

I. El ciclo de los residuos y el manejo integral de los residuos

Los residuos son complicados de especificar/acotar de una manera permanente por estar directamente relacionados con las actividades de la sociedad en que se producen, es por ello que su definición varía en el tiempo/espacio/cultura considerando principalmente: composición, fuente de generación e impacto hacia el ambiente y la salud humana. Ante esta diversidad y del análisis realizado en el presente documento y en particular en éste primer capítulo, se propone la siguiente definición:

Residuo: materia/energía cuyo valor de uso para el usuario, propietario y/o generador se transformó en inexistente en el actual contexto, social, económico y tecnológico, es por ello que decide desprenderse de ella transfiriendo su posesión a otro actor, asumiendo las potenciales externalidades que implique el manejo de esa materia/energía.

En un contexto de desarrollo sustentable, es decir, aquel que equilibra los aspectos **ambientales**, **sociales** y **económicos**, se propone en este trabajo el manejo integral de los residuos con un enfoque de seis “R” (6R’s): **Reducción**, **Reciclado**, **Responsabilidad**, **Relevancia**, **Rentabilidad** y **Reúso** (6R’s). Se tomaron como características fundamentales: cantidad de generación, composición, densidad y contenido de energía de los materiales.

Este capítulo integra varias visiones con relación a los residuos/residuos sólidos, características y ciclo de manejo; la discusión sobre estos temas y el desarrollo de una Teoría de los residuos son temas que al momento de finalizar este trabajo continúan abiertos.

Características de los residuos sólidos

En un sentido más amplio, el término *residuos sólidos* incluye todos los materiales sólidos desechados de actividades municipales, industriales o agrícolas. (J. Glynn y Gary W. 1999, 567)

En términos generales, los *residuos sólidos* se definen como aquellos desperdicios que no son transportados por agua y que han sido rechazados porque ya no se van a utilizar. En el caso de los residuos sólidos municipales se aplican términos más específicos a los residuos de alimentos putrescibles (biodegradables), llamados basura, y a los residuos sólidos no putrescibles, los cuales se designan simplemente como desechos. Los desechos incluyen diversos materiales, que pueden ser combustibles (papel, plástico, textiles, etc.) o no combustibles (vidrio, metal, mampostería, etc.). Existen residuos, en ocasiones llamados especiales, como el cascajo de las construcciones, las hojas de los árboles y la basura callejera, los automóviles abandonados y también los aparatos viejos, que se recolectan a intervalos esporádicos en diferentes lugares.[...]

Los residuos sólidos son aquellos materiales, sin incluir líquidos o gases, que, a juicio de las personas que los generan, no presentan ningún tipo de valor y deben desecharse. Dichos residuos

se generan casi en cualquier tipo de actividad, y su cantidad varía según el tipo de fuente, estación climatológica, zona geográfica, y tiempo de duración de la actividad. (A. Corbit 2003, 8.1)

Los residuos sólidos pueden generarse a partir de la actividad de desecho de cualquier individuo particular o colectivo de personas (generador de residuos). El concepto de desecho o desperdicio viene determinado por la generación de materiales que no poseen un valor determinado para las personas que los generan, ya que dichos residuos pueden representar una fuente de ingresos para otras personas, a través de procesos de reciclado o reutilización. (A. Corbit 2003, 8.2)

Sin embargo, en el intento por concretar una Teoría de los residuos sólidos, Pongrácz pone el cuestionamiento sobre estas definiciones, haciendo el siguiente planteamiento “La implicación de que los residuos es algo inútil ha sido problemático.” (Pongrácz 2002, 17) La tesis doctoral de esta autora replantea las definiciones/descripciones de los residuos ordenándolos con base en las “razones por las que se convirtió en residuo”, iniciando la estructuración teórica de los residuos, su manejo y gestión con una propuesta taxonómica inspirada en la metodología Purpose, Structure, State and Performance (PSSP) y con un enfoque similar a los planteados por la Ecología industrial y el Ciclo de vida.

Los residuos son un concepto de valor, cultural y subjetiva interpretación de la persona, ya sea el observador o el generador. El concepto de residuos se relaciona con dos aspectos principales. En primer lugar, algo se convierte en residuos cuando pierde su función primordial para el usuario, por lo tanto, muchas veces el residuos de alguien es materia prima de alguien más. En segundo lugar, el concepto de residuo está relacionado con el estado actual de las tecnologías y técnicas y la ubicación de su generación. Por lo tanto, los residuos son un concepto dinámico, ver tabla I.1. (Pongrácz 2002, 69,70)

Tabla I.1. Definición de clases de residuos y ejemplos

Definición por clase	Ejemplos
1. Objetos no requeridos, creados sin intención, no evitados, sin propósito definido.	En esta clase se encuentran productos con valor de mercado negativo, subproductos inútiles, emisiones, residuos industriales y de procesos, residuos de limpieza y sanitarios, entre otros.
2. Objetos que se les dio un propósito limitado, por lo tanto, se vuelven inútiles después de cumplirlo.	En esta clase se encuentran productos de un solo uso: la mayoría de envases, empaques, embalaje y envolturas, cámaras de un uso, pañales desechables y en general productos “desechables”, entre otros.
3. Objetos con un propósito bien definido, pero su desempeño dejó de ser aceptable.	En esta clase se encuentran productos obsoletos, muebles viejos, electrodomésticos, computadoras, celulares inservibles, baterías no recargables, equipo y maquinaria cuya vida útil terminó, residuos de demoliciones, entre otros.
4. Objetos con un propósito bien definido, un buen desempeño, pero que sus usuarios ya no los utilizan para los fines previstos.	En esta clase se encuentran productos en mal estado, productos que se utilizan en exceso, los que van más allá de su objetivo, o simplemente productos que los propietarios no desean tener más. Podrían ser perfectamente útiles, residuos que se deben exclusivamente al “des-uso” que el propietario les confiere, con frecuencia no son recuperables. Ésta clase representa la esencia del despilfarro.

