

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN EL
RELLENO SANITARIO DE ENSENADA, B. C.”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

QUETZALLI AGUILAR VIRGEN

DIRECTOR

DRA. CAROLINA ARMIJO DE VEGA

CODIRECTOR

DRA. SARA OJEDA BENÍTEZ



Agradecimientos

*Un gran sacrificio resulta fácil; los que resultan difíciles
son los continuos pequeños sacrificios.
Johann W. Goethe*

Agradezco a Dios por darme la fortaleza necesaria para concluir mis estudios e iluminarme para elegir el camino correcto, por poner en mi camino a personas con buenos sentimientos, que contribuyeron a mi crecimiento profesional y personal.

Al Instituto de Ingeniería y la Universidad Autónoma de Baja California por la oportunidad de continuar mi desarrollo académico en un ambiente integral. Al CONACYT, mi más profundo agradecimiento por haberme otorgado el apoyo económico para proseguir mis estudios.

Se agradece a la Dirección de Ecología y a la Dirección de Servicios Públicos Municipales de la Secretaría de Administración Urbana del Gobierno Municipal de Ensenada del XIX Ayuntamiento de Ensenada por las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación y en especial al Biólogo Víctor Arenas Lío por sus sustanciales aportaciones.

A mi directora de tesis Dra. Carolina Armijo, les agradezco sus esfuerzos, consejos y enseñanzas que me llevan por el sendero del conocimiento y la superación. A mi codirectora Dra. Sara Ojeda, una persona que admiro y respeto mucho, gracias porque su sabiduría, enseñanzas, consejos y aliento, han hecho de mí una mejor persona y profesionista.



Dedicatorias

*Estar preparado es importante, saber esperar lo es aún más,
pero aprovechar el momento adecuado es la clave de la vida*
Arthur Schnitzler

El presente escrito se lo dedico especialmente, a mi esposo, Paúl Adolfo, un hombre maravilloso que ha estado incondicionalmente a mi lado, apoyándome durante estos 13 años, con quien he compartido mis logros y mi crecimiento profesional. Quien me ha ayudado a seguir subiendo el sendero de la vida, con amor y respeto. Gracias por estar conmigo y compartir diariamente la emoción de vivir.

Quiero también dedicar esta obra con todo cariño a mis padres, María de Jesús y Rosario de Jesús y a mis queridos hermanos, por brindarme en todo momento su apoyo y comprensión, quien a través de su sabiduría y paciencia me han encausado por el camino correcto, gracias a ellos he logrado mis objetivos.



ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema	5
1.1.1. Justificación	6
1.1.2. Preguntas de investigación	8
1.2. Objetivo	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos	8
1.3. Hipótesis	9
1.4. Delimitación	9
2. BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS	10
2.1. Biogás y sus factores de generación	10
2.2. Modelo Mexicano de Biogás	12
2.2.1. Índice de generación de metano (k)	13
2.2.2. Potencial de generación de metano (L_0)	15
3. PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO	19
3.1. Caracterización de los residuos sólidos de la ciudad de Ensenada	19
3.2. Estimación de biogás generado en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada	20
3.2.1. Modificación de las constantes de generación de biogás	21
3.2.2. Estimación de la generación de biogás de acuerdo a las constantes <i>in situ</i>	27
3.3. Conclusiones	32



4. REFERENCIAS	35
ANEXO A: MUNICIPAL SOLID WASTE GENERATION AND CHARACTERIZATION IN ENSENADA, MEXICO.....	40
ANEXO B: POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DISPUESTOS EN UN RELLENO SANITARIO.....	47

Índice de tablas

Tabla 1. Valores k en la Región 5 (Noroeste & Interior Norte)	14
Tabla 2. Valores L_0 en la Región 5 (Noroeste & Interior Norte)	16
Tabla 3. Factor de Corrección de Metano (MCF)	17
Tabla 4. Clasificación de residuos en el Modelo Mexicano de Biogás	21
Tabla 5. Forma de calcular los parámetros para determinar L_0	23
Tabla 6. Composición de los RSD en Ensenada	24
Tabla 7. Promedio de muestras de biogás generado en el RESA de Ensenada, B.C.	25
Tabla 8. Determinación del índice de generación de metano (k) de acuerdo al sitio.....	26
Tabla 9. Determinación del DOC de acuerdo al sitio.....	27
Tabla 10. Proyección del biogás del RESA de Ensenada.....	29
Tabla 11. Reducción de emisiones de metano del RESA de Ensenada	32

Índice de figuras

Figura 1. Toma de gases en el RESA de la ciudad de Ensenada	22
Figura 2. Proyección de biogás del RESA de Ensenada con las constantes establecidas	30
Figura 3. Proyección de biogás del RESA de Ensenada con las constantes modificadas	31



RESUMEN

Las autoridades sanitarias de Ensenada, al igual que en otras ciudades de países en desarrollo, carecen de información pertinente para hacer un manejo sustentable de los residuos generados en la ciudad. Los objetivos de esta investigación fueron: a) cuantificar y analizar los residuos sólidos domésticos generados en la ciudad de Ensenada, México; y b) proyectar la producción de biogás y estimar la generación de energía eléctrica si se usara ese biogás. El estudio de caracterización se realizó por estrato socioeconómico en dos periodos estacionales y la proyección de biogás y energía eléctrica se realizaron con el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. La generación per cápita fue de 0.87 ± 0.07 kg/día-hab con un intervalo de confianza del 98%. La composición de los residuos estuvo representada principalmente por residuos alimenticios con el 34.28%, seguidos por papel y cartón con 22.49%, plástico 12.53%, pañales desechables 7.14% y textiles 6.58%. Del total de residuos, el 86.36% tiene potencial de aprovechamiento, mientras que solamente el 13.65% debería tener como destino final el relleno sanitario. En promedio se podrían comercializar semanalmente 643.67 toneladas de residuos alimenticios para composta, 389.45 toneladas de papel y cartón, 217.55 toneladas de plástico, 78.81 toneladas de vidrio, 37.20 toneladas de metales y 8.11 toneladas de aluminio. Se obtendría en total un aproximado de MXP \$911,224.18 (USD \$ 71,693.48) por la comercialización de los principales reciclables. En cuanto a la generación de energía, se tiene que se llegará a una capacidad máxima de 2.4 MW en el 2019. Dicha energía podría aumentar la capacidad de generación eléctrica existente en Ensenada aproximadamente en un 4.36% y abastecer aproximadamente el 75% de la energía necesaria para alumbrado público, con un ahorro de USD \$ 1,779 millones.

**ABSTRACT**

Ensenada health officials as well as the ones from other developing countries lack pertinent information on solid waste (SW) management in a sustainable fashion. The aims of this research were: a) to quantify and analyze the household solid waste generated in the city of Ensenada, Mexico; and b) to project biogas production and estimate electrical energy generation. The characterization study was carried out by socioeconomic stratification in two seasonal periods and the biogas and electrical energy projections were done through the Version 2.0 Mexico Biogas Model. Per capita generation was 0.87 ± 0.07 kg per person within a 98% confidence interval. Waste composition is mainly comprised of food scraps at 34.28%, followed by paper and cardboard at 22.49%, plastic at 12.53%, disposable diapers at 7.14% and textile at 6.58%. Out of the total waste, 86.36% has potential use, whereas 13.65% is real waste that has no use and has to be discarded in the city's sanitary landfill. The average weekly market could be 643.67 tons of food scraps for composting, 389.45 tons of paper and cardboard, 217.55 tons of plastic, 78.81 tons of glass, 37.20 tons of metal and 8.11 tons of aluminum. This should result in a total of approximately MXP \$ 911,224.18 (USD \$ 71,693.48) for marketing of major recyclable. As to energy generation, it is believed that a full capacity of 2.4 MW will be reached in 2019. Such energy could increase the electricity generation capacity that there is currently in Ensenada by approximately 4.36% and provide 75% of the energy needed for street lighting allowing USD \$ 1.779 million in savings.



1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, los combustibles fósiles han sido protagonistas en los esquemas de generación de energía. Sin embargo, las preocupaciones ambientales en general y los impactos de las emisiones de gases causantes del efecto invernadero, resaltan y dirigen hoy los reflectores hacia el desarrollo de energías limpias y el uso eficiente de la energía. Durante mucho tiempo se negó o minimizó el daño al medio ambiente, pero actualmente el calentamiento del planeta es un fenómeno científico y políticamente reconocido, ya que la generación de gases de efecto invernadero es considerada como una de las principales causas de la contaminación atmosférica y calentamiento global (Baker & McKenzie 2004).

Las energías renovables ofrecen la oportunidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer todas nuestras necesidades de energía presentes y futuras. Además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional.

