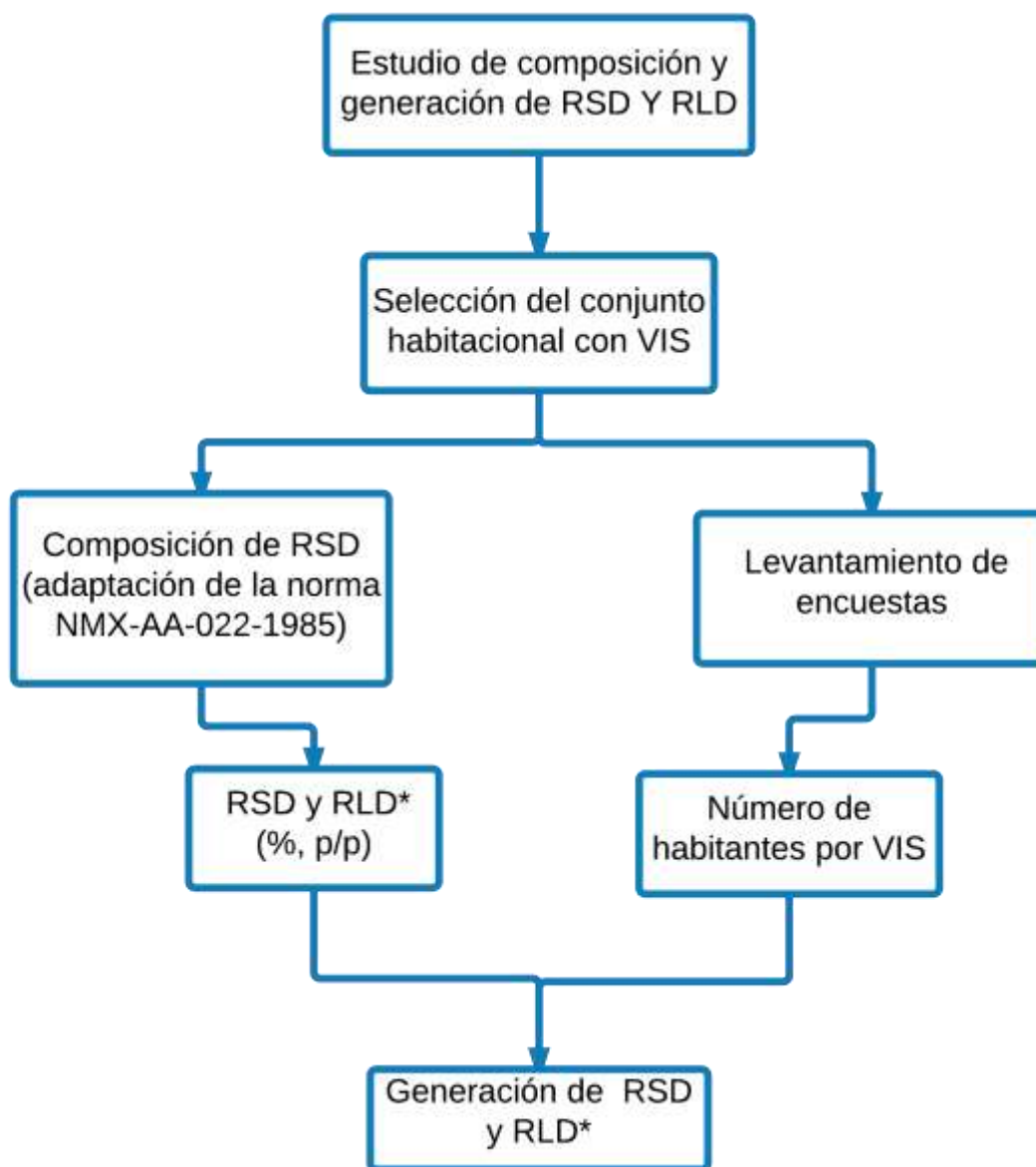


Figura 8. Diagrama del desarrollo metodológico del estudio de composición y generación de los residuos lignocelulósicos domésticos.

*PB, PG, PS, PP y PC

7.2.1.1 Sitio de muestreo

El área de estudio fue dentro del municipio de Morelia, Michoacán, el cual se encuentra localizado a una latitud de 19°41'19" N, una longitud de 101°10'34" W y una altura de 1,908 MSNM. Tiene una temperatura anual de 18.7°C y una precipitación de 770.5 mm anuales (SNM, 2015).

El conjunto habitacional con viviendas tipo interés social seleccionado fue "San Mateo". Se ubica dentro del sector "Independencia" (sector que ha tenido el mayor desarrollo de éste tipo de viviendas) sobre la avenida San Juanito Itzícuarro (**Figura 9**). Tiene un porcentaje de 75% de viviendas habitadas y la recolección de RSD es realizada por un solo transporte recolector de lunes a domingo a excepción del día jueves.

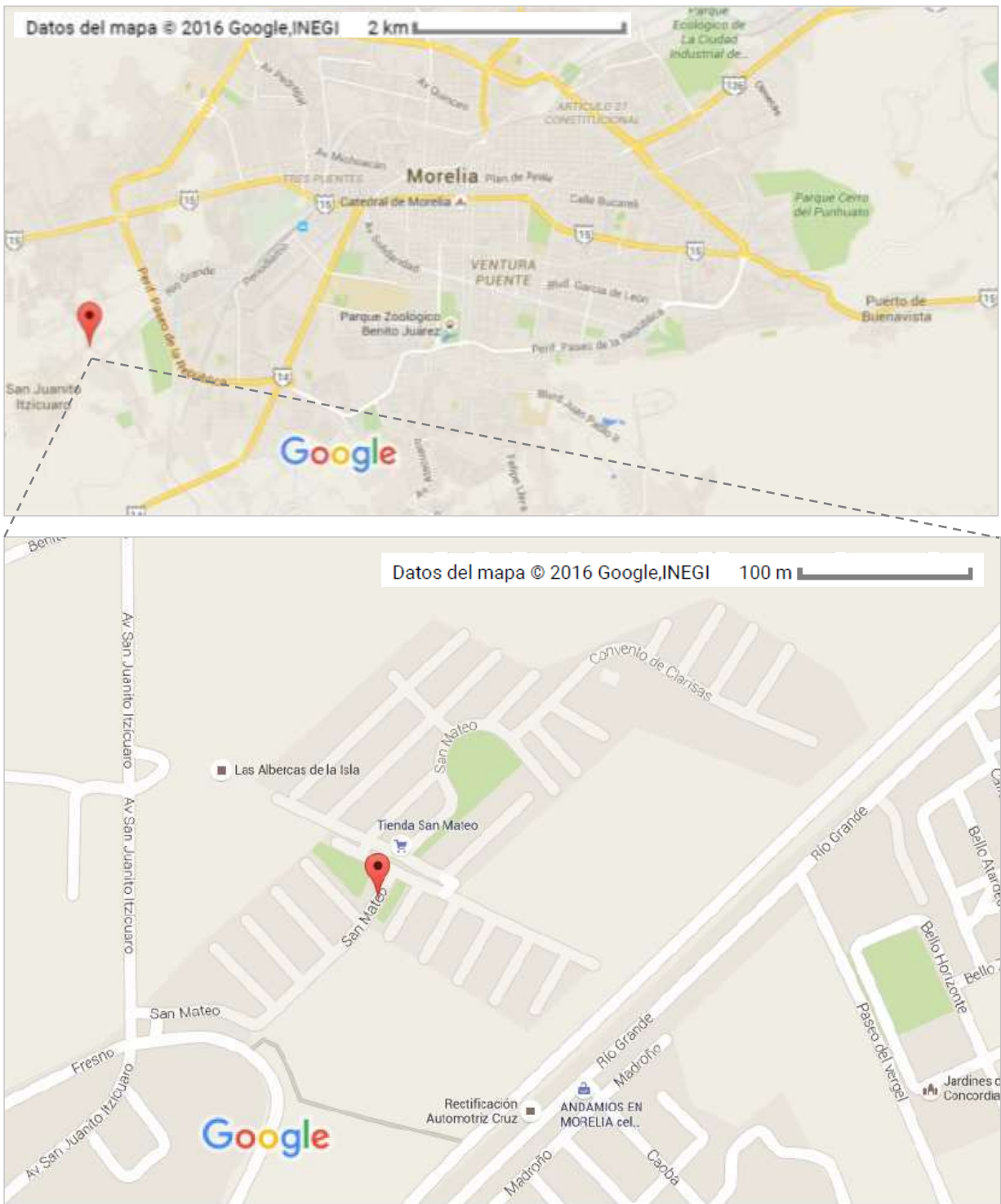


Figura 9. Ubicación del Conjunto habitacional de viviendas tipo interés social “San Mateo” al suroeste de Morelia, Michoacán.

7.2.1.2 Composición

La recolección de los RSD del conjunto de VIS se realizó por medio del recolector de basura de la zona, en la época de verano (julio-agosto) de 2015. Los RSD se trasladaron al laboratorio de Residuos Sólidos y Uso Eficiente de la Energía del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se tomó una muestra de 90 kg aproximadamente (Tchobanoglous *et al.*, 1994) para la cuantificación de subproductos de acuerdo a la adaptación de la norma NMX-AA-022-1985. La adaptación consistió en subdividir la categoría de papel en sus derivados papel glossy (PG), papel periódico (PP), papel bond (PB) y papel sanitario (PS). Los subproductos fueron los siguientes:

Algodón	Papel glossy (PG)
Aluminio	Papel sanitario (PS)
Cartón	Papel periódico (PP)
Cuero	Pañal y toallas sanitarias
Residuo Fino	Polietileno
Envase de cartón encerado (Tetrabrik)	Polietileno de alta densidad
Fibra dura vegetal	Policloruro de vinilo
Fibras sintéticas	Polietileno de baja densidad
Hueso	Polipropileno
Hule	Poliestireno
Latas	Poliuretano
Loza y cerámica	Residuos alimenticios
Madera	Residuos de jardinerías
Material de construcción	Trapos
Material ferroso	Vidrio de color
Papel bond (PB)	Vidrio transparente
	Otros

La muestra de RSD se vació sobre una mesa cubierta con plástico y se procedió a la clasificación de los subproductos (se utilizaron recipientes y bolsas de plástico) y posteriormente fueron pesados. Los resultados se anotaron en una hoja de cálculo (Excel) y se determinó el porcentaje relativo (**Ecuación 3**) de cada uno de los subproductos.

Ecuación 3

$$\text{Porcentaje del subproducto (\%, p/p)} = \frac{\text{Peso del subproducto}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

7.2.1.3 Generación

Para conocer el número de habitantes por VIS en el conjunto habitacional se realizó una encuesta aleatoria. Para determinar el tamaño de muestra (n) se utilizó la **Ecuación 4** de acuerdo con Murray R. *et al.*, (2009)

Ecuación 4

$$n = \frac{K^2 pqN}{(e^2(N - 1)) + (K^2 pq)}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

K = Constante del nivel de confianza (1.88)

p = Porcentaje de viviendas habitadas y con servicio de recolección (0.73)

q = Porcentaje de viviendas no habitadas y sin servicio de recolección (0.27)

N = Número total de viviendas (412)

e = Error muestral (0.006)

Se pesó el camión vacío y durante el estudio de composición (después de recolectar los RSD en el conjunto habitacional) y por diferencia de pesos, se determinó el total de RSD. Finalmente, se calculó la generación per cápita de RSD dividiendo el total de RSD entre el número de habitantes en el conjunto habitacional y para el caso de los RLD se utilizó el porcentaje relativo de los subproductos y el total de RSD.

7.2.2 Caracterización química de los residuos lignocelulósicos domésticos

Cada uno de los RLD (PB, PG, PS, PP y PC) se trituró por separado en un molino de martillos para rastrojo con una criba de tamaño de abertura de 4 mm y se almacenaron hasta su utilización.

7.2.2.1 Cuantificación de sólidos totales y sólidos volátiles totales

Se determinó el contenido de sólidos totales (ST, %, p/p) por triplicado y se utilizó la **Ecuación 5 y 6**. Se pesó 5g de muestra (de cada RLD) en una balanza (Ohaus Explorer Pro: 110 g, $\sigma=0.1$ mg) utilizando una cápsula que previamente fue puesta a peso constante (**Anexo 1**). Se secó en el horno durante 24/110°C, se colocó en un desecador y se determinó su peso hasta alcanzar peso constante.

