

CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE FACTORES DE EMISIÓN PARA ESTIMAR EMISIONES FUGITIVAS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UN CENTRO DE ACOPIO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Stoichiometric calculations of emission factors to estimate fugitive greenhouse gases emissions of a solid waste management center

Guadalupe HERNÁNDEZ-GERÓNIMO¹, José Ramón LAINES-CANEPA¹, Israel ÁVILA-LÁZARO¹, Rudy SOLÍS-SILVAN² y José Aurelio SOSA-OLIVIER^{1*}

¹ División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, km 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas, entronque a Bosques de Saloya, Ría. Emiliano Zapata, 86150 Villahermosa, Tabasco, México.

² Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, km 2 carretera vecinal Paraíso-Comalcalco, RA Occidente 3a Sección, 86650 Comalcalco, Tabasco, México.

*Autor para correspondencia: aurelio.sosa@ujat.mx

(Recibido: mayo de 2020; aceptado: mayo de 2021)

Palabras clave: dióxido de carbono equivalente, manejo de residuos, residuos orgánicos, residuos sólidos urbanos, universidad

RESUMEN

Los factores de emisión (FE) son valores representativos que relacionan la cantidad de gases liberados a la atmósfera por el desarrollo de una actividad y permiten la estimación de tasas de emisión, por ejemplo en los residuos sólidos generados. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) requiere FE particulares. En este estudio se estimaron las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) en una institución de educación superior (IES). Los FE de la FORSU fueron obtenidos mediante cálculos estequiométricos considerando los procesos de descomposición aerobia y anaerobia. El monitoreo de la generación diaria de residuos sólidos urbanos (RSU) en 2017 en la IES y el uso de FE bibliográficos permitió el cálculo de la tasa de emisión inicial. La IES estudiada cuenta con 26 fuentes de generación de residuos que generaron 31.05 t/año de RSU, un promedio de 146.5 kg/d y una generación per cápita de 0.07 kg/d. Se identificaron 18 subproductos, de los cuales 13 son valorizables. Inicialmente, la emisión negativa fue de 7617.4 kg CO_{2e}, atribuibles a 7.08 t de RSU valorizables, y la emisión positiva fue de 1178.1 kg CO_{2e} por la disposición final. Los FE obtenidos ajustaron la emisión final negativa a 8153 t CO_{2e} y la emisión final positiva a 651.3 kg CO_{2e}. El manejo adecuado de los RSU generados en centros de trabajo o educativos permite disminuir los impactos ambientales, recuperando materias primas y energía.

Key words: carbon dioxide equivalent, waste management, organic waste, municipal solid waste, university

ABSTRACT

Emission Factors (EF) are representative values which relate the amount of gases released into the atmosphere by the development of an activity, allowing the estimation

of emission rates (e.g., in the solid waste generated). The organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) requires particular EF. In this study, emissions of carbon dioxide equivalent (CO_{2e}) in a higher education institution (HEI) were estimated. The EFs from OFMSW were obtained based on stoichiometry calculations considering the aerobic and anaerobic decomposition processes. The monitoring of municipal solid waste (MSW) daily generation during 2017 in the HEI and the use of bibliographic EF allowed the calculation of the initial emission rate. The HEI studied has 26 sources of waste generation. It generated 31.05 t/yr of MSW, an average of 146.5 kg/d and a per capita generation of 0.07 kg/d. Eighteen by-products were identified, 13 of them recoverable. Initially, the negative emission was 7617.4 kg CO_{2e} , attributable to 7.08 t of recoverable MSW, and the positive emission was 1178.1 kg CO_{2e} from final disposal. The EFs obtained adjusted the negative final emission to 8153 t CO_{2e} and the positive final emission to 651.3 kg CO_{2e} . Proper management of the MSW generated in work or educational centers allows reducing environmental impacts, recovering raw materials and energy.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los residuos sólidos (RS) genera impactos ambientales negativos en cuerpos y corrientes de agua, matrices de suelo y subsuelo, y la atmósfera, como emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La generación de GEI en 2016 fue de 1600 millones t de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), con un incremento proyectado para el 2050 de 2600 millones t CO_{2e} (Hoornweg y Bhada-Tata 2012). Del total de emisiones mundiales de CO_{2e} , el 5 % son generadas por el manejo de RS (Bogner et al. 2007). De acuerdo con el Banco Mundial (2018), la generación mundial de RSU en 2016 ascendió a 2.01 billones de t/año y aumentará a 3.4 billones en 2050. Además, la generación per cápita diaria es de 0.74 kg/hab/d y aumentará de 19 a 40 %, en el mismo periodo.

En México, con base en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), durante 2015 se emitieron 683 Mt CO_{2e} , de las cuales el 3.46 % se atribuyen al manejo de residuos, lo que incluye el tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) y peligrosos (INECC 2018). Durante 2017, la generación total y per cápita de RSU fue de 43.85 Mt/a y 0.944 kg/hab/d, respectivamente (Semarnat 2020). Por su parte, en el estado de Tabasco se generaron alrededor de 0.90 Mt/a y 0.867 kg/hab/d de RSU en 2017 (SEMARNAT 2020); no obstante, se carece de datos oficiales sobre la estimación o emisión de GEI. Ying (2016) indica que el reciclaje es una acción que conduce a la reducción de emisiones de GEI generadas por RSU. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) indica que la minimización y el reciclaje

de 29 categorías de RSU son una alternativa para la mitigación de GEI (US-EPA 2006). De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se describe el término ‘emisiones negativas’ como el efecto de toda práctica o tecnología que conduzca a la disminución o remoción de CO_2 de la atmósfera (IPCC 2015).

Los factores de emisión (FE) son un marco de referencia que contribuye a entender el impacto de algunas actividades, ya que relacionan la cantidad de CO_{2e} por unidad de producción. El reciclado de materiales se expresa en kilogramos o toneladas de CO_{2e} por tonelada de material. Estos FE se calculan para el análisis de ciclo de vida (ACV), cuya metodología ha sido establecida y estandarizada internacionalmente por la International Organization for Standardization (ISO 2006). Tras una revisión bibliográfica se han identificado múltiples investigaciones que determinan la cantidad de emisiones y reducciones de GEI por la generación y aprovechamiento de los RS, aplicando FE (**Cuadro I**).

Turner et al. (2015) obtuvieron FE de 50 tipos de RSU segregados y reciclados, estimando una reducción de emisiones de CO_{2e} al sustituir materia virgen. En 2009 en Grecia se determinó, mediante el uso de FE, la emisión de GEI de residuos de alimentos, cuantificándose un total de 56.72 Mt CO_{2e} por la generación de 1.13 Mt de estos residuos anualmente (Abeliotis et al. 2015).

Cucchiella et al. (2017) utilizaron FE para estimar la reducción de emisiones en una planta de generación de energía, obteniendo una reducción de 55 500 t CO_{2e} /año por tonelada de RSU tratados mediante incineración. En la ciudad de Bangalore, India, Ramachandra et al. (2018) reportaron una emisión de 604.80 t CO_{2e} /año por la generación de 281.85 t/a

CUADRO I. EMISIÓN DE CO_{2e} REPORTADA PARA ALGUNOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y RECICLAJE DE MATERIALES.