Una de estas energías renovables puede ser el gas de un relleno sanitario. De acuerdo con la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA) en el Programa de Extensión para Metano Proveniente de Rellenos Sanitarios es un recurso de energía renovable local (EPA 1996). Porque el gas del relleno es generado continuamente, proporciona un combustible confiable para una determinada tasa de aplicación de energía, incluyendo la generación de electricidad y el uso directo.



Sin embargo, se debe de poner especial atención a las tasas de estimación de generación de gas de un relleno sanitario, ya que de acuerdo con Walter (2003), el desarrollo de estimaciones fiables son importantes para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero –como el metano– y contaminantes peligrosos del aire, así como para evaluar la viabilidad de proyectos de energía.

En años recientes, la cantidad de residuos sólidos se ha incrementado significativamente en los países desarrollados e industrializados. El incremento en la acumulación de residuos es debido al aumento substancial en la demanda de energía y el consumo de recursos y bienes naturales, causado por el continuo crecimiento de la población mundial (Koukouzas et al. 2007). En México de acuerdo con las cifras dadas por INEGI (2006) la generación total de residuos sólidos urbanos en el 2005 llegó a 35 millones 383 mil toneladas. Por ello, es muy importante tratar de utilizar este recurso como fuente de energía.

La utilización de los residuos para generar energía, además de proveer energía limpia, nos brindan beneficios ambientales, sociales y económicos. Tal como lo menciona (Bitrán & Asociados 2006), la rentabilidad económica de los proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la basura es cada vez mayor, porque la entrada en vigencia de Protocolo de Kyoto ha generado nuevas posibilidades de generar ingresos y ha mejorado las condiciones en el mercado del carbono.

A grandes rasgos, el proceso inicia con la acumulación de basura de un relleno, recolectar el biogás generado por la descomposición de esos residuos y utilizarlo para producir y vender energía eléctrica. Al mismo tiempo, se puede aprovechar la certificación de la reducción de emisiones de



gases de efecto invernadero tanto porque los gases provenientes de la descomposición de la basura ya no se elevan a la atmósfera como porque se reemplazan fuentes energéticas más contaminantes.

Bajo estos elementos el presente documento expone en el primer capítulo la problemática existente sobre el aprovechamiento de biogás para la generación de energía en los rellenos sanitarios de Ensenada, B.C. Así también, se plantean el problema de investigación, los objetivos y las hipótesis de este trabajo. En el segundo capítulo se describen las principales teorías sobre las cuales se sustenta el aprovechamiento del gas metano para la generación de energía y los modelos para calcular la tasa de recuperación potencial de biogás. En el tercer capítulo se realiza la presentación del estudio, tanto de caracterización de residuos como el potencial de estimación de biogás que se obtendría en el relleno sanitario activo de la ciudad de Ensenada, bajo las condiciones actuales de manejo.

1.1. Planteamiento del problema

La demanda energética está en constante crecimiento y los recursos que se utilizan para obtenerla están a la baja, ya que la energía que se consume es obtenida por recursos no renovables –petróleo, carbón y gas natural–. En el caso del municipio de Ensenada, Baja California, Quintanilla (2006) menciona que el abastecimiento de energía eléctrica es principalmente proporcionado por la central termoeléctrica “Presidente Juárez”, y en caso de emergencia por la planta Turbogás Ciprés.

El agotamiento de los recursos naturales no renovables y el deterioro del medio ambiente son notorios como se mencionó previamente. Por otro lado, se tiene el aspecto de los residuos sólidos, desde que la ciudad de Ensenada se fundó la única estrategia de manejo de residuos ha sido el



tiradero a cielo abierto y recientemente el relleno sanitario. El Plan Municipal de Desarrollo 2008-2010, expresa que anualmente se depositan 116,000 toneladas aproximadamente de residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario de Ensenada (Gobierno Municipal de Ensenada 2008). Desde los orígenes de la ciudad se ha desaprovechado el potencial energético de estos residuos sólidos.

Actualmente para el municipio de Ensenada solo existe información parcial sobre el potencial energético (a través de la recuperación y aprovechamiento del gas metano) en los rellenos sanitarios –resultados de un estudio realizado en el relleno clausurado–. Sin embargo, se carece de este tipo de información para el relleno sanitario activo. Ya que los dos rellenos sanitarios (el activo y el clausurado) se encuentran a una distancia de ocho kilómetros aproximadamente, resulta interesante hacer una evaluación del potencial de aprovechamiento de metano del relleno sanitario activo para visualizar el potencial de aprovechamiento del biogás de ambos sitios.

1.1.1. Justificación

En general los rellenos sanitarios se convierten en cementerios de basura sin utilización posterior alguna. Sin embargo, estos sitios de disposición final de residuos cuentan con un potencial poco explotado en México, el relacionado con la recuperación de gas metano y su utilización para la generación de energía eléctrica, por tal motivo es muy importante explorar y explotar esta fuente. De acuerdo con los datos de la Secretaría de Energía (SENER 2007), la demanda de energía en Baja California crecerá a un índice anual de 10.7%, lo que significa que dentro de 10 años, Baja California necesitará más del doble de la electricidad que consume actualmente. Para resolver esta necesidad de electricidad que va en aumento, Baja California debe contar con alternativas de generación de



energía eléctrica. Por otro lado, los niveles crecientes de contaminación son indicadores de las prácticas industriales que se han llevado al cabo sin consideraciones ambientales.

Mientras que por un lado aumentarán los problemas por la demanda creciente de energía, por otro lado, los métodos actuales para estimar la generación de gas de un relleno sanitario, que pudiera cubrir parcialmente esta demanda, no son lo suficientemente exactos para cubrir confiablemente estas necesidades. La estimación inexacta de la tasa de generación de gas de un relleno sanitario puede llevar a la instalación de un costoso e innecesario sistema de recolección de gas de un relleno sanitario. Asimismo el cálculo preciso es crítico para el éxito del proyecto, tanto técnica como financieramente (Bently et al. 2003; Chiemchaisri y Visvanathan 2008; Garg et al. 2006; Lamborn 1999; Meraz et al. 2008; Pierce 2003; Walter 2003).

Debido a que los rellenos sanitarios producen biogás el cual contribuye al calentamiento global, se considera que pueden obtenerse beneficios económicos a través del Protocolo de Kyoto, éstos derivados de la venta de créditos por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, además de la venta de energía; aunado a los beneficios ambientales que se derivan de ello. De esta forma se obtendría un sistema de energía sustentable, eficiente y amigable con el ambiente.

En Baja California, se debe buscar el aprovechamiento de los gases provenientes de la descomposición de los residuos sólidos en rellenos sanitarios, intentando dar soluciones tanto tecnológicas como económicas y ambientales.



1.1.2. Preguntas de investigación

Con base en el problema anteriormente planteado es que para este trabajo surgieron las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué potencial de aprovechamiento de gas metano tiene el relleno sanitario activo de la ciudad de Ensenada?
- ¿La generación de gas metano del relleno sanitario de Ensenada es suficiente para instalar una planta de generación de energía eléctrica?
- ¿Qué tan calibrado está el modelo mexicano de biogás?
- ¿Cuál es el potencial de reducción de emisiones de gas metano a la atmósfera (ton/año) por la recuperación de este gas?

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de aprovechamiento del biogás producido en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, Baja California.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos sólidos de la ciudad de Ensenada.
- Estimar la tasa de generación de residuos sólidos de la ciudad de Ensenada.
- Determinar los valores k y L_0 del Modelo Mexicano de Biogás de acuerdo a las características del sitio de disposición de residuos.



- Estimar la reducción de las emisiones de gas efecto invernadero por la implementación del proyecto.
- Proporcionar a las autoridades municipales de Ensenada una herramienta para asistir a los desarrolladores potenciales de proyectos en la toma de decisiones informadas para el aprovechamiento del gas metano proveniente del relleno sanitario de la ciudad de Ensenada.

1.3. Hipótesis

H₁: El potencial energético del relleno sanitario de Ensenada es lo suficientemente grande como para abastecer la energía eléctrica requerida para el alumbrado público al menos durante 15 años.

H₂: El modelo mexicano de biogás subestima o sobreestima el potencial de recuperación de biogás.

1.4. Delimitación

El alcance del este estudio se limitó a la estimación del potencial de aprovechamiento de biogás del relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, Baja California. Con base en esto se estimó la generación de energía eléctrica y la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. Se realizó durante el transcurso de 3 años y se utilizaron recursos de la convocatoria FOMIX-CONACYT 2007-2.



2. BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

2.1. Biogás y sus factores de generación

La estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final ha sido fuertemente analizada por diversos investigadores en todo el mundo. En especial, la estimación de biogás del relleno sanitario para su extracción y utilización como fuente renovable de energía y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

El biogás generado es el resultado de factores físicos, químicos y procesos microbianos que tienen lugar dentro de la basura. Debido a la naturaleza orgánica de la mayoría de los residuos, los procesos microbianos son los que rigen el proceso de generación de biogás. Estos procesos son sensibles a su entorno, por lo tanto hay una serie de factores que afectan su población y por lo tanto la generación de biogás. Estudios realizados en rellenos sanitarios donde se usan los datos de pruebas de extracción de biogás, muestran un rango de producción de entre 0.05 y 0.40 m³ de biogás por kilogramo de residuos (World Bank Group 2004). Los principales componentes del biogás son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), y pequeñas cantidades de varios compuestos traza (Machado et al. 2009; Tchobanoglous et al. 1994; Marshall 2007; Shah 2000).

La composición de los residuos es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de biogás de un sitio. El potencial máximo de volumen de biogás depende de la cantidad y tipo de materia orgánica dentro de la masa de residuos, ya que su descomposición es la fuente de todo el biogás producido. Otros factores que influyen en la tasa de producción de biogás son el



contenido de humedad, nutrientes, contenido bacteriano, nivel de pH, y el diseño específico del lugar, así como los planes de operaciones (World Bank Group 2004; Machado et al. 2009; Kumar, Mondal, et al. 2004; Kong 2008).

La degradación de los residuos se presenta bajo condiciones anaeróbicas en tres etapas principales: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Akunna et al. 2009). Durante el proceso de digestión anaeróbica, los materiales orgánicos son digeridos por una gama de diversas especies de bacterias naturales, cada grupo siendo responsable de las diferentes etapas del proceso de digestión. Factores, tales como el contenido de lignocelulosa en los residuos de jardín, relación C:N, inhibición de amoníaco (estiércol) y tamaño de las partículas, pueden influir en la tasa de degradación de los residuos (Greben y Oelofse 2009).

Los residuos alimenticios han demostrado tener el mayor rendimiento en la producción de biogás, y éste disminuye al aumentar la cantidad de residuos de jardín. Los residuos de jardín son menos fácilmente degradable debido a las altas concentraciones de lignina comparado con la celulosa o hemicelulosa (*ibídem*). Esto debido a que la lignina es un material orgánico complejo la cual dificulta la degradación de la bacteria anaeróbica y normalmente requiere de grandes periodos de tiempo para completar la degradación (Kayhanian et al. 2007).

La literatura especializada muestra diversos modelos que son usados para predecir la generación de biogás, tales como, el Método de la Tier 3, Método IPCC, Método de Cámara de Flujo Cerrado, Modelo de la EPA, Modelo Mexicano de Biogás, entre otros (SCS Engineers 2009; Machado et al. 2009; Walter 2003; Chiemchaisri y Visvanathan 2008; Ngnikam et al. 2002; Garg et al. 2006).



2.2. Modelo Mexicano de Biogás

El modelo utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de metano. En éste modelo se requiere que el usuario alimente datos específicos, tales como, el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección. El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado (ver ecuación 1), la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (1)$$

donde Q_{LFG} es el flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$), i es el incremento en tiempo de 1 año, n es el año del cálculo –año inicial de disposición de residuos–, j es el incremento de tiempo en 0.1 años, k es el índice de generación de metano ($1/año$), L_0 es la generación potencial de metano (m^3/Mg), M_i es la masa de residuos dispuestos en el año i (Mg), t_{ij} es la edad de las sección j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales), MCF es el factor de corrección de metano, F es el factor de ajuste por incendios.

La ecuación 1 estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).



Con la excepción de los valores de k y L_0 , el modelo mexicano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para producir las proyecciones de generación. El modelo provee los valores de k y L_0 . Los valores son calculados basándose en la información recolectada de rellenos sanitarios representativos en México y la relación entre los valores de k y L_0 observados en rellenos sanitarios de los Estados Unidos. Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación anual y podrán ser usados para producir proyecciones de generación de biogás en rellenos sanitarios localizados en las diferentes regiones de México. Aunque el modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0) (SCS Engineers 2009), éstos pueden ser modificados de acuerdo a las características *in situ*.

2.2.1. Índice de generación de metano (k)

Representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el metano es generado luego de la disposición de residuo en el sitio y está relacionado con el período de vida de los residuos ($t_{1/2}$) (ver ecuación 2).

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} \quad (2)$$

Conforme el valor de k incrementa la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa (siempre y cuando el relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye con el tiempo (después que el relleno sanitario es clausurado) (SCS Engineers 2009; World Bank Group 2004; IPCC 2006, 2002).

La constante k depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH, y la temperatura. El contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más



importantes que inciden en la tasa de generación del gas. La humedad sirve además como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. El contenido de humedad dentro de un relleno sanitario depende principalmente de la infiltración de agua de las lluvias a través de la cobertura del relleno. Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación de gas incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y el momento de colocación de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo (SCS Engineers 2009; World Bank Group 2004; ETEISA 2006).

En el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 se han asignado valores de k para las cuatro categorías de degradación de residuos (muy rápida, moderadamente rápida, moderadamente lenta, y muy lenta), en cada una de las cinco regiones climáticas de México. Estos valores varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario, tipo de residuo y clima. Los valores correspondientes a la región climática donde se encuentra el RESA de Ensenada (Región 5: Noroeste & Interior Norte) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores k en la Región 5 (Noroeste & Interior Norte)

CATEGORÍA DE RESIDUO	REGIÓN 5
Residuos de degradación muy rápida	0.100
Residuos de degradación moderadamente rápida	0.050
Residuos de degradación moderadamente lenta	0.020
Residuos de degradación muy lenta	0.010

Fuente: SCS Engineers (2009)

Otros autores marcan que típicamente el rango de los valores de k van de 0.02 para sitios secos a 0.047 para sitios húmedos (World Bank Group 2004; ETEISA 2006). Las tasas más rápidas ($k = 0,2$ o



una vida media cercana a los tres años) están asociados a condiciones de gran humedad y de materiales altamente degradables tales como los residuos alimenticios. Las tasas más lentas ($k = 0,02$ o una vida media de cercana a los 35 años) están asociados a condiciones de sequedad y de materiales lentamente degradables tales como la madera o el papel (IPCC 2006).

2.2.2. Potencial de generación de metano (L_0)

Este parámetro describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una unidad de masa de residuos cuando ésta se degrada y depende casi exclusivamente de la composición de los residuos en el relleno sanitario y en particular de la fracción orgánica presente (SCS Engineers 2009; World Bank Group 2004; ETEISA 2006; IPCC 2006). Este valor se estima con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de conversión estequiométrico (ETEISA 2006). A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de L_0 . Las unidades de L_0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/Mg). Los valores teóricos de L_0 varían entre 6.2 y 270 m^3/Mg de residuos (SCS Engineers 2009) y los valores típicos de este parámetro están en el rango entre 125 y 310 m^3/Mg de residuo (ETEISA 2006). La EPA de E.E.U.U. usa el valor típico de 170 m^3/Mg de residuo (World Bank Group 2004).

En el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 se han asignado valores de L_0 para las cuatro categorías de degradación de residuos (muy rápida, moderadamente rápida, moderadamente lenta, y muy lenta), en cada una de las cinco regiones climáticas de México. Estos valores varían de acuerdo a los de caracterización de residuos de los sitios y se asumen que dichos valores permanecen constantes para todos los climas, excepto por la categoría 2 en la que tiene una variación con el clima debido a las diferencias en el tipo de vegetación local. Los valores



correspondientes a la región climática donde se encuentra el RESA de Ensenada (Región 5: Noroeste & Interior Norte) se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores L_0 en la Región 5 (Noroeste & Interior Norte)

CATEGORÍA DE RESIDUO	REGIÓN 5
Residuos de degradación muy rápida	69
Residuos de degradación moderadamente rápida	149
Residuos de degradación moderadamente lenta	214
Residuos de degradación muy lenta	202

Fuente: SCS Engineers (2009)

Sin embargo, si se tiene información del sitio se puede estimar este parámetro empleando la ecuación 3 de la metodología del IPCC (IPCC 2006, 2002).

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (3)$$

donde L_0 es el potencial de generación, MCF es el factor de corrección para el metano, DOC es el carbono orgánico degradable (fracción), DOC_F es la fracción de carbono orgánico degradable asimilado, F es la fracción de CH_4 en el biogás y $\frac{16}{12}$ es la constante estequiométrica.