Ecuación 5

$$\text{Humedad (\%, p/p)} = \frac{\text{Peso de la muestra} - \text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Ecuación 6

$$ST (\%, p/p) = 100 - \text{humedad}$$

Se determinó el contenido de sólidos volátiles totales (SVT, %ST) por triplicado y se utilizó la **Ecuación 7**. Se introdujo la cápsula con el contenido de RLD proveniente del horno y se colocó en la mufla a 550°C durante 20 min, posteriormente se sacó y enfrió a temperatura ambiente en desecador y se determinó su peso hasta alcanzar peso constante.

Ecuación 7

$$STV = \frac{\text{Peso de la muestra seca (horno)} - \text{Peso de la muestra calcinada}}{\text{Peso de la muestra seca (horno)}} * 100$$

7.2.2.2 Cuantificación de lignina y holocelulosa

a) Extracción preliminar de lignina

El contenido de extraíbles (RunCang *et al.*, 2000) se calculó mediante la **Ecuación 8**, de acuerdo al siguiente procedimiento descrito:

1. Se pesó un dedal de extracción de celulosa de porosidad fina (25x80 mm, Whatman), y 3 g de muestra, posteriormente se colocó en el aparato de extracción Soxhlet de 500 ml a una temperatura de operación de 110°C.

2. Se extrajo con 200 ml del alcohol etílico al 95% (Química Meyer) a reflujo, seguido de 200 ml de solución etanol-tolueno (J T. Baker) y finalmente con agua destilada de manera sucesiva por 4 horas cada uno. La solución etanol-tolueno se preparó mezclando un volumen de alcohol etílico (95%) y dos volúmenes de tolueno en un matraz Erlenmeyer de 2000 cc, 667 cc de alcohol etílico (95%) y 1333 cc de tolueno (97.97%).

3. Se lavó con 100 ml de agua destilada y finalmente con 50 ml de alcohol etílico (95%) para facilitar la extracción de la muestra del crisol.

4. Se secó a 103°C en horno por 30 minutos y se enfrió en un desecador hasta peso constante.

Ecuación 8

$$\text{Extraíbles} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso de la muestra libre de extraíbles})}{\text{Peso inicial}} * 100$$

La muestra obtenida de libre de extraíbles se utilizó para determinar holocelulosa y lignina.

b) Holocelulosa

Se calculó mediante la **Ecuación 9** (Wise, 1946) mediante el siguiente procedimiento:

1. Se colocó 1g de muestra libre de extraíbles en un matraz Erlenmeyer.

2. Se adicionó 0.3 g de NaClO₂ (Química Meyer) y 50 ml de agua destilada con 2 gotas de ácido acético (Golden bell).

3. Se tapó la muestra con vidrio de reloj y se llevó a baño maría a 75°C por 4 horas.

4. Se adicionó 0.3 g de NaClO₂ (Química Meyer) y 2 gotas de (Golden bell). Se repitió la adición de clorito de sodio y ácido acético cada hora 2 veces más.

5. Se enfrió la muestra en agua con hielo. Se filtró en un embudo Buchner al vacío con papel filtro #40 (Whatman).

6. Se lavó con 100 ml de agua destilada y 10 ml de acetona (J. T. Baker).

7. Se secaron las muestras a 40 °C durante 3 días en horno y se pesó hasta peso constante en desecador.

Ecuación 9

$$\text{Holocelulosa} = \frac{\text{Peso de la muestra (lignina extraída)}}{\text{Peso de la muestra libre de extraíbles}} * 100$$

c) Lignina

El contenido de lignina (Runkel y Wilke, 1951) se calculó mediante la **Ecuación 10** de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se pesó 1 g de la muestra libre de extraíbles a un matraz Erlenmeyer de 250 ml.

2. Se agregó removiendo lentamente 50 ml de ácido sulfúrico (98% REASOL) frío (12-15°C).

3. El matraz se tapó con plástico auto adherible (Kleen pack) y se homogenizó vigorosamente durante 1 min.

4. Se dejó reposar 2 h a una temperatura de 18-20 °C en un baño de agua.

5. Se agregó 200 ml de agua destilada.

6. Se llevó a ebullición por 5 min.

7. Se dejó que el material insoluble se precipitara, se filtró en un crisol Gooch previamente secado a 100-105 °C y se pesó en un frasco de vidrio con tapa.

8. Se lavó el residuo libre de ácido con 500 ml de agua destilada caliente y se secó el crisol y su contenido en horno durante 2 horas a 103 °C.

9. Se colocó el crisol en una pesa filtros y se enfrió en un desecador.

10. Se pesó el contenido del crisol como lignina hasta llegar a peso constante.

Ecuación 10

$$\text{Lignina} = \frac{\text{Peso de la muestra (holocelulosa extraída)}}{\text{Peso de la muestra libre de extraíbles}} * 100$$

7.2.3 Prueba de biodegradabilidad de los residuos lignocelulósicos domésticos

Para degradar los diferentes RLD (PB, PG, PS, PP y PC) se obtuvo primeramente un inóculo activo, es decir, un inóculo productor de biogás.

7.2.3.1 Obtención de inóculo productor de biogás

a) **Montaje:** Para la obtención de un inóculo productor de biogás se utilizaron los materiales descritos en la **Tabla 10**. Se mezclaron manualmente en un reactor anaerobio (Frasco de vidrio de 2 L) con una espátula hasta obtener una consistencia homogénea

Tabla 10. Materiales para obtención de inóculo productor de biogás

Material	Cantidad	Características
Suelo orgánico	350 g	Tierra negra para jardín. Marca Nutrigarden disponible en tiendas departamentales.
Excretas de vaca	350 g	No más de 3 h de excretada.
Lodos de reactor anaerobio de flujo ascendente*	350 ml	Se utilizó el sobrenadante, después de la sedimentación en conos Imhoff.
Carbonato de sodio (NaCO ₃).	5 g	Marca Baker, grado reactivo.
Sacarosa (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	5 g	Meyer, grado reactivo.

*Los lodos residuales se obtuvieron de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Quiroga, Michoacán, la cual cuenta con un Reactor de Flujo Ascendente.

Se cerró herméticamente y se colocaron en una cámara de incubación a 35°C. La tapa contaba con dos salidas, una para la toma de muestras de biogás y otra para medición del biogás producido.

b) Medición de biogás: El sistema de medición de biogás (**Figura 10**), estuvo conformado por dos frascos de vidrio de 4 L con una graduación de 50 cm cada uno. Uno de los frascos contenía una solución de 3 L de salmuera (357.14 g NaCl/L) con un pH de 4. Los frascos de vidrio tenían mangueras interconectadas adaptadas con llaves que al alternar el cerrado o apertura de las mismas condujo al biogás para la medición indirecta a través del desplazamiento de la salmuera.

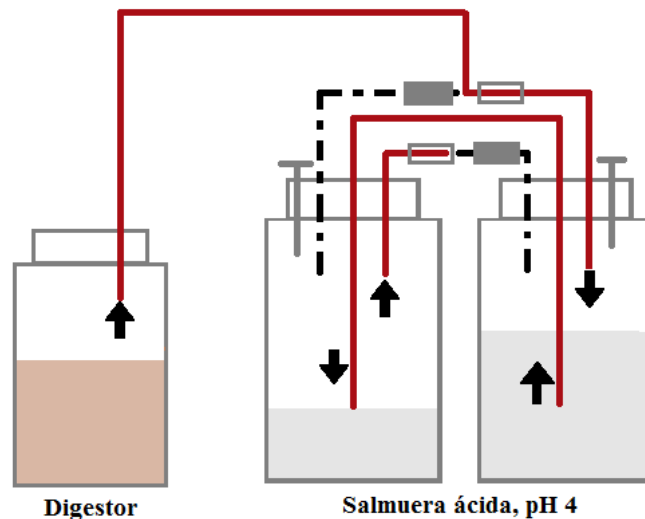


Figura 10. Reactor de digestión anaerobia interconectado a un sistema de medición de biogás por desplazamiento.

Fuente: Tomado y modificado de Baltierra-Trejo *et al.* (2012)

c) Alimentación: Se alimentó cada 5 días con 8.6 g de papel bond, 12.4 de residuos orgánicos, 39 ml de agua destilada y 1.6 ml de lodos biológicos (Poggi *et al.*, 1997). Antes de alimentar se mezclaba con una espátula y se tomaba una muestra aproximada de 30 g para determinar el contenido de humedad, ST, STV y pH (ver anexo I y procedimiento 8.2.2.1). Al finalizar, se tapó inmediatamente y se realizaron succiones de aire con una jeringa de 30 ml, esto para dejar en condiciones de vacío.

Los residuos orgánicos eran residuos de piña, melón, mango y jícama (**Tabla 11**). Se deshidrataron en horno a 105°C/24 h y posteriormente, se trituraron en un molino de martillos para rastrojo con criba de 4 mm, hasta obtener una consistencia granulosa fina y se almacenaron hasta su utilización.

Tabla 11. Composición de residuos orgánicos para alimentación

Residuos orgánico	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Jícama	229.7	34.2
Piña	92.6	13.8
Melón	74.3	11.1
Mango	275.4	40.9
Total	672.0	100.0

El papel bond se obtuvo de hojas de desecho de oficina, el cual se desmenuzó en tiras de 5x20 cm y se trituró en un molino de martillos para rastrojo con una criba de tamaño de abertura de 4mm.

7.2.3.2 Prueba batch para biodegradar los residuos lignocelulósicos domésticos

a) Montaje: Se montaron botellas de vidrio (250 ml) y se agregó 1 g (base seca) de cada uno de los RLD (PC, PB, PG, PS y PP), inóculo y 100 ml de agua destilada para obtener en total de 10 g base seca (**Tabla 12**). Las botellas se taparon con tapones suba-seal® # 33, se sellaron con silicón y se les colocó un cincho de plástico para asegurar que la presión no botara el tapón, se sometieron a flujo de nitrógeno para desplazar el oxígeno del espacio vacío y se incubaron a 35°C por 200 días. Todos los RLD se montaron por cuadruplicado y como control activo se utilizó inóculo y agua destilada y como control pasivo, RLD y agua destilada.

Tabla 12. Montaje de prueba para biodegradar los residuos lignocelulósicos domésticos

Residuo lignocelulósico doméstico	Simbología	Cantidad* (g)	Agua destilada (ml)	Inoculo* (g)	Replicas
Control activo	CA	-	100	9	4
Papel bond	PB	1	100	9	4
Papel glossy	PG	1	100	9	4
Papel periódico	PP	1	100	9	4
Cartón	PC	1	100	9	4
Papel sanitario	PS	1	100	9	4
Control papel bond	CPB	1	100	-	4
Control papel glossy	CPG	1	100	-	4
Control papel periódico	CPP	1	100	-	4
Control cartón	CPC	1	100	-	4
Control papel sanitario	CPS	1	100	-	4
Total					44

*Base seca

b) Seguimiento de producción de biogás y CH₄: Cada 7 días se midió el contenido de CH₄ mediante un cromatógrafo de gases con detector de ionización de flama (modelo Varian CP-3800, No. de catálogo ZW 3609, empacada por OHIO VALLEY Specialty Company). Como gas acarreador se utilizó N₂ y las condiciones de operación del flujo fueron 12 ml/min y la temperatura del horno, inyector y detector fueron de 40, 150 y 250 °C respectivamente. El biogás se midió por desplazamiento de líquido. Se utilizó un sistema de medición con salmuera y dos probetas de 50 ml interconectadas por mangueras. Al terminar cada medición de CH₄ y biogás, se barrió nuevamente con N₂.

c) Cálculo del rendimiento de CH₄: Con el promedio de la generación de CH₄ de cada RLD (cuadruplicados de muestras) se comparó con su control activo. Se utilizó la **Ecuación 11** reportada por Yuan *et al.* (2012) en el que el rendimiento de CH₄ (Y_{CH₄}) se reporta en unidades de ml/g SVT.