Material o proceso	Rango de emisión	Fuente
Producción de papel	-1 210 a 390 kg CO _{2e} /t de material residual	Merrild et al. (2009)
Reciclaje de aluminio	-5.04 a -19.34 t CO _{2e} /t de material residual	Damgaard et al. (2009)
Reciclaje de acero	-0.56 a -2.36 t CO _{2e} /t de material residual	
Reciclaje de madera	-1.9 a -1.3 t CO _{2e} /t de material residual	Ruishengn et al. (2014)

de RSU, de los cuales 81.96 % correspondían a la fracción orgánica. En Guerrero, México, se generan anualmente 0.32 Mt de RSU, de los cuales 6 % (19 728 t/a) son reciclados y representan una reducción de 24978 t CO_{2e}/a. El resto es dispuesto finalmente generando 0.40 Mt CO_{2e}/año (Salmerón et al. 2017).

En una ciudad, la cantidad y composición de los RSU está influida por factores como la concentración poblacional, las actividades de desarrollo económico y el nivel socioeconómico preponderante de las zonas o regiones. Las instituciones de educación superior (IES) suelen considerarse miniciudades por su alta concentración poblacional y la gran multiplicidad de actividades que requieren de materias primas e insumos. La responsabilidad de las IES en la formación de buenos profesionales debe reflejarse en que éstos posean aptitudes y conductas que demuestren un compromiso vocacional no sólo con su profesión, sino con su entorno. Por ello, desde el 2001 la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) firmaron un convenio que impulsaría políticas ambientales en los planes de desarrollo de las IES (ANUIES 2002). Romero et al. (2008) mencionan que las IES deben desempeñar un papel preponderante en el manejo integral de sus RSU; sin embargo, pocas IES han atendido la problemática concerniente al tema del manejo de sus residuos, como el conocer la generación y composición de los RSU y establecer programas o planes de manejo adecuados, así como tener la infraestructura necesaria y adecuada para estudiar dicha problemática y los impactos residuales (como la emisión de GEI). El **cuadro II**, muestra un resumen de información publicada referente al manejo de residuos en IES.

Para dimensionar la problemática, la Ciudad de México, una de las más pobladas del mundo, genera 13 149 t RSU/d (Sedema 2020) y la Universidad de Lagos, en Nigeria, genera 11 750 t RSU/año, lo que equivale a producir anualmente cerca del 90 % de la

cantidad que la Ciudad de México genera en un solo día. En México existen otros ejemplos, como la Universidad Iberoamericana, que genera 1230 t RSU/año. Sin embargo, existen evidencias aisladas de acciones o estrategias ante esta problemática o estudios que muestran sus efectos. Considerando las más de 5000 IES registradas, estas representan una fuente importante de generación de RSU. Vilches et al. (2015) señalan que en la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador la adquisición y utilización de insumos, la descomposición de RSU orgánicos y las descargas, generan 5647.99 t CO_{2e}/año, y específicamente la actividad de eliminación de residuos equivale a 377 t CO_{2e}. Éste es uno de los pocos estudios que utilizan FE y reportan cantidades de GEI por conversión de CH₄, cuantificando el impacto de los RSU en una institución educativa.

El objetivo del presente estudio fue estimar la reducción en las emisiones de GEI por la recuperación de materiales valorizables, como parte del manejo integral realizado en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) en dos periodos semestrales durante 2017, mediante la aplicación de FE bibliográficos para los residuos inorgánicos y una propuesta de herramienta de cálculos estequiométricos para determinar FE de residuos orgánicos. Los resultados de este trabajo permitirán que diversas organizaciones, incluyendo las IES, opten por utilizar esta herramienta para estimar emisiones de CO_{2e}, pudiéndose tomar medidas precautorias para su reducción mediante un manejo adecuado de los residuos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El CATRE se localiza en la DACBiol-UJAT, situada en el área metropolitana de la ciudad de

CUADRO II. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ALGUNAS INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR.

Instituciones de educación superior	Generación	Subproductos	Generación per cápita (kg/d)	Fuente
Universidad de Lagos, Nigeria	32.2 t/d	12	—	Adeniran et al. (2017)
Universidad Tecnológica General Mariano Escobedo, México	88.03 kg/d	16	0.03	Del Ángel (2017)
Escuela de Ingeniería de la Universidad Estatal de Campinas, Brasil	—	16	—	Fagnani y Guimaraes (2017)
Universidad Jaume I (UJI), Castellón de la Plana, España	811.03 kg/d	13	0.089	Gallardo et al. (2016)
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), México	667.6 kg/d	10	0.143	Vera et al. (2016)
Universidad Tecnológica de Salamanca, España	693.35 kg/d	15	0.0392	Vargas et al. (2015)
Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, Colombia	408.19 kg/d	9	0.052	Castillo y Luzardo (2013)
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México	3375.3 kg/d	21	0.33	Ruiz (2012)
Instituto Tecnológico de Costa Rica	—	4	—	Romero et al. (2008)
Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México	1 t/d	8	—	Armijo de Vega et al. (2006)
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN, México	44.62 kg/d (promedio de 3 años)	7	—	Maldonado (2006)

Villahermosa, Tabasco, con coordenadas geográficas 17° 59' 23.8" latitud norte y 92° 58' 22.3" latitud oeste (**Fig. 1**).



Fig. 1. Ubicación del Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE).

Manejo de los residuos en el CATRE

Las principales fuentes de generación de RSU en la DACBIol son los salones de clase, la biblioteca, oficinas, cafeterías, baños, pasillos y laboratorios

(exceptuando los residuos peligrosos). El manejo de los RSU inicia con su generación y acopio en las fuentes; posteriormente, el personal de intendencia, tras realizar sus actividades de limpieza, recolecta y transporta los RSU al CATRE. En la **figura 2** se muestran las actividades de manejo que se llevan a cabo.

Para la realización del presente trabajo se utilizaron detalladamente los datos registrados durante 2017 en dos periodos semestrales: 2017-1 (febrero-julio) y 2017-2 (agosto 2017-enero 2018). Todos los RSU generados fueron cuantificados con una báscula digital AND modelo HW-200KVWP con capacidad de 200 kg. Se contó con una bitácora de registro que reúne los requisitos establecidos en el artículo 55 de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LPGIR) del estado de Tabasco.