A continuación se describen las ecuaciones usadas para determinar los parámetros descritos arriba.

a) *MCF (Factor de corrección de metano)*

Este es un ajuste de la estimación de la generación de biogás en el Modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de la profundidad de la celda de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las practicas de manejo. La Tabla



3 resume los valores de MCF aplicados por el modelo (SCS Engineers 2009; IPCC 2006; Kumar, S. A. Gaikwad, et al. 2004; IIE 2007).

Tabla 3. Factor de Corrección de Metano (MCF)

MANEJO DEL SITIO	PROFUNDIDAD < 5 M	PROFUNDIDAD >= 5 M
Sin Manejo	0.4	0.8
Con Manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición Desconocida	0.4	0.8

Fuente: IIE (2007); IPCC (2006); Kumar, Gaikwad, et al. (2004); SCS Engineers (2009)

b) DOC (Carbono orgánico degradable)

El contenido de DOC está expresado en la ecuación 4, éste es esencial para el cálculo de la generación de metano, depende de la composición de los residuos y varía de ciudad en ciudad (Kumar, S. A. Gaikwad, et al. 2004; IIE 2007).

$$DOC = 0.40(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D) \quad (4)$$

donde A es el porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles, B es el porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos), C es el porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos, y D es el porcentaje de los residuos que corresponde a madera y paja.

c) DOC_F (Fracción de carbono orgánico degradable asimilado)

Esta es una porción de DOC que es convertida en biogás (ver ecuación 5). La estimación está basada en el modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaerobia del relleno sanitario (Kumar, S. A. Gaikwad, et al. 2004; IPCC 2002). El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de



0.77. Sin embargo, este factor puede variar de 0.42 para 10°C a 0.98 para 50°C. De hecho, en muchos rellenos profundos (>20m) las temperaturas que se han registrado son mayores a 50°C, condiciones claramente anaerobias (IPCC 2002).

$$DOC_F = 0.014T + 0.28 \quad (5)$$

donde T es la temperatura en °C.

d) F (Fracción de CH₄ en el biogás)

La fracción de metano en el biogás se asume en un 0.5, debido a que el biogás se compone principalmente en un 50% de metano y un 50% de bióxido de carbono con menos del 1% de otras constituyentes trazas (IPCC 2006, 2002; Kumar, S. A. Gaikwad, et al. 2004).



3. PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO

Los métodos, resultados y conclusiones de este estudio son presentados en los artículos contenidos en los anexos de esta disertación. El siguiente es un resumen de las contribuciones más importantes de esta investigación.

3.1. Caracterización de los residuos sólidos de la ciudad de Ensenada

El estudio de caracterización de residuos sólidos se realizó en dos periodos (invierno y verano) del 2009 en la ciudad de Ensenada. Se realizó un muestreo estratificado y los residuos analizados provenían de los camiones recolectores municipales. En total se tomaron 29 muestras (10 de estrato bajo, 10 de estrato medio y 9 de estrato alto), debido a que en el último día de muestreo no llegaron camiones de estrato alto.

El tamaño de la muestra que se tomó en este estudio (aproximadamente 90 kg) es mayor a la propuesta en la norma mexicana NMX-AA-015-1985 (Método de Cuarteo), pero acorde a otras investigaciones (Chung y Poon 2001; Gidaracos et al. 2006; Zeng et al. 2005). Las muestras tomadas se clasificaron, pesaron y registraron considerando lo especificado en la norma mexicana NMX-AA-022-1985 (Selección y cuantificación de Subproductos).

Para determinar la tasa de generación de RSD per cápita, se utilizaron los datos de los pesajes diarios de los camiones recolectores del ayuntamiento de Ensenada en las fechas de muestreo, el



número de habitantes y para el cálculo se usó el programa MINITAB® 14.1. Se consideró un intervalo de confianza del 98% en el estadístico t-student.

La generación per cápita total aproximada de Ensenada es de 0.87 ± 0.07 kg/día-hab con un intervalo de confianza del 98%. La composición de los residuos fue principalmente los alimenticios con el 34.28%, seguidos por papel y cartón con 22.49%, plástico 12.53%, pañales desechable 7.14% y textiles 6.58%. Del total de residuos, el 86.36% tiene potencial de aprovechamiento, mientras que solamente el 13.65% debería tener como destino final el relleno sanitario. Del porcentaje aprovechable, el 48.34% se podría reciclar y el 51.66% utilizar para generar energía, obteniendo beneficios económicos y ambientales.

En promedio se podrían comercializar semanalmente 643.67 toneladas de residuos alimenticios para composta, 389.45 toneladas de papel y cartón, 217.55 toneladas de plástico, 78.81 toneladas de vidrio, 37.20 toneladas de metales y 8.11 toneladas de aluminio. Se obtendría en total un aproximado de MXP \$911,224.18 (USD \$ 71,693.48) por la comercialización de los principales reciclables.

3.2. Estimación de biogás generado en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada

La estimación de biogás generado se llevó a cabo en dos etapas: 1) se realizó la modificación de las constantes de generación de biogás, y 2) se siguieron los lineamientos propuestos por SCS Engineers (SCS Engineers 2009) del Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.



3.2.1. Modificación de las constantes de generación de biogás

Para la modificación de las constantes de acuerdo a las características *in situ* se empleo el estudio de caracterización de residuos de un año (invierno y verano), observaciones del RESA, entrevistas con el gerente del sitio, pruebas de extracción de biogás y algunos parámetros del modelo IPCC para la determinación de las constantes *in situ*.

3.2.1.1. Metodología de la modificación de las constantes de generación de biogás

a) Estudio de caracterización

Los resultados de la composición de los residuos (mostrados en los anexos) de las dos temporadas agrupando los subproductos en 14 categorías (ver Tabla 4), se utilizaron de acuerdo a lo propuesto por SCS Engineers (2009). El porcentaje de los residuos ayudará a determinar los parámetros del modelo del IPCC.

Tabla 4. Clasificación de residuos en el Modelo Mexicano de Biogás

Comida	Otros orgánicos
Papel y Cartón	Pañales
Poda (jardines)	Metales
Madera	Construcción y Demolición
Caucho, Piel, Huesos y Paja	Vidrio y Cerámica
Textiles	Plásticos
Papel Higiénico	Otros inorgánicos

Fuente: SCS Engineers (2009)

b) Observaciones en el RESA y entrevistas con el gerente del sitio

Durante junio, agosto y septiembre se realizaron observaciones *in situ* y se entrevistó al gerente del sitio. La información que se obtuvo fue: 1) disposición anual de residuos sólidos urbanos (RSU) del año más reciente, 2) año de apertura y clausura del RESA, 3) incremento anual estimado de la

disposición, 4) profundidad promedio del RESA, 5) incendios en el RESA, 6) porcentaje de área con residuos con cubierta diaria, intermedia y final, 7) porcentaje del área de residuos con recubierta inferior de arcilla/geomembrana, 8) compactación de residuos, y 9) afloramientos de lixiviado en la superficie del RESA.

c) Pruebas de extracción de biogás

Las pruebas de extracción de biogás iniciaron en septiembre del año 2009 utilizándose el equipo GEMTM2000 diseñado por LANDTEC. En cada punto de muestreo establecido, el equipo calcula el composición de biogás (porcentajes de CH₄, CO₂, O₂ y N₂), la temperatura, las presiones estática y diferencial y el contenido calorífico de cada muestra. En el sitio, el GEMTM2000 se conecta al cabezal Accu-Flo 2V de LANDTEC para poder llevar a cabo las lecturas.

Debido a la disponibilidad de acceso a los pozos de venteo se realizaron lecturas en 4 de los 12 pozos instalados durante siete días de tres meses (septiembre, octubre y noviembre) a la misma hora aproximadamente (ver Figura 1).