Ecuación 11

$$Y_{CH_4} = \frac{(\text{volumen de } CH_4)_{RLD} - (\text{volumen de } CH_4)_{control}}{g \text{ de SVT}}$$

Donde:

$$Y_{CH_4} = \text{Rendimiento de metano}$$

7.2.4 Estimación del volumen de CH₄ generado por la degradación de los residuos lignocelulósicos domésticos respecto a su tasa de generación

Se estimó el volumen de CH₄ que se genera por la disposición y degradación de los RLD (PB, PG, PS, PP y PC) respecto a su tasa de generación dentro de la corriente de RSD (**Ecuación 12**). Se tomaron los datos obtenidos en las Secciones 8.2 y 8.3 (generación y Y_{CH_4} del PB, PG, PS, PP y PC).

Ecuación 12

$$CH_4_{RLD} = Y_{CH_4} * \text{Generación de RLD provenientes de la VIS}$$

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 ESTUDIO DE GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS

8.1.1 Tasa de generación de los residuos sólidos domésticos

El conjunto habitacional con viviendas tipo interés social “San Mateo” tiene 412 viviendas habitadas que cuentan con servicio de recolección de RSD. Para conocer el número de habitantes por VIS se realizó una encuesta y para determina el tamaño de muestra (n) se utilizó la **Ecuación 4** (ver **Sección 7.2.13**) de acuerdo con Murray R. *et al.*, (2009). Se obtuvo que en promedio el número de habitantes en el conjunto habitacional es de 3 habitantes/VIS.

El presente trabajo reveló que la cantidad de RSD generados en el conjunto habitacional “San Mateo” en la época de verano fue de 621.4 kg/día, es decir, un promedio diario per cápita de 0.503 kg/hab (**Figura 11**). El análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey-Kramer reveló que no hay diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre la generación per cápita del fin de semana (sábado y domingo) y los “días de trabajo” (de lunes a vierdes), es decir, la generación de RSD es igual todos los días de la semana. Estos resultados son contrarios a lo reportado por Binxian Gu *et al.* (2015), quienes señalan que los días de mayor generación es el fin de semana (sábado y domingo).

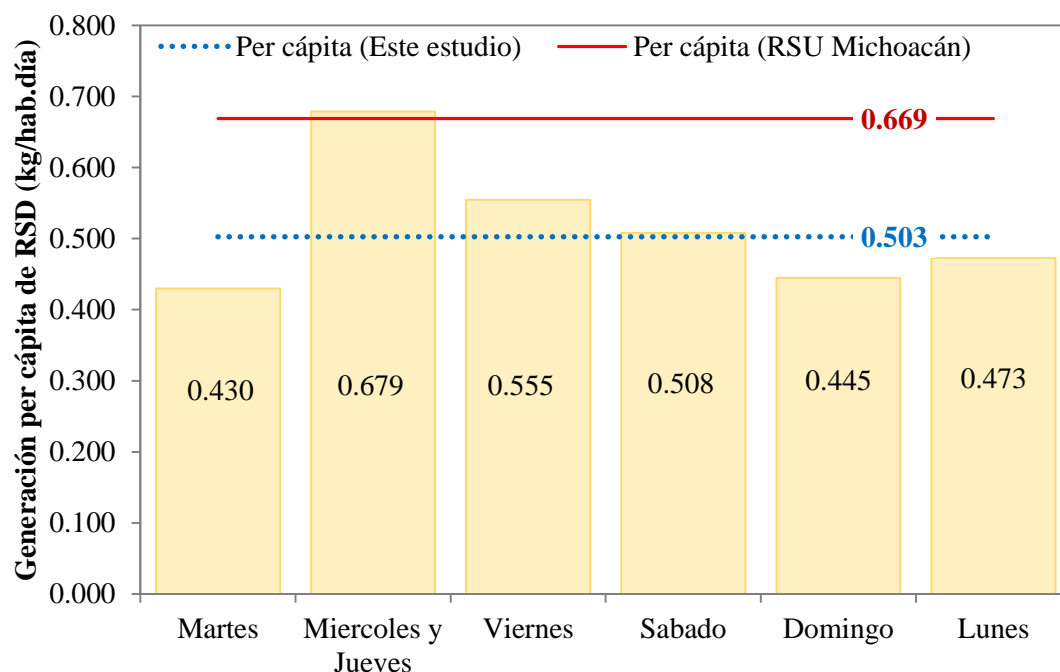


Figura 11. Generación per cápita de residuos sólidos domésticos durante una semana

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2012a), para el estado de Michoacán, el promedio diario per cápita de RSU es de 0.669 kg/hab. Sin embargo, en el presente trabajo se encontró que los habitantes de una vivienda tipo interés social generaron 25% menos RSD. Es decir, a pesar de que en México se reportan los promedios per cápita por zonas y estados, éstos no siempre reflejan la realidad de casos particulares.

8.1.2 Composición de los residuos sólidos domésticos

De la muestra caracterizada (de acuerdo a la metodología descrita en la **Sección 7.2.1.2**) se obtuvo la siguiente composición de RSD (**Tabla 13**). El rubro de mayor tasa de generación fueron los alimenticios ($47.4 \pm 5.4\%$), en segundo lugar los pañales y toallas sanitarias ($7.8 \pm 3.0\%$) y en tercer lugar el PC ($4.8 \pm 1.6\%$).

1

Tabla 13. Porcentaje de los subproductos generados en el conjunto habitacional de vivienda de interés social.

Residuos sólido doméstico	Mar	Mier Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Promedio por día	σ
	(% , p/p)							
Alimenticios	50.9	56.3	43.8	47.0	41.5	45.0	47.4	5.4
Pañal y toallas sanitarias	8.1	4.2	12.6	8.1	5.00	8.7	7.8	3.0
Cartón (PC)	4.2	3.1	3.7	4.3	7.5	5.8	4.8	1.6
Papel sanitario (PS)	5.3	3.5	5.1	4.9	0.2	6.9	4.3	2.3
Polietileno de baja densidad	3.5	4.6	4.8	4.4	5.00	5.0	4.5	0.6
Otros**	3.6	3.1	7.6	3.4	2.8	2.3	3.8	1.9
Polietileno de alta densidad	3.4	2.3	5.1	5.0	3.6	3.1	3.8	1.1
Jardinería	4.0	9.2	1.7	0.6	2.0	1.9	3.2	3.1
Trapos/textil	2.1	2.6	1.1	4.1	5.6	4.9	3.4	1.8
Vidrio transparente	2.1	1.6	4.3	4.1	3.9	2.7	3.1	1.1
Papel bond (PB)	1.5	0.7	2.1	2.8	4.2	2.0	2.2	2.0
Polietileno	1.9	3.1	1.7	1.9	2.0	1.0	1.9	0.7
Papel glossy (PG)	0.6	0.4	1.2	1.0	4.1	2.2	1.6	1.4
Envase de cartón encerado.	1.5	0.9	2.0	0.6	1.1	2.0	1.4	0.6
Poli estireno	1.1	1.6	1.0	0.7	1.8	1.5	1.3	0.4
Vidrio de color	1.8	1.5	NE	1.1	1.6	1.0	1.2	0.7
Aluminio	1.1	0.3	1.0	1.0	2.0	0.5	1.0	0.6
Madera	0.2	0.0	0.1	0.8	4.2	1.0	1.0	1.6
Polipropileno	1.0	0.4	0.6	0.9	0.7	0.7	0.7	0.2
Latas	0.9	0.2	0.3	1.0	0.4	0.6	0.6	0.3
Peligrosos*	0.4	0.1	0.4	2.2	0.0	0.4	0.6	0.8
Papel periódico (PP)	0.5	NE	0.2	NE	0.9	0.7	0.4	0.4
Material ferroso	0.5	0.3	NE	NE	NE	NE	0.1	0.2

2

3

*Medicamento caduco, pilas y electrónicos. **Algodón, cuero, residuos fino, fibra dura vegetal, fibras sintéticas, hueso, hule, loza y cerámica, material de construcción, PVC, poliuretano, carbón, pelo, bachichas. Desviación estándar (σ). No encontrado (NE).

De acuerdo a la literatura, los resultados mostrados en la **Tabla 13** coinciden con el reporte general de que los residuos alimenticios son la principal categoría de RSD (47.4%). Como segunda mayor categoría, Binxian Gu *et al.* (2015), Taobada-González *et al.* (2011) y Rodríguez *et al.* (2010) señalan al papel y cartón debido a que la población cada vez más compra productos con embalajes. Lo anterior es similar a lo encontrado en este trabajo, ya que en conjunto las categorías de PB, PG, PS, PC y PP representan el 13.3 % de los RSD.

Es importante señalar que la composición encontrada para la categoría de pañales y toallas sanitarias (7.8%) fue atípica. Este rubro se posiciona por lo regular en el cuarto o quinto lugar según Binxian Gu *et al.* (2015), Thanh *et al.* (2010), Rodríguez *et al.* (2010), entre otros. Sin embargo, otros estudios inéditos de este laboratorio revelan una tendencia constante en la generación de estos residuos, atribuido principalmente a la existencia de familias jóvenes en el conjunto habitacional.

Si se analiza la composición de los RSD (**Tabla 13**) por día de la semana, se observa que el domingo se generó la mayor cantidad de PC, PB, PG, aluminio y madera, mientras que el menor fueron los alimenticios. Estos resultados fueron similares (excepción de los alimenticios) a lo reportado por Thanh *et al.* (2010) y Binxian Gu *et al.* (2015), quienes explican que se debe porque las familias utilizan el fin de semana (sábado y domingo) para realizar las compras de la semana y la limpieza del hogar. Los resultados obtenidos para el rubro de los alimenticios, revelan que las familias salen a comer fuera de casa.

Se comparó la composición de RSD del presente trabajo con el promedio nacional de RSU (**Tabla 14**). Se observa la variación en la composición de cada categoría, siendo los más evidentes los rubros de residuos alimenticios, plásticos y papel; ya que en este estudio se encontró una composición mayor para estas categorías.

Tabla 14. Composición de los residuos sólidos domésticos del presente trabajo y el promedio nacional de residuos sólidos urbanos

Subproducto	Composición (%)		
	RSU (promedio nacional) ^c	RSD (este estudio)	Diferencia
Alimenticios	25.6	47.4	-21.9
Plástico*	7.2	12.3	-5.1
Cartón	6.5	4.8	1.8
Pañal desechable	6.5	7.8	-1.3
Papel ^a	6.2	8.5	-2.3
Vidrio transparente	4.0	3.1	0.9
Vidrio color	2.6	1.2	1.4
Latas	2.3	0.6	1.7
Material ferroso	2.1	0.1	2.0
Envase de cartón encerado	1.5	1.4	0.1
Otros ^b	35.5	12.9	22.6
Total	100	100	

^aPlástico rígido y de película (HDPE, LDPE, PET y PP). ^{**}Papel (glossy, periódico, bond y sanitario). ^bOtros (Fibra sintética, poli estireno expandido, hule, lata, poliuretano, cuero, fibra dura vegetal, hueso, residuos de jardinería, madera, residuos fino, algodón, trapo, loza y cerámica). ^cINECC (2012a).

8.1.3 Generación de los residuos lignocelulósicos domésticos

De acuerdo con los resultados de generación y composición de los RSD (Sección 8.1.1 y 8.1.2), se estimó la cantidad total de RLD generados en el conjunto habitacional (Tabla 15). Se observa que el PC y el PS son los de mayor generación, mientras que el PP es el de menor. El análisis estadístico (ANOVA) y prueba de Tukey-Kramer reveló una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre la generación de los residuos del PS y el PC, con el PB y el PG y a su vez, diferente al PP.

Tabla 15. Residuos lignocelulósicos domésticos generados por el conjunto habitacional "San Mateo".

Residuo lignocelulósico doméstico	%	Semanal (kg)	Anual (ton)
Cartón	4.8 ^a	208.8	10.9
Papel sanitario	4.3 ^a	187.9	9.8
Papel bond	2.2 ^b	95.7	5.0
Papel glossy	1.6 ^{bc}	69.6	3.6
Papel periódico	0.4 ^c	17.4	0.9
Total	13.3	579.4	30.2

Las letras indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre medias a una probabilidad $\alpha=0.05$.