La generación promedio diaria (GPD) se obtuvo a partir de la generación anual total (GAT) respecto al registro de los días efectivos laborables al año (DEL), utilizando la ecuación 1:

$$GPD = \frac{GAT}{DEL} \quad (1)$$

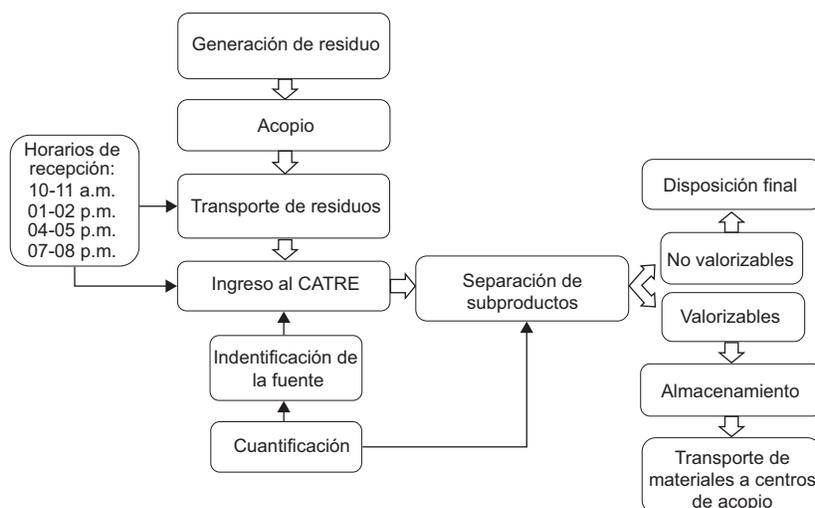


Fig. 2. Manejo de residuos acopiados en el CATRE de la DACBIOL.

Las actividades de docencia y venta de insumos y alimentos se realizan principalmente de lunes a viernes, por lo cual los fines de semana no se incluyeron en el estudio. La generación per cápita (GPC) se calculó considerando el peso de la generación promedio diaria (GPD) en relación con el número de población total (NP) de 2017 (ecuación 2):

$$GPC = \frac{GPD}{NP} \quad (2)$$

Los subproductos fueron clasificados con base en la NMX-AA-22-1985 (Sedue 1992). Además, se consideró la susceptibilidad de valorización de los residuos inorgánicos en función del mercado de materiales en la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Los residuos orgánicos se clasificaron en vegetales y restos de comida. Todos los residuos provenientes de las cocinas de las cafeterías que no presentaron combinación con restos de comida y grasas, se consideraron residuos vegetales. Los restos de comida son propiamente los residuos de las cafeterías, los cuales se generan en el proceso de elaboración y consumo de alimentos y contienen grasas. Los residuos orgánicos vegetales se tratan mediante compostaje y vermicompostaje en el CATRE, y los restos de comida se envían a su disposición final. Con relación a residuos no valorizables, ésta se realiza mediante un convenio establecido con el servicio público de limpia, que recolecta, traslada y dispone los residuos en el relleno sanitario municipal.

Revisión de los FE y estimación de la emisión de CO_{2e}

Los FE de CO_{2e} se tomaron de Turner et al. (2015) y Abeliotis et al. (2015). El **cuadro III** muestra un resumen de FE de los autores mencionados.

Con el fin de estimar las emisiones totales y reducidas por la recuperación de materiales en el CATRE, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se generó mensualmente una base de datos digital en una hoja de cálculo con los registros de generación total de RSU y recuperación de cada tipo de material valorizable, tomados de la bitácora de registro.
2. Se elaboró una relación de los FE encontrados para cada tipo de subproductos, incluyendo orgánicos e inorgánicos, valorizables y no valorizables.
3. Se estimó la emisión de CO_{2e} de cada material aplicando la ecuación 3:

$$kg \text{ CO}_{2e} = t * FE \quad (3)$$

donde t = tonelada del RS.

4. Finalmente, se realizó un balance de las emisiones, considerándose negativas a aquellas provenientes de materiales susceptibles de valorizar mediante su reinserción a la cadena productiva, y como emisiones positivas a los materiales no valorizables que no se pueden reincorporar a su cadena de valor.

Cálculos estequiométricos de los FE de residuos sólidos orgánicos

Se tomaron muestras aleatorias de los residuos sólidos orgánicos aplicando el método de cuarteo, como indica la NMX-AA-015-1985 (Sedue 1992). Se determinaron las características analíticas de dichas muestras con base en la norma ASTM D-2974

CUADRO III. RESUMEN DE FACTORES DE EMISIÓN DE RSU.

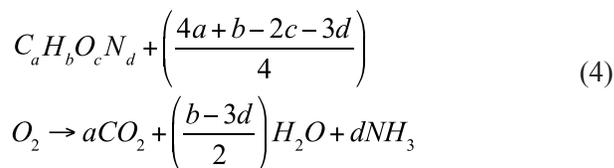
Grupos de materiales	Tipo de material	Factor de emisión calculado kg CO ₂ e/t		Factores de emisión de literatura		
		Bruto	Neto	No. de referencia	Rango	$\bar{x} \pm \sigma$
Vidrio	Vidrio	395	-314	6	-762 a -201	-417 ± 176
Papel	Papel	1576	-459	7	-3891 a 390	-1195 ± 1303
	Libros	562	-117	3	-3428 a -811	-1709 ± 1489
Metal	Latas de aluminio	1113	-8143	7	-19340 a -5040	-11334 ± 3512
	Otras chatarras de metal	883	-3577	3	-4828 a -2573	-3789 ± 1138
Plástico	Plástico mezclado					
	Tereftalato de polietileno (PET)	339	-1024	6	-2324 a -1470	-788 ± 1007
	Polietileno de alta densidad (HDPE)	155	-2192	6	-2324 a -566	-1570 ± 600
	Policloruro de vinilo (PVC)	379	-1149	5	-2324 a -253	-1055 ± 792
	Polipropileno (PP)	379	-1549	3	-2324 a -566	-1259 ± 936
		379	-1184	3	-2324 a -566	-1279 ± 925
Madera	Madera	502	-444	5	-2712 a 1	-619 ± 882
Compuestos	Envases de alimentos y bebidas (multilaminados)	629	-452	1	—	-1730
Textiles	Textiles	401	-3376	5	-7869 a -930	-3606 ± 2709
Orgánicos	Vegetales y frutas	—	-160	—	—	-160
	Comidas preparadas	—	3942	—	—	3942
Orgánicos (Este trabajo)	Residuos vegetales				-757 a -167	-428 ± 283
	Restos de comida				-3292 a -655	-1939 ± 1393

Elaboración propia con base en Turner et al. (2015) y Abeliotis et al. (2015).

(ASTM 2007). Las muestras fueron secadas a 105 °C obteniéndose el porcentaje de humedad. Posteriormente se determinó el contenido de materia volátil (550 °C), carbono fijo y cenizas (800 °C). Además, se determinó por triplicado la composición elemental (C, H, N y S) de las muestras secas, utilizando un analizador elemental Perkin Elmer PE2400 CHNS/O. El contenido de oxígeno se obtuvo por diferencia aritmética de la suma de los elementos y cenizas, respecto al 100 %.