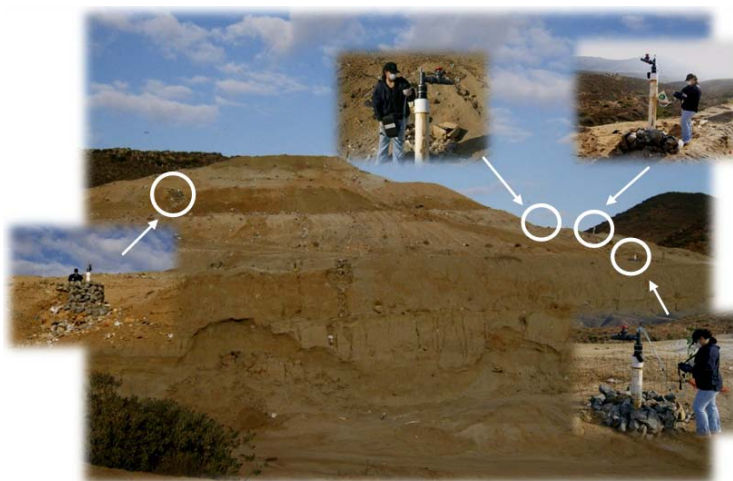


Figura 1. Toma de gases en el RESA de la ciudad de Ensenada



Cada día se tomaron mínimo 3 lecturas por pozo en el transcurso del día (principalmente el flujo de biogás y la temperatura), dichos datos fueron registrados en el Software DataField CS version 3.02L. En total se obtuvieron 247 lecturas en los tres meses, cantidad superior a las realizadas por SCS Engineers en diferentes rellenos sanitarios de México y Latinoamérica (SCS Engineers 2005a, b, c, d).

d) Determinación de parámetros de modelo IPCC

En el caso de k , se realizó una modificación a los valores que proporciona dicho modelo (ver Tabla 1), con el porcentaje de los residuos que son catalogados dentro de cada categoría de residuos. Primero se categorizaron los residuos de acuerdo a su grado de degradación, para posteriormente aplicarse la ecuación 6.

$$k_{ponderada} = \sum_{i=1}^{18} (\%r_i \cdot vp) \quad (6)$$

donde $\%r_i$ es el porcentaje de residuos en cada categoría y vp es valor de k predeterminado por el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 en cada una de las categorías de degradación.

Para determinar L_0 , se desarrolló cada uno de los parámetros de la ecuación 3. En la Tabla 5 se describe cada uno de ellos.

Tabla 5. Forma de calcular los parámetros para determinar L_0

PARÁMETROS	FORMA DE CÁLCULO
MCF	Se obtuvo de acuerdo con las entrevista determinándose la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario
DOC	Se determinó a través de la ecuación 4 con información de la composición de los residuos de un año
DOC_F	Se calculó aplicando la ecuación 5 en el promedio de la temperatura obtenida en las pruebas de extracción de biogás
F	Se tomo del promedio de porcentaje de CH ₄ que resulto en la prueba de extracción de biogás



3.2.1.2. Resultados

a) Caracterización de residuos

En la Tabla 6 se muestra la composición de los RSD de las dos temporadas de la ciudad de Ensenada, se puede apreciar que el porcentaje de componentes orgánicos es del 68,57% y los componentes inorgánicos es de 30,30%.

Tabla 6. Composición de los RSD en Ensenada

SUBPRODUCTOS DE LOS RSD	KILOGRAMOS (KG)	PORCENTAJE (%)
Comida	909,08	36,20%
Papel y Cartón	285,27	11,36%
Poda (jardines)	80,35	3,20%
Madera	8,71	0,35%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	5,44	0,22%
Textiles	156,60	6,24%
Papel Higiénico	269,33	10,72%
Otros Orgánicos	6,97	0,28%
Pañales	146,34	5,83%
Metales	64,39	2,56%
Construcción y Demolición	17,99	0,72%
Vidrio y Cerámica	118,89	4,73%
Plásticos	309,87	12,34%
Otros Inorgánicos	132,12	5,26%
Total	2,511,35	100%

b) Observaciones en el RESA y entrevistas con el gerente del sitio

De observaciones *in situ* y entrevistas con el gerente del sitio, se obtuvo la siguiente información: 1) la disposición anual de RSU en el año 2005 fue de 132,055 Mg, 2) las operaciones del RESA iniciaron en el 2004 y su clausura será en el 2018, 3) no se han registrado incendios en el sitio de disposición final, 4) la profundidad promedio de cada celda es de 15 m, 5) antes de depositar los residuos cubren con una geomembrana de un mm de espesor, 6) los residuos depositados se cubren



diariamente y solamente se han cerrado dos celdas las cuales tienen cobertura final, 7) los residuos se compactan en un 75%, y 8) no se observaron afloramientos de lixiviados. El incremento anual estimado de la disposición de residuos en Baja California de acuerdo con cifras reportadas por la SEMARNAT (2008) es del 5%.

c) Pruebas de extracción de biogás

El flujo de biogás mostró en promedio un 44% de metano y la temperatura promedio obtenida fue de 38.14°C. A continuación se muestran los datos promedios obtenidos durante el monitoreo de biogás llevado de septiembre a noviembre del 2009 (ver Tabla 7).

Tabla 7. Promedio de muestras de biogás generado en el RESA de Ensenada, B.C.

MES	POZO	PORCENTAJE (%/V)				TEMP. (°C)
		CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	
Sept.	1	31.20	24.44	8.61	35.75	32.84
	2	40.26	32.06	5.09	22.59	38.33
	3	55.37	44.00	0.23	0.40	45.80
	4	48.51	38.94	2.36	10.20	41.26
Oct.	1	33.58	26.61	7.92	31.90	31.69
	2	54.94	44.68	0.21	0.17	45.88
	3	39.17	31.16	5.96	23.71	36.91
	4	48.43	38.71	2.72	10.13	41.26
Nov.	1	36.88	28.55	6.96	27.62	30.67
	2	37.52	28.91	7.03	26.54	34.31
	3	54.99	44.49	0.37	0.15	44.49
	4	48.17	37.96	3.07	10.81	39.14

d) Determinación de las constantes in situ

Se obtuvo un índice de generación de metano (k) igual a 0.0482, el detalle del cálculo se puede observar en la Tabla 8.



Tabla 8. Determinación del índice de generación de metano (k) de acuerdo al sitio

CATEGORÍA DE RESIDUO	PORCENTAJE DE RESIDUOS	CATEGORÍA DE DEGRADACIÓN	VALOR k^a REGIÓN 5	VALOR DE k MODIFICADO
Comida	36.2%	Rápida	0.10	0.0362
Papel y Cartón	11.4%	Mod. lenta	0.02	0.0023
Poda (jardines)	3.2%	Mod. rápida	0.05	0.0016
Madera	0.4%	Lenta	0.01	0.0000
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0.2%	Lenta	0.01	0.0000
Textiles	6.2%	Mod. lenta	0.02	0.0012
Papel Higiénico	10.7%	Mod. rápida	0.05	0.0054
Otros Orgánicos	0.3%	Rápida	0.10	0.0003
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	5.8%	Rápida	0.10	0.0012
Metales	2.6%	Inerte	-	-
Construcción y Demolición	0.7%	Inerte	-	-
Vidrio y Cerámica	4.7%	Inerte	-	-
Plásticos	12.3%	Inerte	-	-
Otros Inorgánicos	5.3%	Inerte	-	-
<i>K ponderada</i>				0.0482

^a Valores que son determinados por el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 (SCS Engineers 2009)

El potencial de generación L_0 se determinó por la ecuación 3 dando un valor de 94.457 m³/Mg de residuo. A continuación se desarrolla cada uno de los parámetros de dicha ecuación para obtener el valor descrito.

- *MCF (Factor de corrección de metano)*. Este valor es igual a 1, debido a que el sitio se considera con manejo. Es decir, el sitio tiene controlada la colocación de los residuos (residuos directos a un área de disposición específica, control de pepenadores, y control de incendios), e incluye algunas de las siguientes características: 1) material de cobertura; 2) compactación mecánica; o 3) nivelación de residuos.



- *DOC (Carbono orgánico degradable)*. Este valor es igual a 0.1741, el cual fue determinado por la ecuación 4, en la Tabla 9 se observa a detalle su cálculo.

Tabla 9. Determinación del DOC de acuerdo al sitio

CATEGORÍA DE RESIDUO	PORCENTAJE DE RESIDUOS	CATEGORÍA (A, B, C O D)	VALOR DOC
Comida	36.2%	0.15	0.0543
Papel y Cartón	11.4%	0.40	0.0454
Poda (jardines)	3.2%	0.17	0.0054
Madera	0.4%	0.30	0.0011
Textiles	6.2%	0.40	0.0250
Papel Higiénico	10.7%	0.40	0.0429
TOTAL			0.1741

- *DOC_F (Fracción de carbono orgánico degradable asimilado)*. De acuerdo con la prueba de extracción de biogás se obtuvo una temperatura promedio de 38.14°C (ver Tabla 7), por lo que al sustituirlo en la ecuación 5, nos da un valor DOC_F de 0.8140.
- *F (Fracción de CH₄ en el biogás)*. La fracción de metano en el biogás se asume en un 0.5, debido a que en la prueba de extracción de biogás dio un porcentaje muy aproximado 44% de CH₄ (ver Tabla 7).