Según datos de la Cámara de papel (2012) se reporta que el 50% de los RSU generados de papel y cartón se reciclan; sin embargo, los RSD de Morelia no cumplen este estadístico nacional, ya que la recolección en el conjunto habitacional "San Mateo" no es selectiva.

Es importante señalar que la cantidad de residuos de PS (9.8 ton/año) es de interés crítico, debido a las implicaciones sanitarias que tiene la exposición de material fecal por parte de los recolectores de RSD y de los pepenadores. En Morelia existen varias fábricas de lámina de cartón acanalada que demandan como materia prima el PS, por lo cual, este último es separado por los pepenadores; sin embargo, la disposición de este material dentro del sistema de drenaje es inviable y posiblemente más contradictoria, ya que la ciudad aún no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas negras.

8.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DOMÉSTICOS

Se determinó el contenido de holocelulosa, lignina, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles totales (SVT) del PB, PG, PS, PC y PP, de acuerdo a la metodología descrita en la **Sección 7.2.2** del presente trabajo. En la **Figura 12** se muestra el porcentaje de ST (% p/p) de los diferentes RLD y se observa que el PG presentó la mayor cantidad de ST ($99 \pm 0.2\%$), mientras que el PP fue el de menor ($98 \pm 0.1\%$). El análisis estadístico de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey-Kramer revelaron una diferencia significativa ($\alpha=0.05$, $n=3$) entre el contenido de ST de todos los RLD, a excepción del PB y el PS (similares entre ellos).

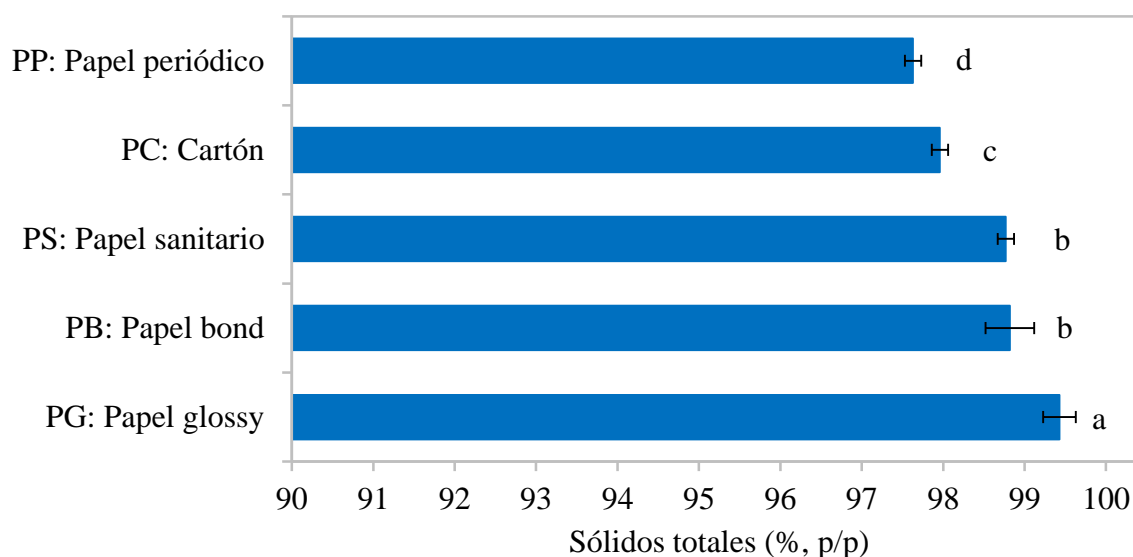


Figura 12. Contenido de sólidos totales (ST) de los residuos lignocelulósicos domésticos.

Los datos representan el promedio de los triplicados y las letras indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con una probabilidad de $\alpha=0.05$ y $n=3$.

El contenido de SVT (% ST, p/p) de los RLD se muestra en la **Figura 13**. Se observa que el PS tuvo la mayor cantidad de SVT ($99 \pm 0.2\%$), mientras que el PG fue el de menor ($68 \pm 1.6\%$). El ANOVA y la prueba de Tukey-Kramer revelaron una diferencia significativa ($\alpha=0.05$, $n=3$) entre el contenido de SVT de todos los RLD.

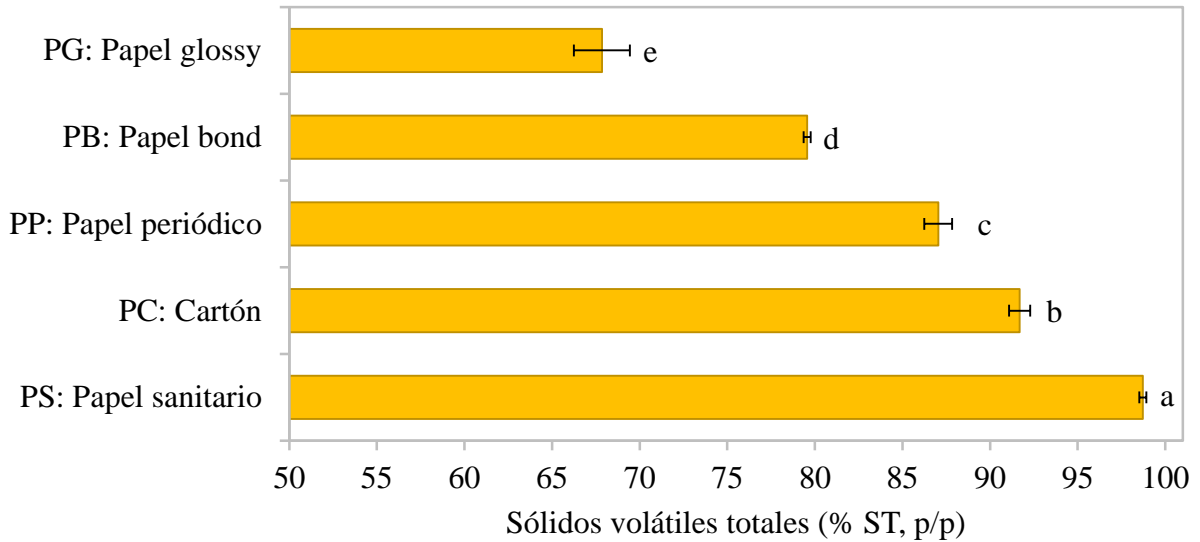


Figura 13. Contenido de sólidos volátiles totales de los residuos lignocelulósicos domésticos
Los datos representan el promedio de los triplicados y las letras indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con una probabilidad de $\alpha=0.05$ y $n=3$.

En la **Figura 14** se muestra el contenido de lignina y holocelulosa (% ST, p/p) de los diferentes RLD. El PP fue quien tuvo el mayor porcentaje de lignina ($25 \pm 1.2\%$), mientras que el menor fue el PS ($1.0 \pm 0.1\%$). El ANOVA y la prueba de Tukey-Kramer revelaron una diferencia significativa ($\alpha=0.05$ y $n=3$) entre todas las medias del contenido de lignina, a excepción del PS y el PB (similares entre ellos). Por otro lado, el porcentaje de holocelulosa osciló del $63 \pm 1.2\%$ (PP) al $86 \pm 0.1\%$ (PB) y estadísticamente todos fueron diferentes ($\alpha=0.05$ y $n=3$) con respecto al contenido de holocelulosa, a excepción del PS y el PB (similares entre ellos).

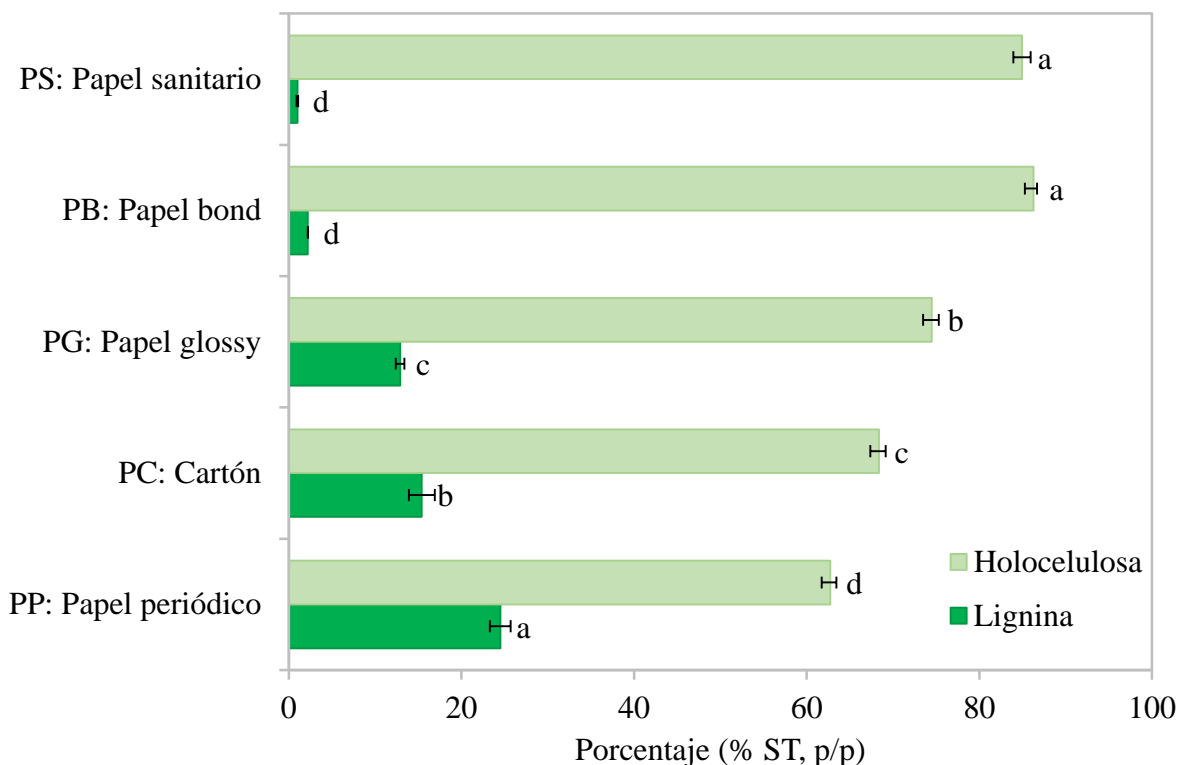


Figura 14. Contenido de lignina y holocelulosa de los residuos lignocelulósicos domésticos.

Los datos representan el promedio de los triplicados y las letras indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre medias con una probabilidad de $\alpha=0.05$ y $n=3$.

En la **Tabla 16** se muestra la composición química de los RLD de este y otros estudios. Con respecto al contenido de lignina, se observa que los RLD de este trabajo tuvieron un orden similar al reportado en la literatura (PP>PC>PG>PB>PS). Sin embargo, según Wang *et al.* (2015) y Dara *et al.* (2016) la composición química del papel y derivados depende del método (químico o mecánico) utilizado durante su fabricación, es decir, no hay composición química “estándar”, ya que la industria del papel emplea diferentes materias primas y procesos de acuerdo al producto deseado.

Tabla 16. Caracterización química de los residuos lignocelulósicos domésticos en la literatura.

Residuo lignocelulósico doméstico	ST (% p/p)	Lignina (% ST)	Holocelulosa		Referencia
			Celulosa (% ST)	Hemicelulosa (% ST)	
PP: Papel periódico	98	25	63		[1]
	NC	25	44	18	[2]
	NC	24	48	9	[3]
	91	24	NC	NC	[7]
	93	23	69	13	[4]
	NC	NC	22	2	[5]
	93	23	NC	NC	[6]
PC: Cartón	NC	21	57	10	[3]
	95	18	57	11	[4]
	NC	16	66	14	[8]
	98	15	68		[1]
	93	13	NC	NC	[7]
	86	5	46	5	[9]
	NC	NC	57	3	[5]
PG: Papel glossy	94	16	NC	NC	[7]
	NC	15	42	9	[3]
	99	13	75		[1]
	NC	11	38	10	[2]
PB: Papel bond	99	2	86		[1]
	NC	2	87	8	[3]
	54	2	30	2	[9]
	95	2	NC	NC	[7]
	95	1	85	12	[4]
	NC	1	60	11	[2]
	95	1	NC	NC	[6]
NC	NC	46	5	[5]	
PS: Papel sanitario	99	1	85		[1]
	NC	NC	NC	NC	[10]
	32	1	18	2	[9]

No cuantificado (NC). [1] Este estudio, [2] Wang *et al.* (2015), [3] Eleazer *et al.* (1997), [4] Yuan *et al.* (2012), [5] Kobayashi *et al.* (2012), [6] Yuan *et al.* (2014), [7] Pommier *et al.* (2010), [8] Abbassi-Guendouz *et al.* (2012), [9] Naroznova *et al.* (2016), [10] Dara *et al.* (2016).