Fuente: adaptación de (Pongrácz 2002, 82)

En este mismo sentido, propone un diagrama de flujo para identificar un residuo de algo que no lo es, se muestra en la figura I.1.

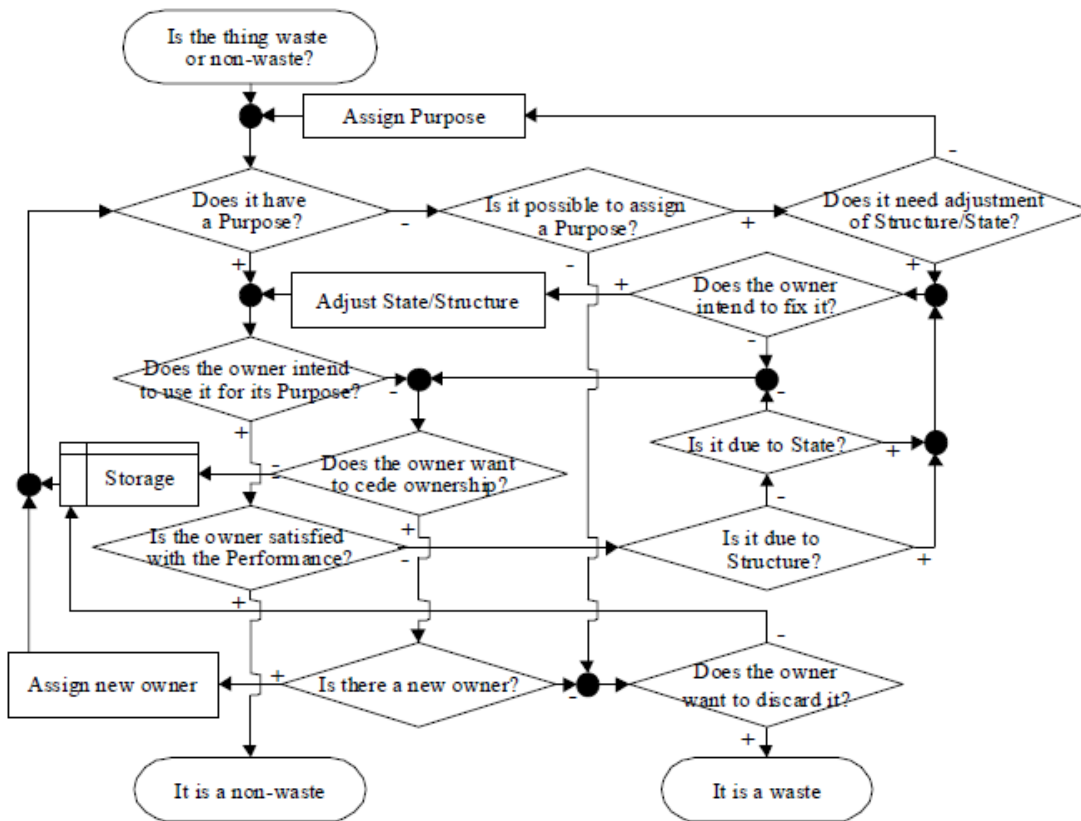


Figura I.1. Diagrama de flujo para clasificar un residuo

Fuente: (Pongrácz 2002, 84)

La legislación mexicana en la materia es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), que en su artículo 5, define:

XXIX. Residuo: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra 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 conforme a lo dispuesto en esta Ley [LGPGIR] y demás ordenamientos que de ella deriven;

XXX. Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos;

XXXII. Residuos Peligrosos: Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido

contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley [LGPGIR].

XXXIII. Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimiento o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley [LGPGIR] como residuos de otra índole. (Cámara de Diputados 2007)

Según Tchobanoglous, la porción municipal de los residuos sólidos totales generados representa sólo el 5%, pero es objeto de la máxima atención en virtud del efecto que su eliminación incorrecta puede tener en la salud pública y en el abasto de aguas tanto superficiales como subterráneas. (J. Glynn y Gary W. 1999, 568)

Hasta finales de la década de 1940, el grueso de los residuos sólidos municipales consistía en cenizas de hornos de quemadores de carbón y residuos de alimentos. Los pocos materiales usados, como metales y trapos, que eran recuperables, se recolectaban de manera informal por los pepenadores.[...] Las dos causas radicales de la creciente urgencia de los problemas que plantean los residuos sólidos son la urbanización y la industrialización. La primera (la afluencia de personas a las áreas metropolitanas) afecta los hábitos de vida y en consecuencia las características de los residuos. Además, en virtud del mayor número de personas, las áreas que requieren recolección de residuos sólidos se han expandido y los predios destinados a la eliminación de los residuos están más lejos. La industrialización, debido a que genera productos de bajo costo y que ahorran trabajo, ha creado una sociedad "desechable". Durante los años sesenta y setenta apareció una profusión de productos nuevos. En el caso de latas, botellas, recipientes de plástico, aparatos, neumáticos y muchos otros artículos se consideraba que era más económico tirarlos que reciclarlos. (J. Glynn y Gary W. 1999, 569)

Cantidad. En 1990, la EPA estimaba que la generación de residuos sólidos municipales en Estados Unidos era alrededor de 4.3 lb/persona*día (2 kg/persona*día). Esta estimación se compara favorablemente con la de Tchobanoglous et al, ver tabla I.2, quien informó un valor de 6.1 lb/persona*día (2.8 kg/persona*día) de residuos sólidos, cuando se incluyen cosas como residuos de construcción y demolición y lodos de plantas de tratamiento (estos componentes no se incluyen en los datos de la EPA). (J. Glynn y Gary W. 1999, 572)

Tabla I.2. Estimados de residuos sólidos generados por persona en Estados Unidos, y en particular en California y Florida para 1990