3.2.2. Estimación de la generación de biogás de acuerdo a las constantes *in situ*

Para la estimación se utilizaron nuevamente los estudios de caracterización de residuos de un año, observaciones del RESA, entrevistas con el gerente del sitio, pruebas de extracción de biogás, las constantes modificadas (k y L_0), y la hoja de cálculo de Excel® publicada por SCS Engineers (2009).



3.2.2.1. Metodología de la estimación de la generación de biogás de acuerdo a las constantes *in situ*

Se utilizaron los elementos descritos en el párrafo anterior para alimentar el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 desarrollado por SCS Engineers (SCS Engineers 2009). El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado (ver ecuación 1).

Se realizó una primera estimación del potencial con las constantes predeterminadas que da el modelo de acuerdo a la región del país. El modelo calcula automáticamente los diferentes valores de k y L_0 de acuerdo con su nivel de degradación. Los resultados en k son: degradación rápida (DR), 0.10; degradación moderadamente rápida (DMR), 0.05; degradación moderadamente lenta (DML), 0.20; y degradación lenta (DL), 0.10. Los resultados en L_0 son: DR, 69; DMR, 149; DML, 214; y DL, 202.

Posteriormente se llevó a cabo una segunda estimación del potencial con las constantes modificadas ($k=0.0482$ y $L_0=94.457$) de acuerdo a las características *in situ*. Para lo cual se realizaron modificaciones a la hoja de cálculo de Excel® publicada por SCS Engineers (SCS Engineers 2009). Esta hoja de cálculo también proporciona la capacidad máxima de la planta de electricidad. Asimismo, se realizó una comparación entre ambas estimación.

Además se estimó la reducción de emisiones de metano, éstas no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto y es calculada usando una densidad de CH_4 de 0.0007168



Mg/m³ a temperatura estándar y una fracción de CH₄ promedio de 0.5 m³CH₄/m³LFG (SCS Engineers 2009).

3.2.2.2. Resultados

Asumiendo una composición media de biogás de 50% de CH₄ y 50% de CO₂, y que el arranque de captura de biogás se llevará a cabo en el 2009 bajo los valores de k y L_0 descritos previamente, las proyecciones de biogás del RESA de Ensenada se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Proyección del biogás del RESA de Ensenada

AÑO	GENERACIÓN DE BIOGÁS ESTIMADO (m ³ /hr)		RECUPERACIÓN DE BIOGÁS ESTIMADO (m ³ /hr)		CAPACIDAD MÁXIMA DE LA PLANTA DE ELECTRICIDAD* (MW)	
	k y L_0 establecidos	k y L_0 modificadas	k y L_0 establecidos	k y L_0 modificadas	k y L_0 establecidos	k y L_0 modificadas
2009	572	681	377	450	0.6	0.7
2010	683	821	451	542	0.7	0.9
2011	795	963	525	636	0.9	1.1
2012	907	1,107	599	731	1.0	1.2
2013	1,021	1,254	674	828	1.1	1.4
2014	1,136	1,404	749	927	1.2	1.5
2015	1,252	1,558	827	1,028	1.4	1.7
2016	1,371	1,715	905	1,132	1.5	1.9
2017	1,493	1,876	985	1,238	1.6	2.0
2018	1,618	2,042	1,068	1,348	1.8	2.2
2019	1,746	2,213	1,152	1,460	1.9	2.4
2020	1,632	2,109	1,077	1,392	1.8	2.3
2021	1,528	2,009	1,009	1,326	1.7	2.2
2022	1,432	1,915	945	1,264	1.6	2.1
2023	1,344	1,825	887	1,204	1.5	2.0
2024	1,263	1,739	833	1,148	1.4	1.9
2025	1,187	1,657	784	1,094	1.3	1.8

*La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW hr (hhv)



En dicha tabla se puede visualizar que tomando como referencia los valores de k y L_0 establecidos en el modelo, se llegará a una capacidad máxima de 1.90 MW, el cual se alcanza en el año de clausura (2019), la cual disminuirá aproximadamente 0.10 MW a una razón anual. Dicha capacidad aumenta al tomar como referencia la modificación a las constantes realizada de acuerdo a las características *in situ*, en esta se tendría una capacidad máxima de 2.40 MW alcanzada en el año de clausura (2019), con la misma disminución anual que la anterior.

En cuanto a las comparaciones de las proyecciones de biogás con los datos predeterminados y las constantes modificadas de k y L_0 . En la **Figura 2** se puede mostrar la tendencia de los datos con las constantes establecidas y en la **Figura 3** la proyección de biogás con las constantes modificadas. Al comparar estos resultados, se observa un aumento en la recuperación de biogás en un 26.74% en el periodo más alto.

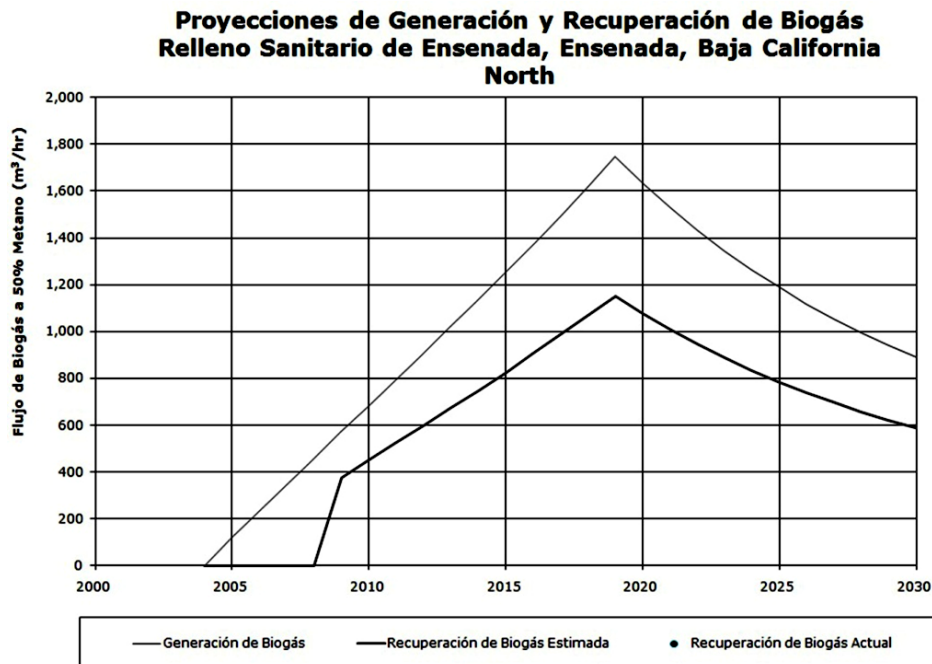


Figura 2. Proyección de biogás del RESA de Ensenada con las constantes establecidas

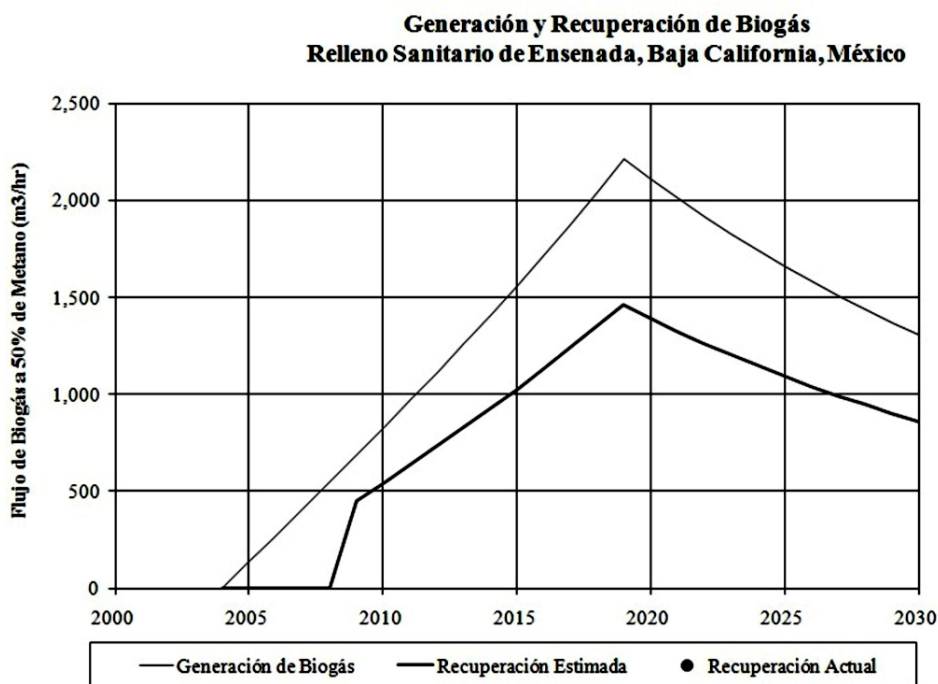


Figura 3. Proyección de biogás del RESA de Ensenada con las constantes modificadas

La estimación total de reducción de emisiones con las constantes establecidas por el modelo, sería de 43,427 toneladas de CH_4 /año, las cuales multiplicadas por el potencial de calentamiento (21 veces) resultan en 911,963 toneladas de CO_2e /año (ver Tabla 11).