8.3 BIODEGRADABILIDAD DE LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICO DOMÉSTICOS

Para conocer la cantidad de CH₄ que generan los diferentes tipos de papel y cartón durante la digestión anaerobia, se realizó la prueba de biodegradabilidad según la metodología de la Sección 8.4 (el inóculo se describe en el **Anexo II**).

8.3.1 Rendimiento de CH₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos

La concentración del CH₄ generado se registró durante 200 días en cada uno de los RLD. En la **Figura 15** se muestra la dinámica de cada RLD en función del rendimiento de CH₄ (Y_{CH₄}) acumulado. Durante los primeros 53 días de experimentación ninguno de los RLD generó más de 22 ml CH₄/g SVT. Después de éste periodo y hasta el día 200, solo el PB y el PG aumentaron su producción de CH₄, acumulando 902 y 504 ml CH₄/g SVT respectivamente. En la **Tabla 17** se muestra el Y_{CH₄} de cada RLD que alcanzaron al finalizar la prueba.

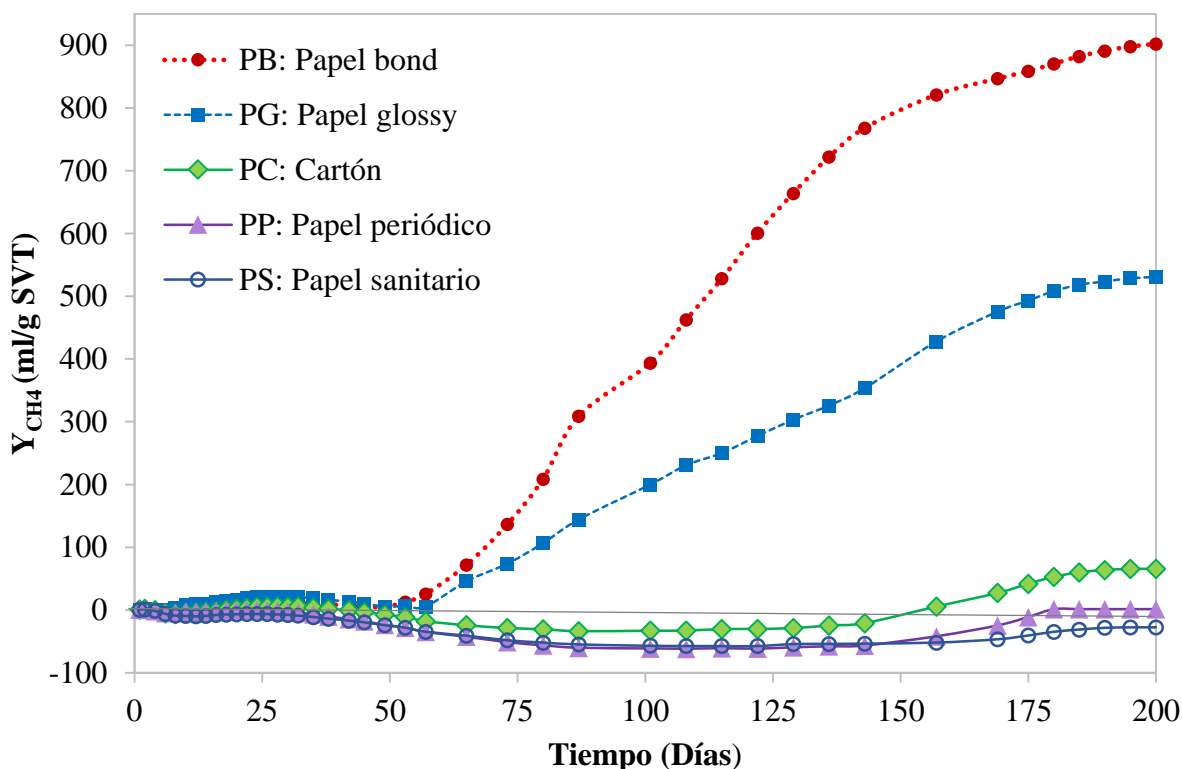


Figura 15. Dinámica de la generación de CH₄ (Y_{CH₄} acumulado) de los residuos lignocelulósicos domésticos durante su digestión anaerobia en régimen mesófilo de 35°C.

Cada punto representa el promedio de tres lecturas.

Tabla 17. Rendimiento de CH₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos

Residuo lignocelulósico doméstico	Y_{CH₄}* (ml/g SVT)	Biogás* (ml/g SVT)	Y_{CH₄}* (%, v/v)
PB: Papel bond	902	991	91
PG: Papel glossy	504	1,335	40
PC: Cartón	66	486	14
PP: Papel periódico	2	740	<0
PS: Papel sanitario	-28	193	ND

*Acumulado al día 200 de digestión anaerobia en régimen mesófilo (35°C).

ND: No detectado

La **Tabla 18** es una recopilación de datos encontrados en la literatura en relación a la degradación anaerobia de papel y cartón. Es evidente que el comparativo es difícil entre los distintos reportes, ya que existe un grupo amplio de variables involucradas. Uno de los puntos de diferencia más importante es la fase experimental. Los residuos lignocelulósicos domiciliarios comúnmente tienen una disposición final en un relleno sanitario o vertedero, por lo que el estudio de degradación de los distintos tipos de papel necesita realizarse en degradación de alta tasa (mayor a 12g/L), es decir fase sólida o semisólida. A continuación se mencionan algunas diferencias en cada rubro de RLD.

Tabla 18. Rendimiento de CH₄ de los residuos lignocelulósicos domésticos reportados en la literatura y el de esta investigación.

RLD	Lignina (% ST)	Pre tratamiento ^a	Fase experimental ^b	Régimen de temperatura	Tiempo de prueba (Días)	Y _{CH₄} acumulado (ml/g SVT)	Referencia
PB: Papel bond	2	-	Semi-sólida	Mesófilo	200	902	[1]
	NR	Biológico	Líquida	Termófilo	40	380	[2]
	2	-	Líquida	Mesófilo	45	372	[3]
	1	-	Líquida	Mesófilo	55	287	[4]
	2	-	Sólida	Mesófilo	700	214	[5]
	2	Biológico	Líquida	Mesófilo	60	184	[6]
PG: Papel glossy	13	-	Semi-sólida	Mesófilo	200	504	[1]
	12	Biológico	Líquida	Mesófilo	60	92	[6]
	15	-	Sólida	Mesófilo	230	63	[5]
PC: Cartón	NR	Biológico	Líquida	Termófilo	40	280	[2]
	3	-	Líquida	Mesófilo	45	271	[3]
	18	-	Líquida	Mesófilo	55	231	[4]
	9	-	Líquida	Mesófilo	45	202	[3]
	16	Adición de nutrientes	Semi-sólida	Mesófilo	298	197	[7]
	21	-	Sólida	Mesófilo	450	113	[5]
	15	-	Semi-sólida	Mesófilo	200	66	[1]
PP: Periódico	23	-	Líquida	Mesófilo	55	287	[4]
	NR	Biológico	Líquida	Termófilo	40	280	[2]
	24	-	Sólida	Mesófilo	450	73	[5]
	25	Biológico	Líquida	Mesófilo	60	59	[6]
	25	-	Semi-sólida	Mesófilo	200	2	[1]
PS: Papel sanitario	1	-	Líquida	Mesófilo	45	419	[3]
	NR	-	Líquida	Mesófilo	15	230	[8]
	1	-	Semi-sólida	Mesófilo	200	-28	[1]
Mezcla que contienen algún residuo de papel o cartón							
PB, PP y PC (1:1:1)	1	Biológico	Líquida	Mesófilo	10	569	[9]
Alimenticios y papel (9:1)	NR	Químico	Líquida	Termófilo	32	499	[10]
Papel diverso	NR	Biológico	Líquida	Termófilo	40	380	[2]
Alimenticios, papel y plástico (2:1:1)	NR	Térmico	Sólida	Mesófilo	37	370	[11]
PB, PP, PC y PG (1:2:3:3)	2	-	Líquida	Mesófilo	50	117	[12]

^aPretratamiento diferente al mecánico (trituración). ^bConcentración líquida (<10 %ST), semi-sólida (10 ≤ 20 % ST) y sólida (>20% ST). No reportado (NR). [1] Este estudio, [2] Kobayashi *et al.* (2012), [3] Naroznova *et al.* (2016), [4] Yuan *et al.* (2012), [5] Eleazer *et al.* (1997), [6] Wang *et al.* (2015), [7] Abbassi-Guendou *et al.* (2012), [8] Dara *et al.* (2016), [9] Yuan *et al.* (2014), [10] Díaz *et al.* (2014), [11] Shungag Wan *et al.* (2013), [12] Pommier *et al.* (2010).

Pape bond (PB): El PB es un material lignocelulosico cuya degradación anaerobia se encuentra ampliamente reportada. Sin embargo, la amplitud de variables como p.e. la duracion de la prueba es interesante. El resultado mostrado por este trabajo indica que sin necesidad de un pretratamiento y con una temperatura de tan solo 35°C fue posible obtener un Y_{CH_4} 2 ó 3 veces mayor. Aunque esta aseveración debe tomarse con precaución, ya que al día 40, el Y_{CH_4} acumulado del PB de este trabajo fue de solo 6.8 ml CH_4 /g STV.

Cartón (PC): De manera similar el PC también ha sido ampliamente estudiado. El Y_{CH_4} obtenido en el presente trabajo fue menor (41%) con respecto a Eleazer *et al.* (1997) quienes utilizaron una fase sólida (>20% ST). Sin embargo, es importante señalar que su periodo de prueba fue mayor (450 días) y además ajustaron constantemente el pH. En el caso de los estudios que utilizaron una fase líquida (<10 %ST), un pre tratamiento y una temperatura mayor a 45°C reportan que el PC es capaz de alcanzar hasta un Y_{CH_4} de 280 ml/g SVT (Kobayashi *et al.*, 2012).

Papel glossy (PG): El PG es tipo de papel coloreado y brillante que es comunmente utilizado para revistas, folletos y volantes; sin embargo, su degradación anaerobia ha sido poco estudiada. Es interesante señalar que en este trabajo el PG alcanzó un Y_{CH_4} mayor de 32% respecto a Eleazer *et al.* (1997), quienes utilizaron condiciones similares (régimen mesófilo y fase sólida).

Papel periódico (PP): De los RLD el PP es el de menor generación en la VIS y también fue el de menor rendimiento de CH_4 . Nuestros resultados son menores (97%) respecto a Eleazer *et al.* (1997), sin embargo, ellos utilizaron un periodo mayor de 450 días y además ajustaron constantemente el pH.

Papel sanitario (PS): Los resultados del PS fueron inesperados, ya que al ser el RLD con menor contenido de lignina se esperaba que fuera fácilmente degradable y por consiguiente tuviera un mayor Y_{CH_4} . No existen reportes de inhibición metanogénica por PS, pero por otro lado los reportes actualmente disponibles son para fase líquida y por tanto no son completamente comparables.

Finalmente, el Y_{CH_4} de cada RLD se comparó con los patrones de biodegradabilidad reportados por Battersby (1989), quien evaluó la degradación anaeróbica de 77 compuestos orgánicos en términos de gas total (**Figura 16**).