Fuente de residuos sólidos	Estados Unidos		California		Florida	
	kg/persona*día	lb/persona*día	kg/persona*día	lb/persona*día	kg/persona*día	lb/persona*día
Municipal ^a	2.8	6.1	3.1	6.8	2.7	6.0
Industrial	1.0	2.1	1.2	2.7	0.6	1.4
Agrícola	b	b	3.7	8.2	1.2	2.7
Total	3.1-9.6	6.8-21	8.1	17.8	4.4	9.6

^a Incluye residencial a 1.1 kg/día, comercial a 0.9 kg/día, y residuos especiales a 0.8 kg/día

^b Estimados por separado para cada lugar

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et al. (1993)

Para Corbit la generación de residuos sólidos puede subdividirse en doméstica y no doméstica, dependiendo de su fuente de origen. Los residuos sólidos de origen doméstico, generalmente, se consideran como residuos de tipo caseros o familiares; mientras que los residuos de origen no doméstico están constituidos por desechos generados en actividades comerciales, pequeñas industrias y otros residuos sólidos. (A. Corbit 2003, 8.2)

Los residuos sólidos generados en zonas residenciales, normalmente, se estiman en libras (kilogramos) per cápita y por día. Este tipo de unidades de medida es el adecuado para llevar a cabo estimaciones globales del dimensionado de las instalaciones de vertido, de su uso y de la operatividad de los recursos de recuperación. [...] La medida de la cantidad de desperdicios de origen doméstico, considerando las zonas con servicios de recogida de basuras, indica que la generación de residuos sólidos por semana puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$G = a + bP$$

donde:

G = la generación de desperdicios de la finca en masa por semana y por finca

a, b = constantes determinadas por estudio de las medidas de los desechos

P = media de personas por finca en el área de muestreo

(A. Corbit 2003, 8.2,8.3)

Varias agencias han evaluado la generación de residuos sólidos de diferentes fuentes no domésticas, ver tabla I.3.

Tabla I.3. Factor unitario de residuos sólidos para diferentes focos generadores

Categoría o foco generador	Factor unitario de residuos	
Comercial	5.75 lb/empleado/día	2.6 kg/empleado/día
Industrial	10.6 lb/empleado/día	4.8 kg/empleado/día
Equipos de transporte	20.5 lb/empleado/día	9.3 kg/empleado/día
Maquinaria no eléctrica	25.5 lb/empleado/día	11.6 kg/empleado/día
Maquinaria eléctrica	23.5 lb/empleado/día	10.7 kg/empleado/día
Hospitales	2 a 4.5 lb/control/día	0.91 a 1.8 kg/control/día
Cuidado de pacientes	8.6 lb/cama/día	3.9 kg/cama/día
Servicios de comidas	2.7 lb/cama/día	1.2 kg/cama/día
Rehabilitación	6.4 lb/cama/día	2.9 kg/cama/día
Prisiones	4.5 lb/preso/día	2.0 kg/preso/día
Universidades y colegios mayores	1.0 lb/estudiante/día	0.5 kg/estudiante/día
Colegios sin residencia	0.6 lb/estudiante/día	0.3 kg/estudiante/día
Edificios de oficinas	1.5 lb/empleado/día	0.7 kg/empleado/día
Unidades de múltiples viviendas	2.7 lb/residente/día	1.2 kg/residente/día
Industria maderera	151.0 lb/empleado/día	68.6 kg/empleado/día
Escombros de demolición/construcción	1.2 lb/cápita/día	0.5 kg/cápita/día
Servicio de barrenderos de la vía pública	0.3 lb/cápita/día	0.1 kg/cápita/día
Agricultura	13.0 lb/cápita/día	5.9 kg/cápita/día
Campings (zonas de acampada)	1.3 lb/campista/día	0.6 kg/campista/día
Reuniones familiares al aire libre	1.0 lb/persona	0.5 kg/persona
Reuniones de grupos al aire libre	1.16 lb/persona	0.53 kg/persona
Campamentos organizados	1.81 lb/ocupante/día	0.82 kg/ocupante/día
Áreas de servicio		
Alquiler de habitación (con cocina)	1.46 lb/ocupante/día	0.66 kg/ocupante/día
Alquiler de habitación (sin cocina)	0.59 lb/ocupante/día	0.27 kg/ocupante/día
Restaurante	0.71 lb/comida servida	0.32 kg/comida servida
Residencia	2.31 lb/ocupante/día	1.05 kg/ocupante/día
Área de esquí		
Pensión nocturna (acondicionada)	1.87 lb/visitante-día	0.85 kg/visitante-día
Pensión diurna (acondicionada)	2.92 lb/visitante-día	1.33 kg/visitante-día
Zona de descanso de carretera	0.05 lb/eje de vehículo	0.02 kg/eje de vehículo
Centro para visitantes	0.02 lb/visitante	0.01 kg/visitante
Playa	0.04 lb/bañista	0.02 kg/bañista
Puestos concesionarios (stands)	0.14 lb/patrón	0.06 kg/patrón
Residencia administrativa	1.37 lb/ocupante/día	0.62 kg/ocupante/día

Fuente: adaptación de (A. Corbit 2003, 8.5)

Composición. Además de las variaciones en cuanto a cantidad, puede haber también grandes diferencias de composición, ver tabla I.4. y I.5. Los factores que influyen en la composición de los residuos sólidos municipales incluyen algunos como:

- El clima. En áreas húmedas como Sao Paulo, Brasil, el contenido de humedad de los residuos sólidos es comúnmente de 50%.