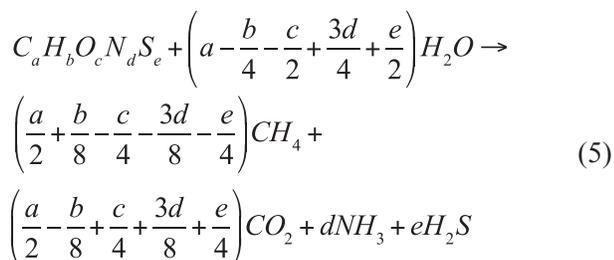
Los valores de la composición elemental fueron utilizados en el método algebraico para determinar las fórmulas químicas básicas ($C_aH_bO_cN_dS_e$). Para ello, se hizo la distribución porcentual y cálculo de la composición molar de los elementos, omitiendo las cenizas (material no degradable). Finalmente se determinaron las fórmulas químicas aproximadas con agua, con y sin azufre, tomando como referencia una relación de un mol de nitrógeno y azufre.

Con las fórmulas químicas básicas se calcularon estequiométricamente las cantidades de gases producidas en los dos principales procesos de degradación biológica (aerobio y anaerobio) de la materia orgánica, empleando como base las ecuaciones publicadas por Tchobanoglous (1994). Para la conversión aerobia, se empleó la ecuación 4, obteniéndose CO₂ como producto principal:



Tchobanoglous (1994) señala que la mayoría de los componentes orgánicos de los RSU pueden convertirse biológicamente en gases mediante procesos anaerobios. Para estimar la cantidad de biogás en condiciones anaerobias se utilizó la ecuación 5

(Boyle 1977, Tchobanoglous 1994, Sánchez et al. 2016):



El CH_4 y el CO_2 fueron los principales productos considerados como parte de los GEI. Para estandarizar los gases producto de ambos procesos en unidades de CO_{2e} , se aplicó el método de descomposición de primer orden del IPCC (Vilches et al. 2015), multiplicando la cantidad calculada de gases (proceso aerobio y anaerobio) por el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) del mismo, como se muestra en la ecuación 6:

$$tCO_{2e} = t \text{ del GEI} * PCA \quad (6)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fuentes de generación de residuos

Durante los semestres 2017-1 y 2017-2 se identificaron 26 fuentes de generación de RSU en la DACBiol, las cuales se muestran en la **figura 3**.

Generación de residuos sólidos en el CATRE

La generación promedio diaria de RSU durante 2017 fue de 148.18 ± 74.78 kg (**Fig. 4**), en tanto que la generación total anual fue de 31.41 t, lo cual cataloga a la DACBiol como gran generador de residuos de manejo especial (RME) con características urbanas, con base en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (Semarnat 2018). Con una población universitaria total de 2100 personas (estudiantes, profesores, personal de biblioteca, laboratorios, cómputo, intendencia, administrativos y comerciantes internos) y 212 días efectivos laborables, la generación per cápita obtenida fue de 0.07 kg/d.

Mediante la prueba estadística de Bonferroni con una significancia del 95 % aplicada a los valores de



FUENTES DE GENERACIÓN DE RESIDUOS EN DACBiol

1. Domo Administrativo	10. Cafetería "Mis Tres Amores"	19. Edificio H
2. Edificio Multifuncional (Laboratorios)	11. Edificio C	19. Papelería
3. Herbario	12. Cafetería "El Rinconcito"	21. Edificio Dr. Andrés Reséndes Medina
4. Edificio de fauna	13. Edificio D	22. Caseta de vigilancia
5. CICART*	14. Cafetería "El cafecito"	23. Biblioteca
UMA* de cocodrilos y tortugas	15. Edificio E	24. UVPyS*
7. Edificio A	16. Puesto "Cré-Pasó"	25. Edificio Manuel Gurria Ordóñez
8. Acuicultura	17. Edificio F	26. Mantenimiento (pasillos)
9. Edificio B	18. Puesto de aguas	

*CICART: Centro de Investigación para la Conservación y Aprovechamiento de Recursos Tropicales.

*UMA: Unidad de Manejo Sustentable

UVPyS: Unidad de Vinculación de Programas y Servicios.

Fig. 3. Fuentes de generación de residuos en la DACBiol.

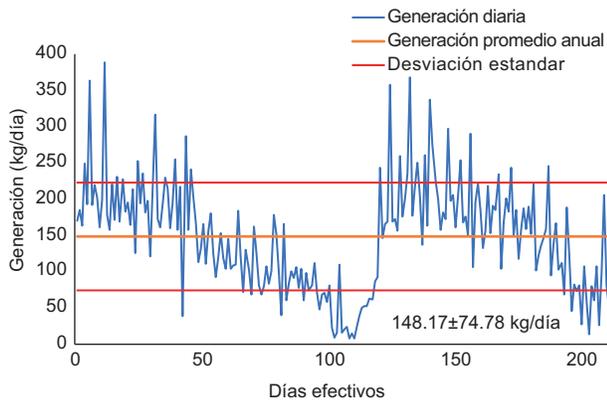


Fig. 4. Generación diaria y promedio anual de residuos sólidos urbanos en la DACBIol.

generación diaria (**Fig. 5a**), se pudo comprobar que en los acumulados de generación de RSU por día de la semana no existen diferencias estadísticas significativas ($p = 0.4742$). Sin embargo, la menor generación de RSU se presenta los miércoles, y la mayor generación los viernes. Considerando la generación acumulada en periodos mensuales (**Fig. 5b**), existen diferencias altamente significativas con un valor de $p = 0.000004$. Diciembre y enero presentaron la menor generación, que es atribuible al periodo vacacional de finales de año, mientras que septiembre presentó la mayor generación, lo cual se atribuye al inicio formal de todas las actividades universitarias, así como el semestre con mayor ingreso de estudiantes. Por último, la comparación entre periodos semestrales (**Fig. 5c**) no mostró diferencias estadísticas significativas, con un valor de $p = 0.0924$.

Los resultados obtenidos difieren de lo reportado por diversos autores, debido a factores como el número de días de monitoreo y la población total. Gallardo et al. (2016) reportan un muestreo de 215 días, pero con una población de 17 792 personas; del Ángel (2017) reportan 225 días de muestreo con una población de 2640 personas; Castillo y Luzardo (2013) reportan un periodo de tres años consecutivos con 264 días por año, aproximadamente, y una población de 6592 personas; Ruiz (2012) reporta una población de 10 000 personas con un muestreo de cuatro meses, y Vera et al. (2016) reportan una población de 4728 personas con un muestreo de ocho días. La generación per cápita obtenida en el presente estudio es superior a lo reportado por Ruiz (2012), Castillo y Luzardo (2013), Vargas et al. (2015) y del Ángel (2017), pero menor a lo reportado por Vera et al. (2016) y Gallardo et al. (2016). Es importante mencionar que la generación