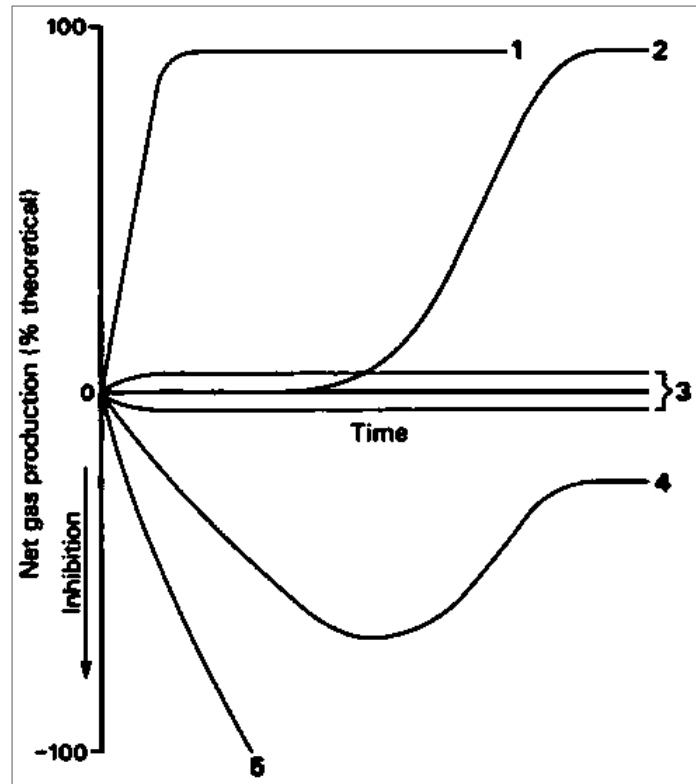


Figura 16. Curvas típicas de biodegradabilidad de los compuestos orgánicos.

1. Fácilmente degradable;
2. Degradable después de un período de latencia (demora temporal);
3. Poco efecto sobre la producción de gas;
4. Inhibidor en la fase inicial de incubación;
5. Inhibidor a lo largo de la incubación.

Fuente: Battersby, 1989.

Para realizar ésta comparación, se calculó el porcentaje relativo de cada RLD (**Figura 17**) en referencia al PB, considerando 100% de biodegradabilidad al día 200 y utilizando el Y_{CH_4} acumulado de cada RLD. Se observó que durante una digestión anaerobia en condiciones mesofílicas (35°C), el PB y el PG se comportan como un material “degradable” después de 53 y 57 días respectivamente (**Figura 16, curva 2**), mientras que el PC, el PP y el PS como un material “con poco efecto sobre la producción de gas”, (**Figura 16, curva 3**).

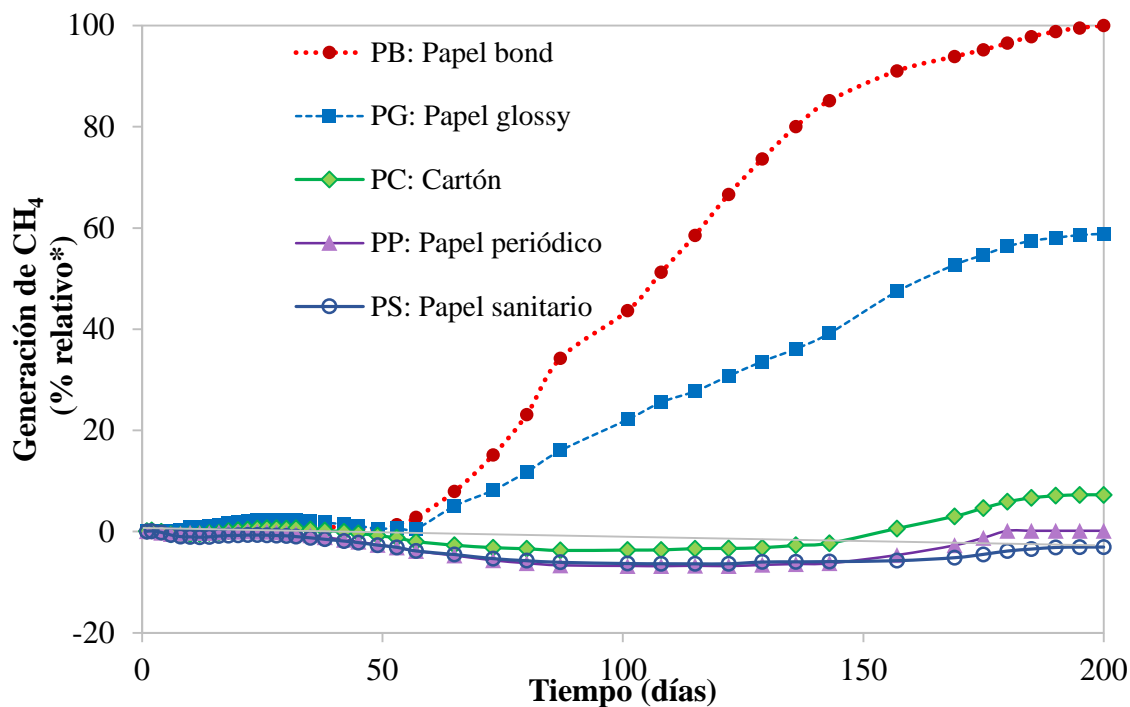


Figura 17. Curvas de degradación de los residuos lignocelulósicos domésticos de acuerdo a Battersby (1989)

8.3.2 Lignina y holocelulosa degradada en los residuos lignocelulósicos domésticos

Para conocer la biodegradabilidad de las fibras lignocelulósicas (lignina y holocelulosa) de cada RLD (PB, PG, PS, PP y PC), se determinó el contenido de lignina y holocelulosa después de los 200 días de digestión anaerobia y se comparó con el contenido inicial (ver **Sección 8.2**). En la **Figura 18** se muestra las fibras lignocelulósicas (holocelulosa y lignina) degradadas de cada RLD (considerando el 100% como el contenido inicial). El PB fue el que degradó en mayor cantidad la holocelulosa 93% y lignina 39%, mientras que el PP fue el de menor cantidad con 4% de lignina y 11% de holocelulosa.

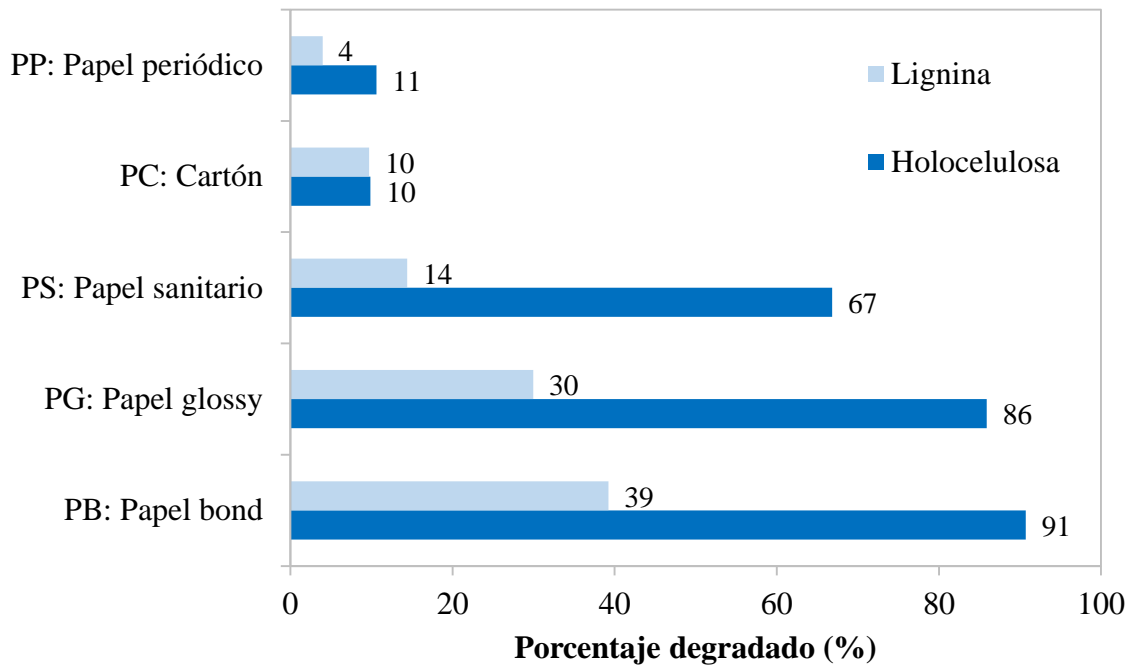


Figura 18. Degradación del material lignocelulósico (lignina y holocelulosa)

Digestión anaerobia durante 200 días en régimen mesófilo de 35°C.

Naroznova *et al.* (2016) son los únicos que reportan las fibras lignocelulósicas (lignina y holocelulosa) degradadas después de una digestión anaerobia de 45 días, 35°C y una concentración líquida. En la **Tabla 19** se muestra que el rango de biodegradabilidad reportado en la literatura va del 30% del cartón al 61% en el cartón sucio, mientras que en este estudio osciló del 7% en el PP al 66% en el PB. El menor grado de biodegradabilidad respecto a Naroznova *et al.* (2016) se debe porque ellos utilizaron condiciones que permiten una mayor degradación según la FAO (2011), Abbassi-Guendouz *et al.* (2012), Shungag Wan *et al.* (2013), Wang (2016), entre otros. Además de que sus materiales contenían menor cantidad de lignina (<11% ST) comparado con los de este estudio (<25 %ST).

Tabla 19. Lignina y holocelulosa degradada en residuos lignocelulósicos después de una digestión anaerobia.

Residuo lignocelulósico domésticos	Fibras lignocelulósicas totales ^a (%)	Referencia
Papel bond (PB)	53	Este estudio
Papel glossy (PG)	48	
Papel sanitario (PS)	41	
Cartón (PC)	10	
Papel periódico (PP)	7	
Cartón sucio	61	Naroznova <i>et al.</i> , (2016) ^b
Papel de cocina	57	
Papel sucio	45	
Cartón	30	

^aLignina y holocelulosa. ^bDigestión anaerobia en concentración líquida, 45 días y 35°C

8.3.3 Metano relativo a la tasa de generación domiciliaria

Se estimó la generación relativa de CH₄ que tendrían los RLD de estudio tomando en cuenta los Y_{CH₄} individuales y la tasa de generación en la corriente de residuos sólidos domésticos (**Sección 9.1.3 y 9.3.1**) suponiendo una base de cálculo de 100 kg de RSD. En la **Tabla 20** se muestra la cantidad de CH₄ producido por cada RLD que va de 1,579 a 0.4 L de CH₄.

Tabla 20. Producción de CH₄ relativo a la tasa de generación doméstica

Residuo lignocelulósico doméstico	Generación en la vivienda ^a (%)	Rendimiento de CH ₄ ^b (L/kg de material seco)	CH ₄ (L)
Papel bond	2.2	902	1, 579
Papel glossy	1.6	360	576
Papel sanitario	4.3	-27	---
Cartón	4.8	60	288
Papel periódico	0.4	1	0.4
Total			2,443

^a Porcentaje respecto al total de residuos sólidos domésticos. ^bAcumulado durante la digestión anaerobia en régimen mesófilo al día 200.

9. CONCLUSIONES

- Se demostró que el papel y el cartón son una categoría diversa dentro de la corriente de RSD. Esto implicó también distintos contenidos de lignina y holocelulosa.
- El cartón se identificó como el residuo lignocelulósico de mayor generación en la corriente domiciliaria, mientras que el papel bond resultó el de mayor rendimiento de CH₄.
- Las distintas categorías de papel y cartón en la corriente de domiciliaria, así como su biodegradación anaerobia deben considerarse interdependientes.

. 10. TRABAJOS FUTUROS

Para estudios posteriores se recomienda:

- Estudiar la generación y composición de RLD en otra época de año (invierno).
- Ampliar la caracterización química del PB, PG, PS, PP y PC (proteínas, carbohidratos, lípidos, carbono orgánico, nitrógeno, hemicelulosa y celulosa).
- Monitorear durante la digestión anaerobia la formación de subproductos (tipo y concentración).
- Realizar la prueba de biodegradabilidad de mezclas de PB, PG, PS, PP y PC y analizar su comportamiento en función de la generación de CH₄ y contenido de fibras lignocelulósicas (hemicelulosa, celulosa y lignina).
- Determinar las emisiones de CH₄ en un vertedero mediante el análisis de ciclo de vida del PB, PG, PS, PP y PC.

11. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

11.1 Objetivo general

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar los residuos de papel y cartón domiciliarios. Esta caracterización incluye tres aspectos: la tasa de generación y composición en la corriente domiciliaria, la caracterización química y el potencial de generación de CH₄ (escala laboratorio).

✓ **CUMPLIDO**

11.2 Objetivos particulares

1. Realizar un estudio de caracterización y generación de RSD y RLD provenientes de las VIS.

✓ **CUMPLIDO**

2. Caracterizar químicamente la corriente de RLD identificada.

✓ **CUMPLIDO**

3. Estimar el rendimiento de CH₄ de los RLD (PB, PP, PC, PG y PS) al degradarse en un biorreactor anaerobio a escala laboratorio

✓ **CUMPLIDO**

4. Estimar el volumen de CH₄ generado por la degradación de RLD provenientes de una VIS.

✓ **CUMPLIDO**

12. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

12.1 Hipótesis

Los residuos de papel y cartón en la corriente domiciliaria son considerados una sola categoría como si fueran un solo tipo de material. Sin embargo, es sabido que se comercializan distintos tipos de papel y cartón, distinguiéndose por el uso al que se asignan. Se hipotetiza que las diferencias en sus tasas de generación como residuo domiciliar, aunado a sus características químicas representan una diferencia significativa en su tasa de producción de CH₄ individual.

✓ **VÁLIDA**

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten validar la hipótesis, ya que se encontró que cada tipo de papel y cartón presenta características particulares. Su variabilidad va desde la composición químicas hasta la tasa de generación en la corriente domiciliaria y ambas variables influyen en la generación de CH₄ de cada RLD.

13. REFERENCIAS

- Álvarez Lam, Jorge, (2010).** El cambio climático y el desarrollo. Ingeniería Industrial. 28: 25-39 Universidad de Lima. Lima, Perú. ISSN: 1025-9929. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/3374/337428494003.pdf>
- Abbassi-Guendouz Amel, Doris Brockmann, Eric Trably, Claire Dumas, Jean-Philippe Delgenès, Jean-Philippe Steyer, Renaud Escudié, (2012).** Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. Bioresource Technology. 111: 55-61. May 2012. ISSN 0960-8524
- Baltierra-Trejo, E; Sánchez-Yáñez, J M; Márquez-Benavides, (2012).** Modelo experimental de difusión de biogás en raíces vegetales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 28 (1):133-139. ISSN: 0188-4999
- Battersby Nigel S. & Wilson Valerie, (1989).** Survey of the Anaerobic Biodegradation Potential of Organic Chemicals in Digesting Sludge. APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOG. Febrero 1989. 55 (2): 433-439. DOI: 0099-2240/89/020433-07\$02.00/0.
- Binxian Gu, Haikun Wang, Zun Chen, Suqin Jiang, Weimo Zhu, Miaomiao Liu, Yangqing Chen, Yi Wu, Sheng He, Rong Cheng, Jie Yang and Jun Bi, (2015).** Characterization, quantification and management of household solid waste: A case study in China. Resources, Conservation and Recycling. China 2015. 98: 67-75. ISSN 0921-3449.
- Cámara del papel, (2012).** (Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y el Papel). Plan de manejo para residuos de papel y cartón en México. pp. 126. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/residuos/solidos/Documents/pm-papelycarton.pdf>
- Centro Guaman Poma de Ayala, (2011).** Manejo de Residuos sólidos Domiciliarios, Perú 2011. [Acceso: Enero 2015].
- CESOP, 2006.** (Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública). La vivienda en México: construyendo análisis y propuestas. Primera edición. Octubre 2006. Cámara de Diputados / LIX Legislatura. México, D.F. ISBN: 968-9097-03-2
- CMNUCC, (1992).** (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). Disponible en:

https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

- CONAVI, (2014).** (Comisión Nacional de Vivienda). Reporte mensual del Subdirección General de Análisis de Vivienda, Prospectiva y Sustentabilidad sector de la vivienda. Noviembre de 2014.
- Dara S.M. Ghasimi, Marcel H. Zandvoort, Michiel Adriaanse, Jules B. van Lier, Merle de Kreuk, (2016).** Comparative analysis of the digestibility of sewage fine sieved fraction and hygiene paper produced from virgin fibers and recycled fibers. Waste Management. Mayo 2016. ISSN 0956-053X. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.034>.
- DEFRA, (2011).** (Department for Environment, Food and Rural Affairs). Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. Nikolas Hill, Helen Walker, Jamie Beevor & Keith James. Department of Energy and Climate Change. Londres, Reino Unido.
- Díaz Rodríguez Yosvany, Fenandez Santana Elina, Sárvari Horváth Llona, Rodríguez Muñoz Susana, (2014).** Hidrólisis química y digestión anaerobia termofílica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Revista cubana de ingeniería. Enero-abril, 2014. 1 (5) ISSN. 2223- 1781.
- Díaz Cordero, Gerarda, (2012).** EL CAMBIO CLIMÁTICO. Ciencia y Sociedad, República Dominicana. XXXVII. Abril-Junio. pp. 227-240. ISSN: 0378-7680
- Guyot, J.P., Noyola A., Monroy O., (1990).** Evolution of microbial activities and populations in granular sludge from an UASB reactor. Biotechnology Letters. 12: 155-60
- Eleazer, W., Odle, W., Yu-Shengwang, I., Barlaz, M.A., (1997).** Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills. Environmental Science & Technology. 31 (3): 911–91. DOI:10.1021/es9606788.
- FAO, (2011).** (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Manual del biogás. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Global Environment Facility. Santiago de Chile. ISBN 978-95-306892-0

- INEGI, (2006).** (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO 1990-2002, México. Septiembre 2006.
- IEA, (2013).** (International Energy Agency). CO₂ Emissions From Fuel Combustion. Highlights 2013. Rue de la Fédération 75739. Paris Cedex 15, France. Disponible en: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2013.pdf>
- INECC, (2012).** (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Actualización del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, para el sector de Desechos. Convenio: FPP-2011-26. In M. PNUD, Ed. Parte 6, Desechos. México, DF. SEMARNAT. pp. 208
- INECC, (2012a).** (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Versión Extensa del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Acceso: Julio 2015. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf
- INECC y SEMARNAT (2015).** (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Primera edición 2015. INECC/SEMARNAT, México. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_bur_mexico_low_resolution.pdf
- IPCC, (1996).** (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). Directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Versión revisada en 1996. Vol. 1, 2,3. Capítulo 3: Eliminación de desechos sólidos.
- IPCC, (2007).** (Instituto Panamericano de Cambio Climático). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, (2013).** (Instituto Panamericano de Cambio Climático). Cambio Climático 2007. Mitigación al Cambio Climático. Anexo I del Informe del Grupo de Trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Acceso: Julio 2015. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-annex-sp.pdf>
- Jayasinghe, P.A., Hettiaratchi, J.P.A., Mehrotra, A.K., Kumar, S., (2011).** Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 102 (7): 4633–4637. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.013.
- Kobayashi Takuro, Kai-Qin Xu, Yu-You Li, Yuhei Inamori, (2012).** Evaluation of hydrogen and methane production from municipal solid wastes with different compositions of fat, protein, cellulosic materials and the other carbohydrates, *International Journal of Hydrogen Energy*. Octubre 2012. 37 (20): 15711-15718. ISSN 0360-3199.
- LGPGIR, (2003).** (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos). DIARIO OFICIAL publicada el 8 de octubre de 2003. Última reforma DOF 22-05-2015. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/27266/Ley_General_de_Residuos.pdf
- Lorenzo-Acosta Yaniris & Obaya-Abreu Ma. Cristina, (2005).** La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. Volumen XXXIX, No. 1: 35-48. ISSN: 0138-6204
- Melián Rodríguez Mayra, (2013).** [Blog] How about lignin? Acceso: 09/09/15. Disponible en: <http://howaboutlignin.blogspot.mx/2013/07/lignin-structure.html>
- Murray R. y Larry J., (2009).** Estadística. 4ta edición. Mc Graw-Hill. México, D.F.
- Naroznova Irina, Møller Jacob, Scheutz Charlotte, (2016).** Characterisation of the biochemical methane potential (BMP) of individual material fractions in Danish source-separated organic household waste. *Waste Management*. Vol. 50. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.008>
- Norma Mexicana NMX-AA-22-1985, (1985).** Centro de calidad ambiental. Protección al ambiente-Contaminación del suelo residuos sólidos municipales selección y cuantificación de subproducto. México, D.F.

- Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, (2001).** Secretaría de Economía. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. México, D.F.
- Norma Mexicana NMX-N-106-SCFI-2010, (2010).** Comité Técnico de Normalización Nacional de la industria de Celulosa y Papel. Industrias de celulosa y papel. Lista de calidades de materiales fibrosos de papel recuperados (cartón, cartoncillo, papel, archivo, viruta y afines.), para la fabricación de papel. Clasificación y métodos de prueba. México, D.F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-083-Semarnat-2003, (2003).** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial de la Federación, Octubre de 2004.
- Poggi H.M., Arce E., Fernández G., Caffarel S., (1997).** Inhibition of mesophilic solid substrate anaerobic digestion (DASS) by ammonia rich wastes. 52nd Purdue Industrial Waste Conference Proceedings. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, U.S:A. pp. 1-30
- Pommier Sébastien, Mañas Llamas Angela, Lefebvre Xavier, (2010).** Analysis of the outcome of shredding pretreatment on the anaerobic biodegradability of paper and cardboard materials. Bioresource Technology. January 2010. ISSN 0960-8524. 101 (2): 463-468. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.034>.
- Rincón Martínez J.M. & Silva Lora E.E., (2014).** Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Red iberoamericana de aprovechamiento de residuos orgánicos en producción de energía. Primera Edición. Bogotá, Colombia. pp. 332. ISBN: 978-958-58880-05
- Rodríguez, Yokasta; Francisco, Alfredo Abel, (2010).** Caracterización residuos sólidos domiciliarios en Santo Domingo Oeste, Provincia Santo Domingo, (I). Ciencia y Sociedad. Volumen XXXV. Octubre-Diciembre. pp. 566-587. ISSN: 0378-7680
- Run-Cang S., Tomkinson J., Zhu W., Wang, S. Q., (2000).** “Delignification of Maize Stems by Peroxide. 1. Physicochemical and structural Characterization of the Solubilized Lignins”. J. Agric. Food Chem. 48 (4): 1253-1262. DOI: 10.1021/jf990646e

- Runkel R.O.H., Wilke K.D., (1951).** Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Holz Roh Werkstoff. 9: 260-270
- Satterthwaite, D., (2008).** Cities' Contribution to Global Warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. Environmental and Urbanization. 20 (2): 539–549.
- SEMARNAT, (2012).** (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México. 2012.
- Shungang Wan, Lei Sun, Yaniv Douieb, Jian Sun, Wensui Luo. (2013).** Anaerobic digestion of municipal solid waste composed of food waste, wastepaper, and plastic in a single-stage system: Performance and microbial community structure characterization. Bioresource Technology. Octubre 2013. 146: 619-627. ISSN 0960-8524. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.140>.
- SNM, (2015).** (Sistema Nacional Meteorológico). Normales climatológica de Morelia, Michoacán. Periodo: 1981-2010. Acceso. Septiembre 2015. Disponible en http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=190:michoacan&catid=14:normales-por-estacion
- Solórzano, Ochoa, Gustavo, (2003).** Aportación de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano. Gaceta Ecológica. Enero-marzo. No. 66: 7-15. ISSN: 1405-2849
- Sovacool, B.K. & Brown, M.A., (2010).** Twelve Metropolitan Carbon Footprints: a preliminary comparative global assessment. Energy Policy. 38: 4856–4863. ISSN: 0301-4215. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.001
- Tchobanoglous G., Theisen H. & Vigyuanil S., (1994).** Gestión integral de residuos sólidos. Ed. Mc Graw Hill-Interamericana. Madrid, España.
- Tchobanoglous G, Kreith, F., (2005).** Handbook of Solid Wasted Management. 2ª edición. McGraw-Hill. New York. U.S.A. Capítulo 14.
- Thanh, N.P., Matsui, Y. & Fujiwara, T., (2010).** Household solid waste generation and characteristic in a Mekong Delta city, Vietnam. Journal of environmental management. 91 (11): 2307–21. DIO: 10.1016/j.jenvman.2010.06.016. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20633978>