Con las modificaciones realizadas a las constantes del Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 ($k = 0.0482$ y $L_0 = 94.457$) la reducción de emisiones sería en total de 55,652 toneladas de CH_4 /año, las cuales multiplicadas por el potencial de calentamiento resulta en 1,168,684 toneladas de CO_2e /año (ver Tabla 11). Aumentando en un 28% la reducción de emisiones de CO_2e /año.

Tabla 11. Reducción de emisiones de metano del RESA de Ensenada

AÑO	REDUCCIÓN DE EMISIÓN ESTIMADAS CONSTANTES PREESTABLECIDAS		REDUCCIÓN DE EMISIÓN ESTIMADAS CONSTANTES MODIFICADAS	
	Toneladas	Toneladas	Toneladas	Toneladas
	CH ₄ /año	CO ₂ e/año	CH ₄ /año	CO ₂ e/año
2009	1,184	24,861	1,410	29,609
2010	1,415	29,708	1,700	35,692
2011	1,646	34,563	1,993	41,862
2012	1,878	39,444	2,292	48,133
2013	2,113	44,369	2,596	54,518
2014	2,350	49,359	2,906	61,036
2015	2,592	54,433	3,224	67,704
2016	2,838	59,603	3,549	74,534
2017	3,090	64,891	3,883	81,545
2018	3,348	70,312	4,226	88,752
2019	3,613	75,883	4,580	96,175
2020	3,379	70,955	4,364	91,649
2021	3,163	66,424	4,159	87,337
2022	2,964	62,254	3,963	83,227
2023	2,782	58,415	3,777	79,311
2024	2,613	54,876	3,599	75,578
2025	2,458	51,613	3,430	72,022

3.3. Conclusiones

La información que proporciona los estudios de caracterización de residuos sólidos es de gran importancia para la toma de decisiones. Entre los beneficios que se obtienen se encuentran la capacidad para predecir con mayor exactitud los parámetros de generación de biogás producidos en rellenos sanitarios para su aprovechamiento. Éste estudio mostró que los residuos de la ciudad de Ensenada cuentan con un componente orgánico de aproximadamente del 70%.



A pesar de que existen modelos para la estimación de biogás que proporcionan valores establecidos de k y L_0 para distintas zonas de México, el utilizar valores *in situ* reduce la posibilidad de sobreestimar o subestimar el potencial de generación de biogás. De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se demostró que no es posible generalizar los valores de k y L_0 debido a que el modelo subestima el potencial de generación de biogás para esta ciudad.

Los hallazgos indican que el potencial de generación de energía eléctrica que se podría obtener al utilizar el biogás generado en el RESA de Ensenada, sería de 4.36% de la capacidad ya instalada en Ensenada en el 2004, valor 0.9% mayor a lo proyectado por el modelo sin las adecuaciones. En el supuesto de obtener una eficiencia global de un motor de combustión interna del 81% y que la eficiencia del sistema de captura del biogás fuera del 66%; esta energía se podría utilizar en el alumbrado público abasteciendo 13,996.80 MW/h de los 19,179.75 MW/h reportados para el 2007 en el Anuario Estadístico de Baja California, Edición 2008. Lo que cubriría aproximadamente el 75% de la energía utilizada para el servicio a semáforos, alumbrado y alumbrado ornamental por temporadas, de calles, plazas, parques y jardines públicos de la ciudad de Ensenada. Considerando un tipo de cambio de 13 pesos mexicanos (MXP) por dólar estadounidense (USD), se tendría un ahorro aproximado de USD \$1,779 millones.

Los estudios realizados en México para calcular la generación de biogás en rellenos sanitarios no siguen la misma metodología, ni utilizan el mismo modelo matemático, por lo que es importante estandarizar criterios para poder realizar comparaciones válidas respecto a la evaluación de recuperación de biogás. No obstante, se debe de aclarar que las estimaciones deben ser realizadas de acuerdo a las características del sitio. La literatura muestra grandes vacíos en la obtención de las



constantes, se sabe que varios factores afectan la generación de biogás, pero debido a la complejidad del sistema no es posible medirlos todos. No existen investigaciones que muestren que el modelo que están aplicando sea exacto, por lo que el realizar la proyección con los datos de investigación *in situ* proporciona una mayor certidumbre a la estimación.



4. REFERENCIAS

- Akunna, J. C., Hasan, K., y Kerr, K. (2009). "Estimating methane production potential of an old municipal landfill." *Journal of Solid Waste Technology & Management*, 35(3), 156-161.
- Baker & McKenzie. (2004). "Renewable Energy in Mexico / Energías Renovables en México." <<http://www.bakerinfo.com/NR/rdonlyres/7C86BF87-EDFF-453F-B6A2-54009F0AF3B7/33103/06RenewableEnergyinMexicoEngEsp.pdf>> (Abr. 15, 2008).
- Bently, H. W., Smith, S. J., Tang, J., y Walter, G. R. (2003). "A Method for Estimating the Rate of Landfill Gas Generation by Measurement and Analysis of Barometric Pressure Waves." <<http://www.hgcinc.com/papers.htm>> (Oct. 9, 2008).
- Bitrán & Asociados. (2006). "Captura de Gases de Efecto Invernadero de Rellenos Sanitarios para su aprovechamiento económico." <<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=927733>> (Abr. 3, 2008).
- Chiemchaisri, C., y Visvanathan, C. (2008). "Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand." *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 58(5), 629-35.
- Chung, S., y Poon, C. (2001). "Characterisation of municipal solid waste and its recyclable contents of Guangzhou." *Waste Management Research*, 19(6), 473-485.
- EPA. (1996). *Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook*. EPA 430-B-96-0004, Environmental Protection Agency, United States of America.
- ETEISA. (2006). "Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogas generado en el relleno sanitario "Don Juanito", Municipio de Villavicencio, Colombia." <<http://www.bioagricola delllano.com.co/website/documentos/?C=M;O=A>> (Abr. 2, 2010).



- Garg, A., Achari, G., y Joshi, R. C. (2006). "A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation." *Waste Management Research*, 24(4), 363-375.
- Gidakaros, E., Havas, G., y Ntzamilis, P. (2006). "Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete." *Waste Management*, 26(6), 668-679.
- Gobierno Municipal de Ensenada. (2008). "Plan Municipal de Desarrollo 2008-2010." <<http://www.ensenada.gob.mx/elementos/pmd/1/pmd2008-2010.pdf>> (Abr. 7, 2008).
- Greben, H. A., y Oelofse, S. H. H. (2009). "Unlocking the resource potential of organic waste: a South African perspective". *Waste Management Research*, 27(7), 676-684.
- IIE. (2007). *ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN*. Instituto Nacional de Ecología.
- INEGI. (2006). ""Estadísticas a propósitos del día mundial del medio ambiente". Datos nacionales.." <<http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2006/ambiente06.pdf>> (Abr. 17, 2008).
- IPCC. (2002). "CH₄ Emissions from Solid Waste Disposal." *Background Papers - IPCC Expert Meetings on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, 419-439.
- IPCC. (2006). "Waste." *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan.
- Kayhanian, M., Tchobanoglous, G., y Brown, R. C. (2007). "Biomass Conversion Processes For Energy Recovery". *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, D. Y. Kreith y F. Goswami, eds., CRC Press, United States of America, 1560.
- Kong, I. C. (2008). "Microbial characteristics associated with six different organic wastes undergoing



- anaerobic decomposition in batch vial conditions.” *Waste Management Research*, 26(3), 261-266.
- Koukoulzas, N., Katsiadakis, A., Karlopoulos, E., y Kakaras, E. (2007). “Co-gasification of solid waste and lignite – A case study for Western Macedonia.” *Waste Management*, 28(7), 1263-1275.
- Kumar, S., Gaikwad, S. A., Shekdar, A. V., Kshirsagar, P. S., y Singh, R. N. (2004). “Estimation method for national methane emission from solid waste landfills.” *Atmospheric Environment*, 38(21), 3481-3487.
- Kumar, S., Mondal, A., Gaikwad, S., Devotta, S., y Singh, R. (2004). “Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study.” *Atmospheric Environment*, 38(29), 4921-4929.
- Lamborn, J. (1999). “Modelling Landfill Gas Generation.” Australian Cleaner Production Association Inc., Australia, 583-590.
- Machado, S. L., Carvalho, M. F., Gourc, J., Vilar, O. M., y Nascimento, J. C. D. (2009). “Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results.” *Waste Management*, 29(1), 153-161.
- Marshall, A. (2007). “Growing bigger.” *Waste Management World*, 8(2).
- Meraz, L., Aranda, C., y Domínguez, A. (2008). “Producción de metano en relleno sanitario: Un Modelo Cinético Fractal.” *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades*, México, 1-7.
- Ngnikam, E., Tanawa, E., Rousseaux, P., Riedacker, A., y Gourdon, R. (2002). “Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid wastes (MSW) in moist tropical climates: Application to Yaounde.” *Waste Management Research*, 20(6), 501-513.