- La frecuencia de recolección. Las recolecciones más frecuentes tienden a aumentar la cantidad anual. Puesto que la cantidad de materiales orgánicos es relativamente constante, quizá con más recolecciones los residentes tienden a desechar más papel y escombros.
- El uso común de molinos domésticos para basura. Los molinos reducen, pero no eliminan, los residuos de alimentos.
- Las costumbres sociales. Ciertas áreas étnicas consumen pocos alimentos de preparación rápida, por lo cual se producen menos residuos de papel y más de alimentos crudos.
- El ingreso per cápita. Las áreas de bajos ingresos producen menos residuos totales, aunque con un contenido alimenticio mayor.
- La aceptabilidad de alimentos empacados y de preparación rápida. En Estados Unidos y Canadá el uso generalizado de los empaques ha aumentado el contenido de papel de los residuos sólidos.
- El grado de urbanización e industrialización del área. En virtud de la conversión en abono, el reciclaje y la recuperación que son posibles en áreas rurales y en áreas de viviendas unifamiliares, los residuos sólidos de este tipo de fuentes pueden ser inferiores en cuanto a cantidad y tener distintos componentes que los de áreas metropolitanas industrializadas con viviendas multifamiliares, la composición de los residuos es diferente en áreas con mayor urbanización y/o grado de industrialización. (J. Glynn y Gary W. 1999, 572)

Tabla I.4. Composición de los residuos sólidos municipales por país (porcentaje en peso)

Componente	Estados Unidos (1991)	Francia (1987)	Helsinki, Finlandia (1990)	Brisbane, Australia (1990)	Egipto (1986)
Papel	38	28	39	30	13
Plástico	8	5	10	11	2
Alimentos	7	25	25 ^a	18	60
Residuos de jardín (recortes)	18	-	-	24	-
Vidrio	7	8	3	7	2
Metales	8	6	4	6	3
Caucho, cuero, textiles, madera	11	6	7	-	2
Diversos ^b	3	22	12	4	18

^a Residuos de alimentos y de jardín combinados

^b Diversos: ceniza, polvo, materia inorgánica, etcétera

Fuente: (J. Glynn y Gary W. 1999, 573)

Por otra parte, los residuos municipales están constituidos tanto por materiales como por productos; entendiéndose por materiales en residuos municipales, compuestos como papel y cartón,

tejidos, vidrio, metal, plásticos, madera y basuras procedentes de residuos de comida. (A. Corbit 2003, 8.4)

Tabla I.5. Composición de residuos municipales por generación y recuperación

Material	Peso generado millones toneladas	% peso generado	Peso recuperado millones toneladas	% recuperado/ generado
Papel y cartón	81.5	39.2%	32.6	40.0%
Vidrio	12.8	6.2%	3.1	24.2%
Metales				
Metales ferrosos	11.6	5.6%	4.2	36.2%
Aluminio	3	1.4%	1	33.3%
Otros metales no ferrosos	1.3	0.6%	0.9	69.2%
Plásticos	19	9.1%	1	5.3%
Caucho y cuero	6	2.9%	0.5	8.3%
Material textil	7.4	3.6%	0.9	12.2%
Madera	14.9	7.2%	1.4	9.4%
Otros materiales	3.6	1.7%	0.8	22.2%
Otros residuos				
Desperdicios de comida	14	6.7%	0.6	4.3%
Recortes (de césped)	29.8	14.3%	9	30.2%
Inorgánicos varios	3.2	1.5%	a	a
Total de otros residuos	46.9	22.5%	9.6	20.5%
Total de residuos sólidos municipales	208.1		56.0	26.9%

^a Cantidades despreciables

Fuente: (A. Corbit 2003, 8.9)

Densidad. La densidad de los residuos sólidos municipales varía con la composición de los mismos y su grado de compactación, ver tabla I.6. y I.7. Los valores representativos van desde una densidad no compacta de 150 kg/m³ hasta 800 kg/m³ para desechos pulverizados y enterrados. (J. Glynn y Gary W. 1999, 573)

Tabla I.6. Densidades representativas sin compactación para componentes de residuos municipales

Componentes	Densidad ^a	
	kg/m ³	lb/yd ³
Papel, cartón, plásticos	80	135
Residuos de alimentos	300	500
Escombros diversos ^b	160	270
Cenizas, polvo, ladrillo, metal ferroso	480	800
Residuos sólidos municipales	150	250
Las categorías amplias antes indicadas incluyen componentes recolectados en conjunto; cuando éstos se recolectan por separado, los pesos específicos con los siguientes:		
Plásticos	65	110
Aluminio	160	270
Envases de lata	90	150
Residuos de jardín	100	170

^a La densidad real puede variar hasta en un 50% respecto a los valores representativos que se muestran, de acuerdo con la naturaleza de los componentes y su contenido de humedad

^b Los escombros diversos incluyen vidrio, metal no ferroso, madera, caucho, cuero y textiles

Fuente: (J. Glynn y Gary W. 1999, 574)

Tabla I.7. Densidades de los componentes integrantes de los residuos

Componente	Densidad			
	lb/yd ³		kg/m ³	
Residuos dispersos	100	200	60	119
Después de descargar del camión compactador	350	400	208	238
En el camión compactador	500	700	298	417
En el vertedero	500	900	298	536
Residuos cortados	600	900	357	536
Embalados en empaquetadora de papel	800	1200	476	714

Fuente: adaptación de (A. Corbit 2003, 8.31)

Contenido de energía. Los residuos sólidos municipales contienen alrededor del 50% de materia volátil (combustible); el resto consiste en proporciones más o menos iguales de humedad y sólidos inertes, ver tabla I.8. A causa del contenido volátil, los residuos suelen quemarse para deshacerse de ellos y en ocasiones se utilizan como fuente de energía. [...] Al comparar los residuos sólidos con otros combustibles es necesario tomar en cuenta la energía que se requiere para desmenuzar y clasificar los desechos, así como la diferencia en la eficiencia de operación del incinerador y de otros tipos de hornos, ver tabla I.9. (J. Glynn y Gary W. 1999, 576)

Tabla I.8. Contenido de energía típico de materiales combustibles

Material	Contenido típico de energía ^a	
	kJ/kg	Btu/lb
Residuos sólidos municipales		
Por unidad de peso de desechos	10,500	4,500
Por unidad de peso de materia combustible	23,200	10,000
Por unidad de peso de papel	16,300	7,000
Por unidad de peso de materia orgánica	5,800	2,500
Por unidad de peso de plásticos	32,800	14,100
Lodos primarios de aguas negras		
Por unidad de peso de sólidos secos	17,700	7,600
Lodos de aguas negras digeridos		
Por unidad de peso de sólidos secos	9,100	3,900
Combustibles		
Por unidad de peso de combustóleo del núm. 6 ^b	46,500	20,000
Por unidad de peso de antracita	28,000	12,000
Por unidad de peso de metano ^c	49,000	21,000