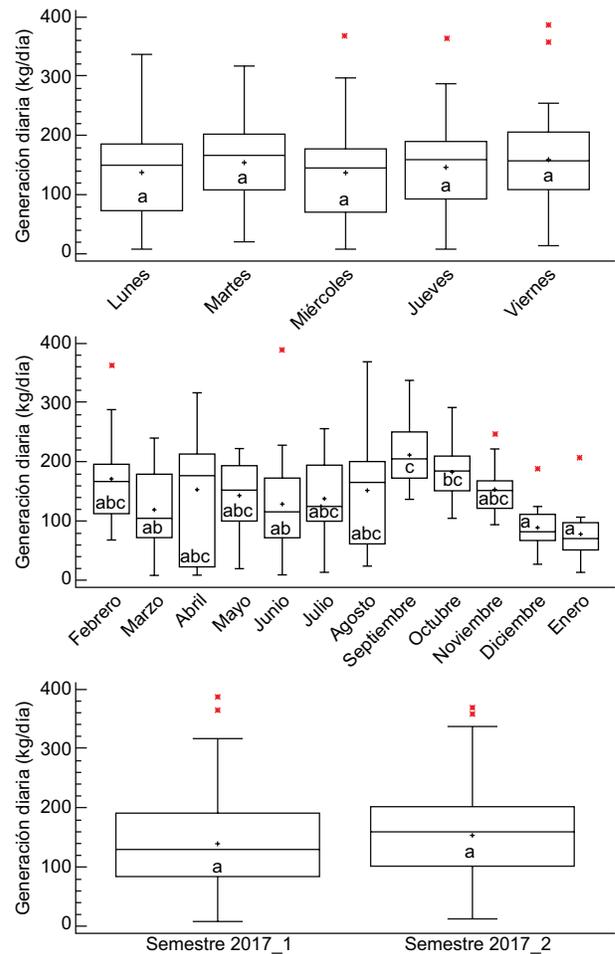


Fig. 5. Gráficos estadísticos de cajas y bigotes, mediante pruebas de Kruskal-Wallis. Generación de residuos sólidos urbanos en la DACBIol (a) por día, (b) mensual, (c) por periodo semestral.

anual en la DACBIol es equivalente a la generación diaria reportada por Adeniran et al. (2017) debido a una mayor población (57 467 personas) y, por consiguiente, mayor generación per cápita (0.204 kg/hab/d).

Se identificaron 18 subproductos que componen los RSU, de los que únicamente 13 se consideran valorizables. En el **cuadro IV** se muestran la generación total de RSU, los subproductos recuperados, el porcentaje correspondiente y el total enviado a disposición final.

El número de subproductos obtenido es relativamente similar a lo descrito por del Ángel (2017), Fagnani y Guimaraes (2017), Vargas et al. (2015), Gallardo et al. (2016), Adeniran et al. (2017) y Ruiz (2012), quienes identificaron un rango de 10 a 21 subproductos (**Cuadro II**). Es importante resaltar que

CUADRO IV. GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LOS PERIODOS SEMESTRALES 2017-1 Y 2017-2.

	Generación semestral (t)		
	2017-1	2017-2	Composición (%)
Generación total de residuos sólidos	15.5166	15.5276	—
MO Vegetal*	1.2460	0.7526	24.77
Restos de comida**	0.2242	0.0388	3.26
PET*	0.4948	0.4860	12.16
Papel de Oficina*	0.4440	0.7677	15.02
Tapas de PP*	0.0318	0.0254	0.71
Hojalata*	0.1892	0.1166	3.79
HDPE*	0.1115	0.1235	2.91
Aluminio*	0.0162	0.0207	0.46
Plástico Rígido*	0.1082	0.1028	2.62
Cartón*	0.5639	0.5228	13.47
Vidrio*	0.3167	0.2286	6.76
Fierro*	0.0841	0.0404	1.54
Palos de escoba*	0.0311	0.0090	0.50
Libros*	0.0023	0.2463	3.08
Madera**	0.0017	0.0179	0.24
Textil**	0.0010	0.0027	0.05
PVC**	0.0002	0.0005	0.01
Multilaminados**	0.0035	0.0631	0.83
Líquidos**	0.2437	0.3888	7.84
Subproductos totales	4.11	3.95	100
Subproductos recuperados	3.64	3.44	—
Disposición final	11.88	12.09	—
Recuperación (%)	23.46	22.17	—

*Subproductos valorizables, **subproductos no valorizables.

MO: materia orgánica, PET: tereftalato de polietileno, HDPE: polietileno de alta densidad, PVC: policloruro de vinilo.

existe similitud entre los subproductos descritos en la NMX-AA-22-1985 y los reportados en el presente trabajo; sin embargo, la norma puede considerarse desactualizada, debido a la gran variedad y complejidad de los subproductos que actualmente componen los RSU, además de la influencia del mercado formal e informal para la recuperación y valorización económica de dichos subproductos.

La recuperación en el primer periodo de 2017 es ligeramente mayor con una diferencia de 1.29 %. La distribución porcentual de cada subproducto identificado indica que los de mayor generación son materia orgánica vegetal (28.22 %), papel de oficina (17.11 %), cartón (15.34 %) y PET (13.85 %), cuya sumatoria representa el 74.52 % de la composición total de los RSU. Los subproductos de menor generación son textiles (0.05 %) y PVC (0.01 %). Estos resultados son similares (en orden descendente de generación, no en porcentaje de composición) a los reportados por Vargas et al. (2015) para la Universidad Tecnológica de Salamanca.

Estimación de la emisión CO_{2e} para cada tipo de residuo

En el **cuadro V** se muestra la emisión anual de CO_{2e} generada por los RSU. Como se puede observar, las celdas de color gris indican los subproductos no valorizables, por lo que su emisión calculada es positiva y, para el resto de los residuos que son valorizables, se considera negativa (**Fig. 6**).

Las emisiones negativas acumuladas fueron de 7617.40 kg CO_{2e}, lo cual se atribuye a la valorización de 7.08 t de materiales, mientras que las emisiones positivas fueron 1178.11 kg CO_{2e}, por la falta de valorización de los subproductos. Por último, la reducción neta de emisión anual fue de 6439.29 kg CO_{2e}.

Factores de emisión calculados de los residuos orgánicos

En el **cuadro VI** se muestra la caracterización de los residuos orgánicos vegetales y restos de comida. En el **cuadro VII** se muestran las fórmulas químicas obtenidas mediante el método algebraico, empleando

CUADRO V. EMISIONES DE kg CO_{2e}/t DE RESIDUOS DURANTE LOS PERIODOS SEMESTRALES 2017-1 Y 2017-2.