- Taboada-González, Aguilar-Virgen Quetzalli & Ojeda-Benitez Sara, (2011).** Análisis estadístico de residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo de México. Ensenada, Baja California-México, 2011. Avances en Ciencias e Ingeniería ISSN: 0718-8706. 2 (1): 9-20.
- Trzcinski, A.P. & Stuckey, D.C., (2012).** Determination of the hydrolysis constant in the biochemical methane potential test of municipal solid waste Environmental Engineering Science. September 2012. 29: 848–854. DOI: 10.1089/ees.2011.0105
- Vaccari M. & Vitali F., (2011).** A methodology for the calculation of Greenhouse Gases emissions from office-based projects. Italia. Faculty of Engineering. University of Brescia. Research centre on appropriate technologies for environmental management in developing Countries. ISBN: 978-88-97307-00-6
- Wang Bing, (2016).** Factors that Influence the Biochemical Methane Potential (BMP) Test: Steps towards the Standardisation of BMP Test Lund University: Biotechnology, Lund University. pp. 56. ISBN: 978-91-7422-436-8. Disponible en: <http://lup.lub.lu.se/search/record/f9bba025-99cf-4759-b412-b8bcb026fc68>
- Wang Xiaoming, Padgetta, J. M., Powellb J. S. & Barla M. A., (2013).** Decomposition of forest products buried in landfills. Waste Management. United States 2013. 33: 2267–2276. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.07.009
- Wang Xiaoming, De la Cruz Florentino B., Ximenes Fabiano, Barlaz Morton A., (2015).** Decomposition and carbon storage of selected paper products in laboratory-scale landfills. Science of the Total Environment. 2015. 532: 70–79. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.132.
- Wang Bing, (2016).** Factors that Influence the Biochemical Methane Potential (BMP) Test: Steps towards the Standardisation of BMP Test Lund University: Biotechnology, Lund University. pp. 56. ISBN: 978-91-7422-436-8. Disponible en: <http://lup.lub.lu.se/search/record/f9bba025-99cf-4759-b412-b8bcb026fc68>
- Wise L.E., Murphy M., D’Addieco A.A., (1946).** Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. Pap. Trade J. 122 (3): 35-43
- Yuan Xufeng F., Y.Z. Cao, J.J. Li, B.T. Wen, W.B. Zhu, X.F. Wang, Z.J. Cui., (2012).** Effect of pretreatment by a microbial consortium on methane production of waste paper and

cardboard. Bioresource Technology. 118: 281–288.
DOI:10.1016/j.biortech.2012.05.058

Yuan Xufeng, Wen Boting, Ma Xuguang, Zhu Wanbin, Wang Xiaofen, Chen Shaojiang, Cui Zongjun, (2014). Enhancing the anaerobic digestion of lignocellulose of municipal solid waste using a microbial pretreatment method. Bioresource Technology. February 2014. 154: 1-9. ISSN 0960-8524. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.090>.

ANEXOS

ANEXO I.

- **Preparación de cápsulas de porcelana (NMX-AA-034_SCFI-2001)**

1. Las cápsulas se introdujeron en la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 20 minutos como mínimo.
2. Se sacaron y enfriaron a temperatura ambiente dentro de un desecador.
3. Se pesaron las cápsulas y registrar los datos.
4. Se repitió el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtuvo hasta que no hubo variación en el peso mayor a 0.5 mg.

- **Determinación de pH**

Se calibró el potenciómetro (marca *Denver Instrument UB10 ultrabasic, Electrodo # 300728.1 Denver Instrument*) con las soluciones amortiguadoras pH 4, 7 y 10 (marca J.T. Baker). Se pesó 5 gramos de muestra y se transfirió a un vaso de precipitado de 250 ml. Se añadió 45 ml de agua destilada (dilución 1:10). Se mezcló con agitador magnético durante 10 minutos y se dejó reposar la solución durante 30 minutos. Se determinó la temperatura de la solución. Se sumergió el electrodo en la solución y se realizó la medición de pH. Se secó los electrodos y se lavó con agua destilada. La diferencia máxima permisible en el resultado de pruebas efectuadas por duplicado no excedió de 0.1 unidades de pH.

ANEXO II.

• Inóculo para prueba de biodegradabilidad

El inóculo que se utilizó en la prueba de biodegradabilidad de los RLD se obtuvo mediante el seguimiento y operación de un biorreactor anaerobio en fase sólida a una temperatura de 35°C con alimentación cada 5 días durante un periodo de 95 días para la obtención de un inóculo productor de biogás que posteriormente sería utilizado para la prueba de biodegradabilidad.

La **figura II.1** muestra el volumen acumulado de biogás en el biorreactor con un volumen total de 9.3 L/90 días, es decir un promedio de 125 ml/5 días. Se realizó un análisis estadístico de regresión a partir de la producción acumulada de biogás, que mostró una dinámica lineal a largo plazo, con un valor de regresión lineal (R^2) de 0.95, lo que indica que la operación del biorreactor fue la adecuada y que constantemente el inóculo generó biogás.

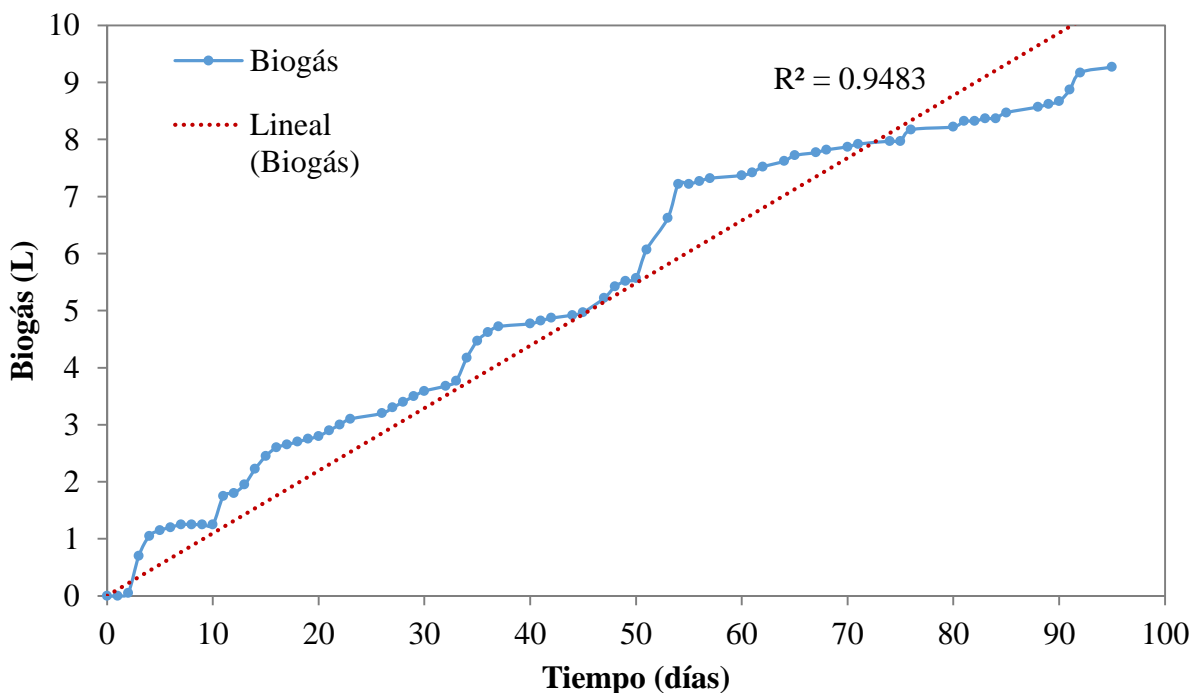


Figura II.1 Producción de biogás (acumulado) del reactor de digestión anaerobia de sustrato sólido a 35° C y alimentación cada 5 días para la obtención de inóculo.

Antes de alimentar el biorreactor se determinó el contenido de humedad, ST, SVT y el pH del inóculo (**Figura II.2 y II.3**). En promedio el inóculo se mantuvo con una humedad de 72.61% (p/p) y con 27.63% (p/p) de ST, mientras que los STV aumentaron de 31.48% (p/p) a 66.73% (p/p); el pH fluctuó entre 5.08 y 7.90, con un promedio de 6.23 durante los 95 días.

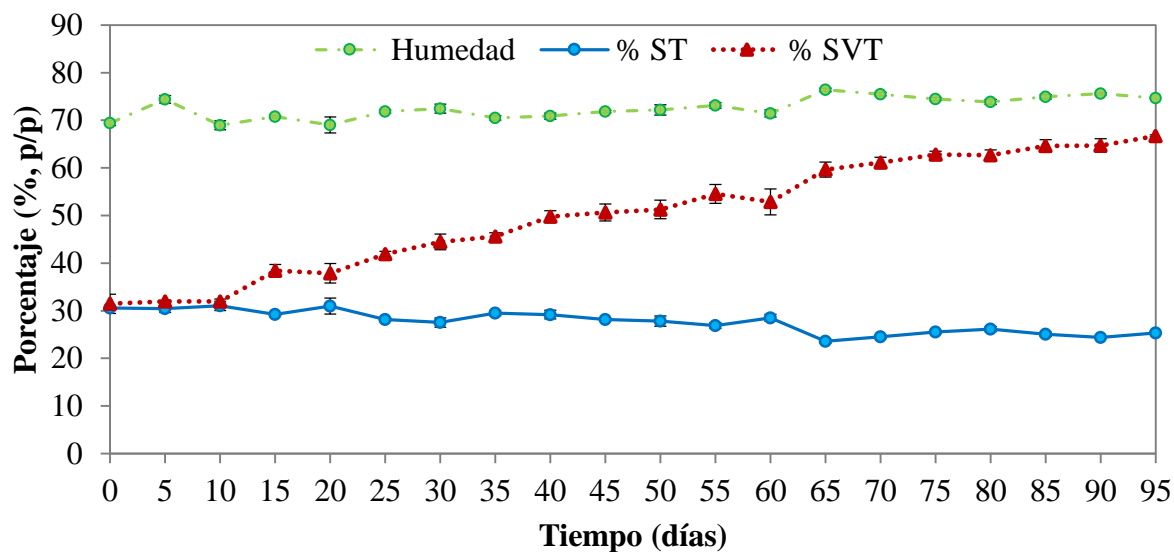


Figura II.2. Dinámica de la humedad, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles totales (SVT) del inóculo.

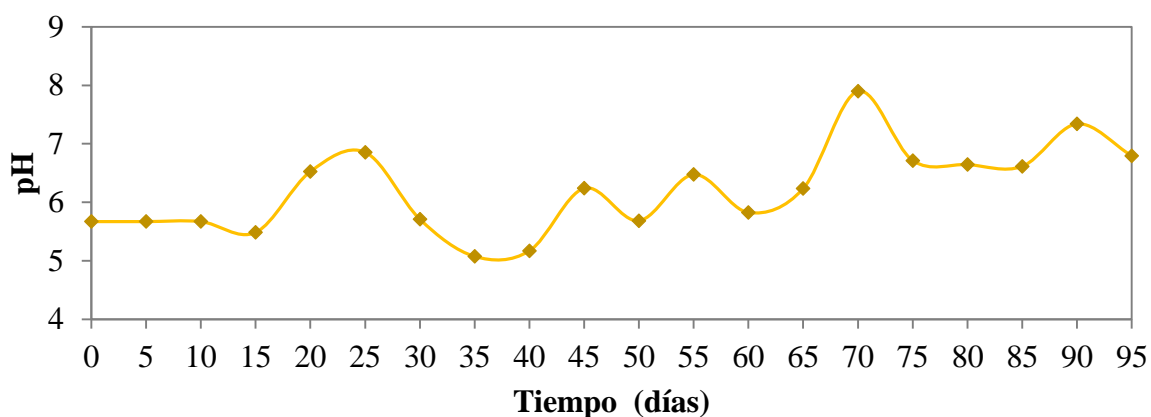


Figura II.3 Dinámica del pH del inóculo.