^a Btu/lb x 2.3241 = kJ/kg

^b Contenido de energía del combustóleo = 37.3×10^6 kJ/m³ (1×10^6 Btu/ft³)

^c Contenido de energía del metano o del gas natural = $37,300$ kJ/m³ ($1,000$ Btu/ft³)

Fuente: (J. Glynn y Gary W. 1999, 576)

Tabla I.9. Análisis aproximado para componentes típicos de combustibles

Componente	Poder calorífico superior			
	Como se recibió		Libre de humedad y ceniza	
	Btu/lb	kJ/kg	Btu/lb	kJ/kg
Papel, mezclado	6.800	2.924	8.055	3.464
Papel de periódico	7.974	3.429	8.600	3.698
Papel de color	7.256	3.120	7.800	3.354
Revistas comerciales	5.254	2.259	7.150	3.075
Cajas corrugadas	7.043	3.028	7.850	3.376
Papel recubierto de plástico	7.341	3.157	7.940	3.414
Cartones de leche encerados	11.327	4.871	11.890	5.113
Papel de envoltura de alimentos	7.258	3.121	8.250	3.548
Desperdicios de correo	6.088	2.618	7.400	3.182
Desperdicios de oficina	6.950	2.989	7.860	3.380
Residuos de alimentos vegetales	1.795	0.772	8.700	3.741

Semillas y desperdicios de cítricos	1.707	0.734	8.300	3.569
Residuos de carne (cocinados)	7.623	3.278	13.110	5.637
Grasas fritas	16.466	7.080	16.466	7.080
Desperdicios de comidas varios	2.370	1.019	10.100	4.343
Maderas de embalajes (palets, cajas)	7.500	3.225	8.520	3.664
Madera verde	2.102	0.904	4.250	1.828
Raíces de plantas	4.710	2.025	6.560	2.821
Madera de demolición	7.300	3.139	7.995	3.438
Residuos de madera	6.430	2.765	7.340	3.156
Muebles de madera	7.350	3.161	7.940	3.414
Recortes de césped	2.708	1.164	8.960	3.853
Ramas y arbustos	2.447	1.052	9.850	4.236
Plantas florales	3.697	1.590	8.460	3.638
Hierbas	2.058	0.885	8.900	3.827
Hojas perennes	7.984	3.433	9.270	3.986
Madera y cortezas	6.900	2.967	8.700	3.741
Virutas	4.745	2.040	8.600	3.698
Vegetación varios	2.690	1.157	8.135	3.498
Tapicerías	6.960	2.993	7.690	3.307
Fibras, todas	13.800	5.934	14.900	6.407
Pieles	7.960	3.423	9.850	4.236
Calzado (piel, cuero)	7.243	3.114	10.150	4.365
Tacones y suelas de calzado	10.899	4.687	15.790	6.790
Caucho	11.200	4.816	12.600	5.418
Plásticos varios	14.100	6.063	16.000	6.880
Plástico flexible	-	-	14.870	6.394
Polietileno	18.687	8.035	20.000	8.600
Poliestireno	16.419	7.060	16.510	7.099
Poliuretano	11.203	4.817	11.730	5.044
PVC	9.754	4.194	10.000	4.300
Linóleo	8.150	3.505	11.450	4.924
Trapos	6.900	2.967	7.844	3.373
Textil	-	-	8.300	3.569
Aceites, pintura	13.400	5.762	16.000	6.880
Suciedad de aspiradora	6.386	2.746	9.960	4.283
Suciedad doméstica	3.670	1.578	13.650	5.870
Barridos de calles	4.800	2.064	8.000	3.440

Fuente: adaptación de (A. Corbit 2003, 8.32)

Ciclo del manejo integral de los residuos

Cada autor y región presentan diferentes procesos y subprocesos en el ciclo de manejo de residuos, la propuesta del presente trabajo ha integrado los diferentes planteamientos consultados y propone el ciclo de la figura I.2. con un enfoque principal hacia los residuos agropecuarios, por ser el tema de análisis, aunque con una visión general para cualquier tipo de residuo. La diferencia principal con respecto a un sistema para la gestión de residuos sólidos urbano y/o de manejo especial, es que en el modelo propuesto para residuos agropecuarios no existe el proceso de separación de residuos, por tratarse principalmente de orgánicos.

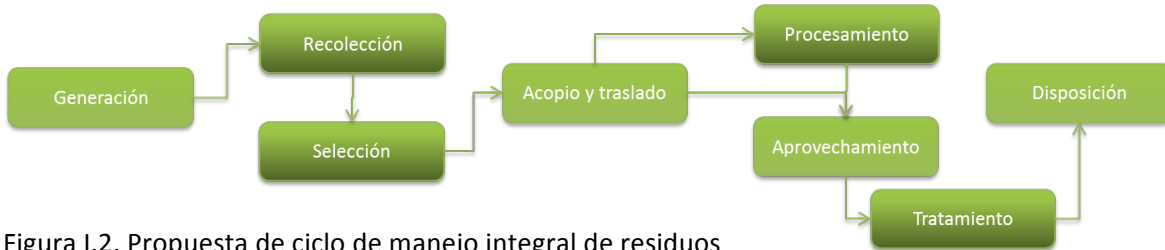


Figura I.2. Propuesta de ciclo de manejo integral de residuos

Fuente: generación propia

En este aspecto los primeros planteamientos desarrollados fueron en 1989 por la Environmental Protection Agency (EPA) de EUA que adoptó una jerarquía de prácticas de administración de residuos. Los cuatro elementos de la jerarquía, en orden de preferencia, son los siguientes:

1. Reducción en la fuente (incluye volver a utilizar los productos y llevar a cabo la formación casera de la conversión en abono –o estercolar la tierra con residuos de traspatio-).
2. Reciclaje de materiales
3. Combustión (de preferencia con recuperación de energía)
4. Rellenos de tierras

El impacto de la jerarquía de administración de residuos de la EPA y de iniciativas similares en los niveles locales se advierte en la reciente tendencia a una mayor recuperación de productos para reciclaje y conversión en abono, y a una reducción en la eliminación de residuos sólidos municipales en rellenos de tierras. (J. Glynn y Gary W. 1999, 567,568)

Históricamente, el desecho o almacenamiento de residuos sólidos ha venido realizándose al aire libre; sin embargo, en la actualidad se lleva a cabo en dos pasos, primero se almacenan los residuos en un vertedero con recubrimiento doble que, cuando se llena, se entierra y, posteriormente, se somete a un control exhaustivo de emisiones de gases y/o lixiviados líquidos. Otros métodos de eliminación incluyen el compostaje y varios procesos de incineración, los cuales también pueden utilizarse como vías complementarias para la gestión de lodos procedentes del tratamiento de efluentes hídricos. Este tipo de tratamientos, generalmente, precisan de un sistema de control para los nuevos contaminantes generados, tales como los lixiviados y los olores producidos por las operaciones, tanto de compostaje como químicas, así como la emisión de partículas sólidas producidas durante la combustión de las incineradoras.

También es frecuente la recuperación y reutilización de los residuos sólidos. Según el tipo de fuente o la facilidad de separación del material aprovechable, existe toda una gama de productos reutilizables, tales como papel, vidrio, plásticos, metales ferrosos y metales no ferrosos. También, pueden emplearse los residuos de combustibles para la producción de energía, así como los residuos sólidos orgánicos, que pueden emplearse como abonos para el acondicionamiento de terrenos. (A. Corbit 2003, 8.1,8.2)

Los aspectos relevantes para Glynn y Gary (1999) en la gestión de residuos sólidos son los siguientes:

- Sistemas de recolección
 - Equipo de recolección
 - Estaciones de transferencia
 - Transporte y selección de rutas
- Separación y procesamiento
 - En fuente
 - Centralizados
- Conversión
 - Incineración
 - Conversión en abono
- Rellenos de tierras (rellenos sanitarios)
 - Control de lixiviados
 - Producción de gas

(J. Glynn y Gary W. 1999, 577-609)

Para los fines perseguidos en la presente tesis, se amplían conceptos relacionados con procesos de *Conversión en abono* y *Producción de gas*.

Conversión en abono. La conversión en abono de los residuos de patios y jardines, en particular las hojas y la hierba cortada, es ahora obligatoria en varios estados de EUA y ha sido adoptada voluntariamente por otros para alcanzar las metas de desviación de residuos fijadas por ley. En países como Holanda, la conversión de residuos sólidos en abono se practicaba en la década de 30's (Ham, 1992). La conversión en abono es la descomposición aerobia de materia orgánica por la acción de microorganismos (principalmente bacterias y hongos) para formar un material estable y rico en nutrientes, similar al humus, conocido como "abono". Este producto principalmente se emplea como acondicionador de suelos y en ocasiones como material de cobertura diaria de rellenos. Durante la descomposición el abono alcanza temperaturas aproximadas de 60°C, las cuales se deben mantener al menos por 3 días para destruir los microorganismos patógenos. El control de la temperatura es decisivo, porque la descomposición óptima ocurre también entre 55 y 60°C, pero si la temperatura rebasa 60°C la descomposición se retarda. Las bacterias termófilas (principalmente *Bacillus*, *Clostridium* y *Pseudomonas*) son los principales agentes de descomposición en las primeras etapas de la conversión en abono, en tanto que los hongos (como

Mucor, Penicillium y Aspergillus) son más activos durante la etapa de curado (Miller, 1991). Para alcanzar las condiciones óptimas se requiere un contenido de humedad alrededor del 55% y aireación regular. La aireación se proporciona ya sea mezclando (como en la conversión en abono en camellones) o insuflando aire a través del material (como en el método de pilas estáticas y los sistemas de conversión en abono en recipientes). Si se permite que se establezcan condiciones anaerobias se generarán olores desagradables.

La conversión en abono se ha aplicado a residuos de jardín (con o sin residuos de alimentos), RSM no procesados y mezclas de la fracción orgánica de los RSM con lodos de aguas residuales. Sin embargo, para producir el abono de mayor calidad (el más fácil de vender), los residuos separados en la fuente son la mejor materia prima. El abono comercial debe (1) ser de tamaño constante; (2) estar libre de vidrio, plástico y metales; y (3) no tener olores desagradables (Tchobanoglous et al., 1993). [...] Ejemplos de países en las que se han aplicado estas técnicas son Europa Occidental, Israel, Japón y otros países desarrollados comprometidos con el rescate de tierras, en donde muchas plantas de conversión de residuos sólidos en abono han estado en operación durante muchos años con éxito. Rotterdam, Holanda, en donde se encuentra uno de los incineradores con recuperación de calor más grandes de Europa, tiene una importante planta de conversión en abono para complementar su programa de administración de residuos. El mismo interés por la conversión en abono existe en los países del Tercer Mundo, pero en estas áreas los sistemas de camellones son el método preferido. (J. Glynn y Gary W. 1999, 595,596)

Producción de gas. El gas que se produce en los rellenos sanitarios por la digestión anaerobia de desechos orgánicos se desahoga a la atmósfera a través de hendeduras o pozos empacados con grava y no causa problemas. En ciertos rellenos sanitarios se instalan quemadores de gas en la parte superior de los respiraderos para quemar el gas que escapa. Si no se proporciona una ventilación adecuada, puede haber un movimiento lateral del gas bajo la cubierta del relleno, en particular cuando la superficie del suelo está congelada. Esto puede ser peligroso si el gas emigra a los edificios cercanos.