Subproductos	FE	2017-1		2017-2		Emisión total anual (kg CO _{2e})
		Total subproductos	Emisión (kg CO _{2e})	Total subproductos	Emisión (kg CO _{2e})	
MO vegetal	-160	1.24597	-199.36	0.752574	-120.41	-319.77
Restos de comida	3942	0.22418	883.72	0.03881	152.99	1036.71
PET	-1570	0.49475	-776.76	0.48603	-763.07	-1539.82
Papel de Oficina	-1195	0.44395	-530.52	0.76772	-917.43	-1447.95
Tapas de PP	-1279	0.031798	-40.67	0.02536	-32.44	-73.11
Hojalata	-3789	0.18918	-716.80	0.11656	-441.65	-1158.45
HDPE	-1055	0.11153	-117.66	0.12347	-130.26	-247.93
Aluminio	-11 334	0.01619	-183.50	0.02069	-234.50	-418.00
Plástico Rígido	-788	0.10818	-85.25	0.10282	-81.02	-166.27
Cartón	-1010	0.56393	-569.57	0.52278	-528.01	-1097.58
Vidrio	-417	0.31669	-132.06	0.22862	-95.33	-227.39
Fierro	-3789	0.08406	-318.50	0.04039	-153.04	-471.54
Palos de escoba	-619	0.0311	-19.25	0.00898	-5.56	-24.81
Libros	-1709	0.0023	-3.93	0.24626	-420.86	-424.79
Madera	619	0.00168	1.04	0.01789	11.07	12.11
Textil	3606	0.00096	3.46	0.00272	9.81	13.27
PVC	1259	0.00022	0.28	0.00046	0.58	0.86
Multilaminados	1730	0.0035	6.06	0.06307	109.11	115.17
Totales	—	3.87	-2 799.27	3.56	-3 640.02	-6439.29

MO: materia orgánica, PET: tereftalato de polietileno, HDPE: polietileno de alta densidad, PVC: policloruro de vinilo.

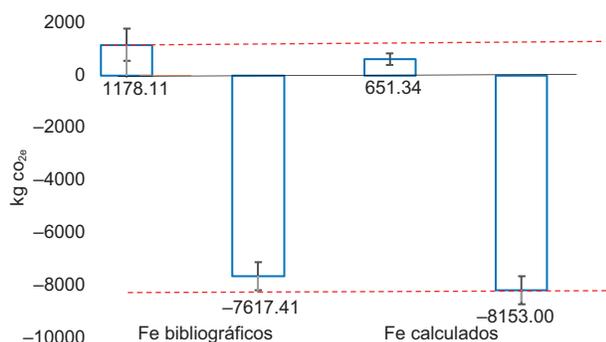


Fig. 6. Comparación de las emisiones obtenidas por cada tipo de factor de emisión utilizado.

los datos de generación anual (1.99 y 0.26 t de residuos vegetales y restos de comida, respectivamente). En el **cuadro VIII** se muestran las cantidades teóricas de gases obtenidos en cada proceso, por cada tipo de residuos.

Puesto que el CO₂ tiene un PCA igual a 1, la cantidad en t de CO₂ es directamente proporcional al CO_{2e}. Las cantidades de CH₄ (proceso anaerobio) deben convertirse a valores de CO_{2e}, aplicando un PCA de 21 respecto al CO₂ (IPCC 2018).

En el proceso aerobio se producirían 0.344 y 0.176 t CO_{2e} para cada tipo de residuo, y la emisión total estimada fue de 0.52 t CO_{2e}. La emisión generada por el proceso anaerobio es muy superior a lo generado por el proceso aerobio, debido a la conversión

CUADRO VI. COMPOSICIÓN ANALÍTICA Y ELEMENTAL DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS (VEGETALES Y RESTOS DE COMIDAS).

Residuo	Análisis próximos (%)				Análisis últimos (%)				
	Humedad	Material volátil	Carbono fijo	Cenizas	C	H	O	N	S
Vegetales	84.81	75.01	11.98	13.01	37.95	5.52	40.41	2.90	0.20
Comidas	60.86	80.42	9.97	9.61	49.22	7.29	29.45	4.08	0.36

CUADRO VII. FÓRMULAS OBTENIDAS PARA RESIDUOS ORGÁNICOS.

Fórmula	Tipo de residuo		Aplicación
	Vegetales	Comidas	
Sin azufre, con agua	C _{15.27} H _{26.70} O _{14.60} N ₁	C _{14.08} H _{24.86} O _{6.80} N ₁	Proceso aerobio
Con azufre y agua	C _{499.24} H _{873.21} O _{477.38} N _{32.70} S ₁	C _{368.13} H _{648.39} O _{165.34} N _{26.14} S ₁	Proceso anaerobio

CUADRO VIII. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE GASES (CO₂ Y CH₄) Y SU CONVERSIÓN A CO_{2e}.

Proceso	Residuo	Gas	Generado (t)	PCA	CO _{2e} (t)	Emisión total (t CO _{2e})
Aerobio	Vegetales	CO ₂	0.344	1	0.344	0.344
	Restos de comida	CO ₂	0.176	1	0.176	0.176
	Σ = 0.52					
Anaerobio	Vegetales	CH ₄	0.056	21	1.174	1.365
		CO ₂	0.191	1	0.191	
	Restos de comida	CH ₄	0.037	21	0.769	0.844
		CO ₂	0.075	1	0.075	
		Σ = 2.209				

PCA: potencial de calentamiento atmosférico.

de CH₄ a CO₂. Los resultados de las emisiones para los residuos vegetales fue de 1.365 t CO_{2e}, y para residuos de comida de 0.844 t CO_{2e}, sumando un total de 2.21 t CO_{2e}.

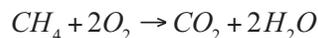
Con las cantidades de emisión total se calcularon los FE, los cuales se obtuvieron relacionando la cantidad de emisión generada (toneladas de CO_{2e}) en cada uno de los procesos de degradación, entre la cantidad generada (en kilogramos) de cada residuo orgánico (**Cuadro IX**).

En algunos sitios de disposición final, el biogás producido por la descomposición de los RSU es aprovechado como combustible en sistemas de cogeneración, convirtiéndose en un insumo asequible

CUADRO IX. FE CALCULADOS PARA RESIDUOS ORGÁNICOS.

Residuo	Proceso	
	Aerobio	Anaerobio
	FE (kg CO _{2e} /t)	FE (kg CO _{2e} /t)
Vegetales	172	683
Comidas	667	3 210

que puede disminuir la contaminación atmosférica (Camargo y Vélez 2009, Robles 2008). Además, en México, la quema de biogás en los rellenos sanitarios es un requerimiento establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Semarnat 2004). En un escenario donde el CH₄ es utilizado como un insumo en sistemas de combustión, se produce la siguiente reacción química:



donde la proporción de CH₄ a CO₂ es 1:1; por lo tanto, si se queman los 55.91 y 36.63 kg de CH₄ de residuos vegetales y comida, respectivamente (**Cuadro VIII**), se producirían 153.77 y 100.75 kg de CO₂. Al total de CO₂ generado por la combustión se suma la cantidad de CO₂ implícita en el biogás generado, dando como resultado las siguientes cantidades totales de CO_{2e} por cada tipo de residuo:

$$kg \text{ CO}_{2e} (\text{residuos vegetales}) =$$

$$153.77 + 190.6 = 344.36$$

$$kg \text{ CO}_{2e} (\text{residuos de comida}) =$$

$$100.75 + 74.76 = 175.51$$

Así, se tiene finalmente una emisión de 0.519 t CO_{2e}, la cual podría reducir un 76.51 % la cantidad de emisiones de CO_{2e} por el posible uso de CH₄ como combustible. De esta manera, se tienen tres escenarios de emisión de CO_{2e} por cada residuo orgánico, los cuales se muestran en la **figura 7**.