El aumento en el precio de los combustibles en la década de 1970 hizo despertar el interés en la posibilidad de recuperar el gas de los rellenos sanitarios. En Estados Unidos en 1983 había más de 20 proyectos en proceso de realización, casi todos en California, para recuperar y purificar el gas de los rellenos sanitarios para uso interno en la generación de calor y energía, o para uso externo como combustible (Weddle et al., 1983). El metano (CH_4), que constituye del 40 al 60% del gas de rellenos sanitarios, tiene un contenido calorífico alrededor de $37,000 \text{ kJ/m}^3$ (991 Btu/ft^3), o $20,000 \text{ kJ/m}^3$ para el gas de relleno que contiene 55% de metano. A causa de la dilución del gas con aire durante su recuperación, $16,800 \text{ kJ/m}^3$ (450 Btu/ft^3) es quizá un valor más realista (Emcon Associates, 1980). En teoría, la cantidad de gas que se produce es de 200 a 270 L de CH_4 por kilogramo de desechos, de acuerdo con las características de los residuos sólidos y la base de la determinación (Vesilind, 1980). De la cantidad generada, se estima que se puede recuperar del 15 al 35%.

La estabilización de los rellenos y por ende la generación de gas toma un tiempo muy largo. Treinta años es un periodo que se menciona, pero esto se podría acortar en condiciones de humedad continua o prolongarse si los residuos permanecen secos. Para un periodo de estabilización de 25 a 30 años, de un tercio a dos tercios del gas se podrían generar dentro de los primeros cinco años (Tchobanoglous et al., 1977). Emcon Associate (1980) ha informado de tasas de producción de metano de 2.5 a 3.7 L por kilogramo de desechos por año, para desechos que han estado enterrados algunos años. (J. Glynn y Gary W. 1999, 608)

Corbitt (2003), le da otro enfoque a los procesos para la gestión de los residuos sólidos municipales, destacando los puntos siguientes:

- Operaciones de recogida y transporte
 - Prácticas de recogida y nivel de servicio
 - Recipientes de almacenamiento y equipo de recogida
 - Planificación de la ruta
 - Separación en el lugar de origen
 - Recogida rural
 - Operaciones de transferencia
- Procesado
 - Fragmentación
 - Tamices centrífugos
 - Separación magnética y clasificación con aire
 - Embalado
- Reciclaje y reutilización
 - Recuperación de energía a partir de residuos
 - Combustibles derivados de residuos
 - Metales, vidrio, papel y plásticos
- Estabilización y vertido
 - Vertederos sanitarios
- Recuperación de suelos
 - Compostaje
 - Incineración
 - Procesos de pirolisis y gasificación
 - Oxidación húmeda (A. Corbit 2003, 8.40-8.214)

Para los fines perseguidos en la presente tesis, se amplían conceptos relacionados con procesos de *Recuperación de energía a partir de residuos* y *Compostaje*.

Recuperación de energía a partir de residuos. Las técnicas más eficaces empleadas para la recuperación de energía procedente de residuos sólidos municipales (RSM), son las que se indican a continuación:

Incineración con generación de vapor: Combustión de residuos sólidos municipales, procesados o sin procesar, en un horno que lleva acoplado un sistema de tubos para generación de vapor.

Incineración modulada: Combustión de RSM en hornos de dos etapas, relativamente pequeños, con efecto del aire y con sistema de recuperación de calor tales como intercambiadores o calderas.

Combustibles derivados de residuos: Existe toda una variedad de tecnologías capaces de producir combustibles sólidos a partir del procesado de RSM, obteniéndose fracciones combustibles y no combustibles. El combustible resultante puede mezclarse con otros combustibles fósiles o alimentarse, sin mezcla alguna, a “calderas especiales”.

Pirólisis: Existe una amplia gama de tecnologías que procesan RSM en atmósfera deficiente de oxígeno, para dar lugar a combustibles gaseosos, líquidos o sólidos.

Digestión anaerobia: Consiste en una técnica desarrollada y adaptada a partir de la digestión anaerobia de los lodos procedentes de residuos hídricos.

Recuperación de gas de relleno sanitario: Consiste en la recogida de los gases producidos durante la descomposición de los RSM depositados en un relleno sanitario. (A. Corbit 2003, 8.102,8.103)

Compostaje. El compost es el material originado en la biodegradación de los compuestos orgánicos presentes en las basuras (residuos sólidos y lodos de tratamiento de aguas residuales). A través de la actividad microbiana, que tiene lugar durante la formación del compost, la materia orgánica se descompone dando lugar a una materia estable, de manera análoga a la formación de humus. Al mismo tiempo, el calor producido puede dar lugar a la destrucción de patógenos. La fabricación de compost es una práctica antiquísima, utilizada por granjeros y agricultores para abonar los terrenos empobrecidos mediante basuras orgánicas. Estos abonos se han empleado para estabilizar los terrenos erosionados, proporcionar nutrientes y recuperar materia orgánica en suelos agotados por el cultivo intenso.

Métodos de obtención de compost. Existen tres métodos principales de obtención de compostaje, a partir de residuos sólidos y lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales. Estos métodos son el método de compost al aire libre, el método de apilamiento estático y sistemas verticales. A continuación se presentan seis métodos incluyendo los tres mencionados.

Método al aire libre. El sistema de obtención al aire libre consiste en mezclar los lodos con un material basto o con lodos previamente secados y proceder a voltear la mezcla periódicamente. Estos sistemas abiertos, a menudo, son adecuados para fabricar compost a partir de lodos previamente sometidos a un proceso de digestión, pero no es conveniente emplear lodos que no hayan sido sometidos a un proceso de digestión por microorganismos (crudos). Cuando se emplean lodos crudos en un proceso de compostaje abierto, los problemas de olor pueden ser muy severos.