En el primer escenario (proceso anaerobio), se observa la mayor cantidad de toneladas de CO_{2e} debido a la conversión de CH₄ en CO₂. En el segundo escenario (proceso anaerobio y combustión de CH₄), se observa una reducción en las toneladas CO_{2e}, que se logran igualar a las generadas en la transformación aerobia (0.519 t CO_{2e}, respecto a 0.52 t CO_{2e}), en el supuesto de que se lleva a cabo la combustión de CH₄. El tercer escenario muestra la cantidad de toneladas de CO_{2e} producidas de forma directa en el proceso aerobio.

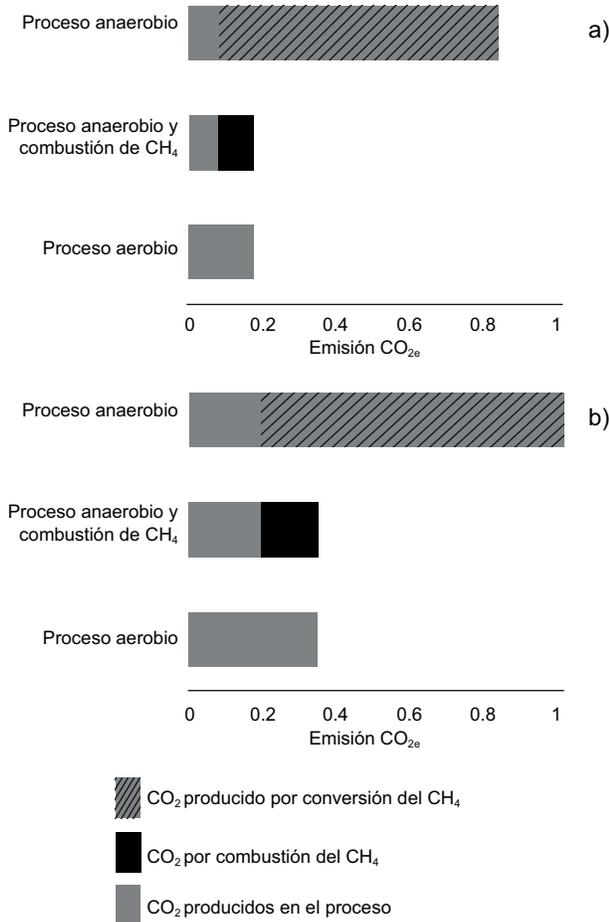


Fig. 7. Escenarios de emisión acumulada por tipo de proceso biológico y combustión de CH₄. (a) residuos vegetales, (b) residuos de comida.

Finalmente, los FE por tonelada de fracción orgánica generada, considerando el aprovechamiento del CH₄ generado en el proceso, se muestran en el **cuadro X**.

CUADRO X. RANGO DE FE CALCULADOS PARA RESIDUOS ORGÁNICOS.

Residuo	FE (kg CO _{2e} /t)	
	Rango	$\bar{x} \pm \sigma$
Vegetales	-757 a -167	428 ± 283
Comidas	-3 292 a -655	1939 ± 1393

En la **figura 6** se comparan las emisiones calculadas utilizando los FE bibliográficos y los obtenidos en este estudio. Se puede apreciar que hay un ajuste en las emisiones con el uso de los FE calculados. La emisión positiva ajustada muestra una disminución con un acumulado de 651.34 kg CO_{2e} (cuartil inferior: 12.11; cuartil superior: 115.16 kg CO_{2e}). Para el caso de las emisiones negativas el ajuste indica un aumento acumulado de -8153.00 kg CO_{2e} (cuartil inferior: -1097.58; cuartil superior: -227.39 kg CO_{2e}). Estos ajustes indican una mayor precisión en los cálculos de emisiones, obteniéndose finalmente la emisión neta ajustada de 7501.66 kg CO_{2e}. Finalmente, existe una diferencia de 1062.37 kg CO_{2e}, que representa un aumento del 14.16 % en las emisiones netas con el uso de los FE calculados, mejorando la precisión en la estimación de las emisiones.

CONCLUSIONES

Este estudio aborda la generación y composición de residuos sólidos en una universidad durante un año de monitoreo y la metodología de cálculos estequiométricos para determinar los FE, respecto a la propia composición de los RS generados. Los análisis estadísticos permitieron determinar que la generación de RS no varía entre los dos periodos lectivos analizados. La generación de RS en cada día de la semana analizada no presentó variaciones significativas. Fue notoria la variación en la generación respecto a los periodos mensuales, específicamente aquellos en que hay periodos vacacionales.

Los resultados obtenidos indican que un tercio de la generación de RS en la DACBiol está representado por residuos orgánicos y otro tercio por residuos de papel y cartón, los cuales podrían reducirse debido a las

nuevas modalidades de digitalización de documentos internos y el uso de bibliotecas y repositorios virtuales.

La demanda actual de algunos materiales susceptibles de valorización a partir de residuos sólidos (papel, cartón y tereftalato de polietileno) influye sustancialmente en la recuperación, favoreciendo su aprovechamiento. Sin embargo, el mercado de algunos materiales sigue siendo variable e intermitente, lo que evita la valorización de materiales como los envases multilaminados y textiles, favoreciendo su contribución a las emisiones positivas de CO_{2e}.

Los FE obtenidos en este estudio, basados en la composición de los residuos de la DACBiol, muestran un mejor ajuste en los resultados finales de emisiones totales. Con estos FE se observa una disminución en las emisiones positivas y un incremento en las emisiones negativas. Por lo tanto, el uso de FE obtenidos con base en las características propias de los residuos orgánicos permite estimar con mayor exactitud las emisiones fugitivas por el manejo de los residuos sólidos.

Mediante cálculos estequiométricos se pudo determinar la importancia de la quema de biogás en los sitios de disposición final, ya que el aprovechamiento del CH₄ como combustible contribuye a reducir los impactos de las emisiones a la atmósfera del sector de residuos.

Finalmente, una adecuada separación en la fuente de residuos sólidos urbanos que evite mezclar residuos líquidos, sanitarios u orgánicos, contribuiría a una mejor recuperación de subproductos, que a vez podría reducir sustancialmente la alta cantidad de residuos enviada a disposición final.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos el apoyo de la División Académica de Ciencias Biológicas en el financiamiento de los análisis elementales de las muestras orgánicas mediante el proyecto PI #432 “Estimación de las emisiones de CO₂ equivalentes por la separación de residuos en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos de la DACBiol”.

REFERENCIAS

- Abeliotis K., Lasaridi K., Costarelli V. y Chroni C. (2015). The implications of food waste generation on climate change: The case of Greece. *Sustainable Production and Consumption* 3, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.06.006>
- Adeniran A., Nubi A. y Adelopo A. (2017). Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. *Waste Management* 67, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002>
- ANUIES (2002). Plan de Acción para el Desarrollo Sustentable en las Instituciones de Educación Superior. Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior. Libro electrónico. Ciudad de México, México, 35 pp.
- Armijo de Vega C., Ojeda S., Ramírez E. y Quintanilla M.A. (2006). Potencial de reciclaje de los residuos de una institución de educación superior: el caso de la Universidad Autónoma de Baja California. *Ingeniería* 10 (3), 13-21.
- ASTM (2007). Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils (D 4254). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2974-07A>
- Bogner J., Abdelrafie M., Díaz C., Faaij A., Gao Q., Hashimoto S., Mareckova K., Pipatti R. y Zhang T. (2007). Waste management. En: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change* (Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R. y Meyer L.A., Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 585-618. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013.014>
- Boyle W.C. (1977). Energy recovery from sanitary landfills-a review. *Microbial Energy Conversion*, 119-138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-021791-8.50019-6>
- Camargo Y. y Vélez A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. Memorias. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, Colombia, 24 y 25 de septiembre.
- Castillo L.E. y Luzardo M. (2013). Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. *Revista Facultad de Ingeniería* 22 (34), 71-84.
- Cucchiella F., D'Adamo I. y Gastaldi M. (2017). Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energ. Convers. Manage.* 131, 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012>
- Damgaard A., Larsen A.W. y Christensen T.H. (2009). Recycling of metals: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage. Res.* 27, 773-780. <https://doi.org/10.1177/0734242X09346838>
- Del Ángel M.M. (2017). Propuesta para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en una institución de educación superior. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa* 4 (7), 1-19.

- Fagnani E. y Guimaraes J.R. (2017). Waste management plan for higher education institutions in developing countries: The Continuous Improvement Cycle model. *J. Cleaner Prod.* 147, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.080>
- Gallardo A., Edo-Alc6 N., Carlos M. y Renau M. (2016). The determination of waste generation and composition as an essential tool to improve the waste management plan of a university. *Waste Management* 53, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.013>
- Hoonweg D. y Bhada-Tata P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. Urban development series; knowledge papers no. 15. World Bank, Washington, DC [en l6nea]. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
- INECC (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Reporte. Instituto Nacional de Ecolog6a y Cambio Clim6tico y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales [en l6nea]. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> 09/05/2021
- IPCC (2015). Cambio clim6tico 2014. Mitigaci6n del cambio clim6tico. Resumen para responsables de pol6ticas. Contribuci6n del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluaci6n del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Clim6tico, Suiza, 33 pp.
- IPCC (2018). Resumen para responsables de pol6ticas. Calentamiento global de 1.5 6C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 6C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deber6an seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio clim6tico, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Clim6tico. Resumen. 32 pp.
- ISO (2006). ISO 14040 Gest6n ambiental-an6lisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. International Organization for Standardization.
- Maldonado L. (2006). Reducci6n y reciclaje de residuos s6lidos urbanos en centros de educaci6n superior. Estudio de caso. *Ingenier6a* 10 (1), 59-68.
- Merrild H., Damgaard A. y Christensen T. (2009). Recycling of paper: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage. Res.* 27 (8), 746-753. <https://doi.org/10.1177/0734242X09348530>
- Ramachandra T., Bharatha H., Kulkarnia G. y Sheng Han S. (2018). Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 82, 1122-1136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.085>
- Robles F. (2008). Generaci6n de biog6s y lixiviados en los rellenos sanitarios. 2a ed. Instituto Polit6cnico Nacional, M6xico, 115 pp.
- Romero L.G., Salas J.C. y Jim6nez A.J. (2008). Manejo de desechos en universidades. Estudio de caso: Instituto Tecnol6gico de Costa Rica. *Tecnolog6a en Marcha* 21 (3), 33-41.
- Ruiz M. (2012). Caracterizaci6n de residuos s6lidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad De M6xico. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 (1), 93-97.
- Ruisheng N., Chee P.S., Hui T. y Bin S. (2014). Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: An assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *J. Cleaner Prod.* 65, 447-457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.053>
- Salmer6n Y.A., Cabrera R.B.E, Ju6rez A.L., Sampedro M.L., Rosas J.L. y Rol6n J.C. (2017). Emisiones de gases de efecto invernadero en vertederos de residuos s6lidos urbanos. Huella de carbono en Acapulco, M6xico. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 4 (1), 64-79.
- S6nchez L.M., Laines J.R. y Sosa J.A. (2016). Estimaci6n del potencial te6rico de biog6s en una granja de producci6n lechera de Tabasco. *Ciencia UANL* 19 (80), 54-56.
- Sedema (2020). Inventario de residuos s6lidos de la Ciudad de M6xico 2019. Informe. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de M6xico, M6xico, 226 pp.
- Sedue (1992). NMX-AA-15-1985-Protecci6n al ambiente. Contaminaci6n del suelo. Residuos s6lidos municipales. Muestreo. M6todo de cuarteo. Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecolog6a. Diario Oficial de la Federaci6n, 6 de noviembre.
- Sedue (1992). NMX-AA-22-1985. Protecci6n al ambiente. Contaminaci6n del suelo. Residuos s6lidos municipales, Selecci6n y Cuantificaci6n de subproductos. Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecolog6a. Diario Oficial de la Federaci6n, 6 de noviembre.
- Semarnat (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protecci6n ambiental para la selecci6n del sitio, dise1o, construcci6n, operaci6n, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposici6n final de residuos s6lidos urbanos y de manejo especial. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federaci6n, 20 de octubre.
- Semarnat (2018). Ley general para la prevenci6n y gesti6n integral de los residuos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, M6xico, 53 pp.
- Semarnat (2020). Diagn6stico b6sico para la gesti6n integral de los residuos. Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales. M6xico, 274 pp.

- Tchobanoglous G. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. México. McGraw-Hill, Madrid, 1107 pp.
- Turner D.A., Williams I.D. y Kemp S. (2015). Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026>
- US-EPA (2006). *Solid waste management and greenhouse gases. A life cycle assessment of emissions and sinks*. United State Environmental Protection Agency. Washington DC, USA.
- Vargas O., Alvarado E., López C. y Cisneros V. (2015). Plan de manejo de residuos sólidos generados en la Universidad Tecnológica de Salamanca. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 2 (5), 83-91.
- Vera P., Nájera H.A., García C.M. y Solís M. (2016). Manejo de residuos sólidos no peligrosos en una institución de educación superior. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo* 5 (12), 90-103. <https://doi.org/10.31644/imasd.12.2016.a06>
- Vilches R., Dávila F. y Varela S. (2015). Determinación de la huella de carbono en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus sur. Año base 2012. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 21 (1), 34-45. <https://doi.org/10.17163/lgr.n21.2015.03>
- Ying C. (2016). Potential for energy recovery and greenhouse gas mitigation from municipal solid waste using a waste to material approach. *Waste Management* 58, 408-414. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.007>