Método de apilamiento estático. Éste método se desarrolló mediante investigación en el Departamento de Agricultura de la estación de Beltsville, Maryland, en 1975. Actualmente, este sistema ha tenido una gran aceptación en Estados Unidos. Consiste en mezclar los lodos con un material de carga y someterlos a un sistema de aireación constituido por una tubería perforada, colocada en la base de la pila. La mezcla se aísla entonces cubriéndola con compost tamizado o no. El aire se introduce en la mezcla a través de un sistema de aireadores. Este sistema actúa en sentido negativo (succión) o positivo (soplado), estableciéndose un control de presión y del caudal de la corriente de aire, capaz de mantener en el interior de la mezcla un nivel de oxígeno y de temperatura adecuados. El aire también se emplea para aumentar la eliminación de humedad del sistema. Después de un periodo de 14 a 28 días, el producto obtenido se somete a tamizado para recuperar el material de carga, que puede volver a reutilizarse. En el caso de una necesidad de secado adicional, el material puede trasladarse a un secadero, donde permanecerá durante un periodo de tiempo corto o, de lo contrario, puede someterse a un proceso de curado. Siempre es preferible realizar un proceso de tamizado y secado, antes de someter el producto a curación, ya que se reduce notablemente la cantidad de material manejado y puede hacerse un uso más eficaz del material de carga.

Sistemas verticales. Los sistemas verticales son aquellos que normalmente presentan un flujo libre y que consisten en recipientes cuadrados o cilíndricos, silos o torres. Los materiales entran por la parte superior, permanecen en su interior durante el tiempo de residencia, y por la base de la unidad se obtiene el compost. El material basto, o de alto contenido en carbono, se añade anteriormente a la puesta en marcha de las unidades. Desde la base de la unidad se fuerza la entrada de aire, que atraviesa la mezcla de lodos y material de carga, consiguiendo mantenerse condiciones aerobias en el interior del equipo. La salida de gases y olores puede controlarse facilitando la salida de la unidad o mediante lavado. Valiéndose de los puntos de toma de muestras situados en la pared vertical de la unidad puede llevarse a cabo un control de la temperatura u otros parámetros. El control de humedad es mínimo, ya que el aire se calienta a medida que avanza a través de la mezcla de compost. El aire caliente se condensa en la cabeza de la unidad cuando entra en contacto con la alimentación de material frío. El material, normalmente, se retira de los recipientes o silos después de 14 días. En ese momento se somete a un proceso de curado. Dicho proceso puede tener lugar en una segunda unidad diseñada, básicamente, de manera análoga, o también puede realizarse la operación de curado en un almacén o al aire libre. El tiempo de curación dependerá de los métodos empleados, es decir, de si el compost se cubre o no, o de si se ha aireado suficientemente. Normalmente, este proceso tiene lugar durante varias semanas.

Lecho agitado. Este proceso normalmente emplea una unidad horizontal consistente en un lecho aireado, contenido en un recipiente horizontal. Inicialmente, se introduce en el interior del recipiente la mezcla de lodos y material de carga. Esta mezcla puede someterse a agitación periódicamente, empleando medios mecánicos. Para retirar el material del recipiente de proceso también se emplean medios mecánicos. El proceso de compostaje

tiene lugar en el interior del recipiente durante un periodo de tiempo entre 14 y 21 días. La operación de curado tiene lugar en el exterior del recipiente, situando el material en una zona cubierta o abierta, pudiendo acelerarse con un sistema de aireación.

Sistema de flujo pistón. Este tipo de sistema también presenta una disposición horizontal y consiste en un recipiente provisto de un dispositivo hidráulico capaz de hacer que los materiales se desplacen a través de la unidad.

Tambor rotatorio. El sistema consiste en un tambor giratorio de gran diámetro, dentro del cual se encuentra la mezcla de lodos y material de carga, la cual permanecerá en su interior durante el tiempo de residencia necesario (24 a 48 hrs). Estos sistemas se han usado principalmente para el precompostaje de lodos y residuos sólidos. Una vez transcurrido el tiempo de residencia, se descarga el material, se somete a compostaje y, posteriormente a curación. Estos sistemas pueden emplearse como etapas previas en los procesos al aire libre o de apilamiento estático. (A. Corbit 2003, 8.159-8.165)

Para Pongrácz la jerarquía de los principios de gestión de residuos sigue lo establecido por el Consejo Europeo en 1991: prevención de residuos, recuperación y disposición segura. Sin embargo, en su desarrollo muestra un ciclo con mayor énfasis en la minimización: i) prevención y reducción de residuos desde la fuente de generación, ii) mejora de la calidad de los residuos generados, así como, reducción de peligrosos, y iii) fomentar la reutilización, reciclado y recuperación, tal como la planteaba la vieja escuela, ver figura I.3:

- Minimización
- Reúso
- Reciclado
 - De materia prima
 - De materia prima contra mecánico
- Incineración
- Disposición final (Pongrácz 2002, 27-41)

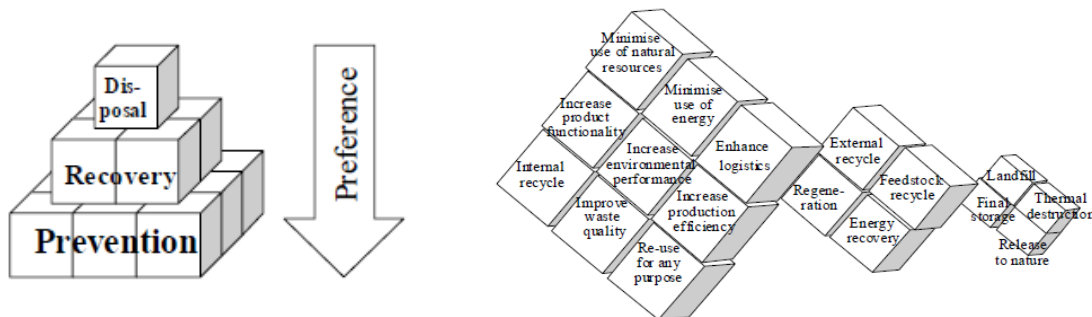


Figura I.3. Pirámide de prioridades en la gestión de residuos

Fuente: (Pongrácz 2002)