- NMX-AA-015-1985. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-015-1985*. Norma Mexicana, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de Cuarteo, México.
- NMX-AA-022-1985. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-022-1985*. Norma Mexicana, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y cuantificación de Subproductos, México.
- Pierce, J. L. (2003). "Lessons in LFGTE." *Waste Age Magazine*, 34(3), 42-45.
- Quintanilla-Montoya, A. L. (2006). *Construyendo el Futuro: Visiones para un Desarrollo Rural Sustentable en las comunidades de Baja California*. UABC-Porrúa, México.
- SCS Engineers. (2005a). "Estudio de pre-factibilidad para la recuperación y utilización en el relleno sanitario de Chihuahua, Chihuahua, México." <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf> (Jun. 15, 2008).
- SCS Engineers. (2005b). "Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Querétaro, Querétaro, México." <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf> (Jun. 15, 2008).
- SCS Engineers. (2005c). "Estudio de pre-factibilidad de recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de La Esmeralda Manizales, Colombia." <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/La_Esmeralda_PreFeasibility_Spanish.pdf> (Jun. 14, 2008).
- SCS Engineers. (2005d). "Reporte de prueba de bombeo y estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Montevideo,



- Montevideo, Uruguay.” <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Montevideo_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf> (Jun. 14, 2008).
- SCS Engineers. (2009). “Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.” IIE-CONAE-SEDESOL.
- SENER. (2007). “Balance Nacional de Energia 2006.” <http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Balance%20Nacional%20de%20Energia%202006.pdf> (Abr. 17, 2008).
- Shah, K. L. (2000). *Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology*. Prentice Hall, United States of America.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill, Madrid, España.
- Walter, G. R. (2003). “Fatal flaws in measuring landfill gas generation rates by empirical well testing.” *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 53(4), 461-468.
- World Bank Group. (2004). “Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean.” <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_008.htm> (Abr. 2, 2010).
- Zeng, Y., Trauth, K. M., Peyton, R. L., y Banerji, S. K. (2005). “Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri.” *Waste Management Research*, 23(1), 62-71.



**ANEXO A: MUNICIPAL SOLID WASTE GENERATION AND CHARACTERIZATION IN
ENSENADA, MEXICO**

Authors: Aguilar-Virgen Q., C. Armijo-de Vega, P.A. Taboada-González, and S. Ojeda-Benítez

Article: "Municipal Solid Waste Generation and Characterization in Ensenada, Mexico"

Journal: The Open Waste Management Journal

Volume: 3

Year: 2010

Pages: 140-145

ISSN: 1876-4002

Indexed in: Chemical Abstracts, Open J-Gate, Genamics JournalSeek, MediaFinder®-Standard
Periodical Directory, EBSCO, DOAJ

Municipal Solid Waste Generation and Characterization in Ensenada, Mexico

Q. Aguilar-Virgen^{*,1,2}, C. Armijo-de Vega¹, P.A. Taboada-González^{1,2} and S. Ojeda-Benítez³

¹Faculty of Engineering in Ensenada, Autonomous University of Baja California, Tijuana-Ensenada Highway, 103 km South of Tijuana, Ensenada, Baja California, 22870, Mexico

²Doctoral Degree Students of the Program Master's Degree and Doctoral Degree in Sciences and Engineering of the Autonomous University of Baja California, Mexico

³Institute of Engineering, Autonomous University of Baja California, Benito Juárez Blvd. and De la Norma St., Mexicali, Baja California, 21280, Mexico

Abstract: A comprehensive study of the generation and characterization of municipal solid waste is essential to the long-term efficient and economical planning for solid waste management. The aim of this study was to quantify and analyze the solid waste generated in the city of Ensenada, Mexico, and to use this data in a project that will generate energy through methane gas production. Ensenada's per capita waste generation is approximately 0.87 ± 0.07 kg per person per day within a 98% confidence interval. Ensenada's solid waste composition consists of food scraps at 34.28%, paper and cardboard 22.49%, plastic 12.53%, disposable diapers 7.14%, and textiles 6.58%. Of the total waste generated, 86.36% has potential for reuse, whereas 13.65% has no further identifiable use and must be landfilled. Of the usable percentage, 48.34% can be recycled and 51.66% can be used to generate energy, obtaining financial and environmental benefits.

Keywords: Municipal solid waste, waste composition, recovery.

INTRODUCTION

In many developing countries, the operation and management of municipal solid waste (MSW) collection services are fairly rudimentary. This is reflected in the lack of information about the quantities and types of MSW collected, the amounts recovered, recycled and/or reused and the siting of MSW disposal sites [1, 2].

Data on the generation and composition of solid waste is key in order to plan for the long term management of solid waste in an efficient and economical manner. Such management includes the selection and operation of equipment for the treatment and handling of waste, and the types of disposal facilities that will allow for energy generation and resource recovery [3-7].

It is well-known that MSW can be used to generate electricity. Research published since the 1970's has reported the use of the biodegradable component in MSW to generate biogas, which can also be used to generate electricity and has positive environmental implications, such as the reduction of greenhouse gas emissions from sanitary landfills and the replacement of highly polluting energy sources (oil, coal and natural gas) [8-19].

The generation and composition of household waste are not homogeneous. They vary according to changes in consumer patterns and economic growth rates and depend upon standard of living, season of the year, day of the week,

population habits and the geographical site of human settlement [3, 20, 21]. By the same token, the generation and composition of waste have been influenced by economic recessions, the impact of legislation and the economic instruments to increase or decrease their value, e.g., reuse and recycling [3].

In order to determine the generation and composition of MSW, different methodologies can be used for sampling. Sampling can be through door-to-door waste collection or directly from waste collection trucks. As to sample size, Tchobanoglous *et al.* [4] explains that 90-kilogram samples do not change significantly out of the ones taken in sampling of up to 770 kilograms obtained from the same load of waste. Other research carried out shows that samples taken for analysis can be between 90 and 180 kg [3, 5, 22]. Chung & Poon [23] reports that sample size fluctuates between 20 to 30 kg, 90 kg, 100 to 200 kg, and up to samples of around 5 to 7 tons of solid waste a week.

In Mexico, very few studies report the quantification and characterization of MSW; these were undertaken only in Morelia, Guadalajara, Chihuahua and Mexicali. In these studies, the data was collected through door-to-door and the sample size was variable since it was determined by the number of housing structures containing from 160 to 300 housing units. At the same time, some research was carried out by socioeconomic stratification (low, median and high) and others as a single unit without socioeconomic stratification [24-29].

MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT IN ENSENADA, B.C., MEXICO

The MSW generated in Ensenada is disposed of in the sanitary landfill (SL) of the city. The MSW is transported to

*Address correspondence to this author at the Faculty of Engineering in Ensenada, Autonomous University of Baja California, Tijuana-Ensenada Highway, 103 km South of Tijuana, Ensenada, Baja California, 22870, Mexico; Tel/Fax: 52(646) 174-4333, E-mail: qaguilarv@gmail.com

the SL mainly by municipality-run collection vehicles, and private operators. The special management waste and the industrial non-hazardous waste are not collected by municipality-run collection trucks, but by: 1) waste-generating companies and 2) private waste collection companies, which also dispose of these wastes in the landfill. The city of Ensenada provides waste collection services in the towns of El Sauzal and Rodolfo Sánchez T. (Maneadero) and these wastes are disposed of in the SL of Ensenada.

The frequency of waste collection provided by the local government of Ensenada varies depending on the area: once/week for most waste collection routes (1/7) and daily for downtown (7/7). The frequency of collection services provided by private operators varies depending on the client's needs.

The city of Ensenada has one waste transfer station which is privately operated. Currently, the operator and local authorities are studying a new approach for the collection vehicles owned and operated by the municipality to unload the wastes in the transfer station and, ultimately be transported to the SL by the private operator.

MATERIALS AND METHODOLOGY

The study was carried out in the city of Ensenada, municipal seat of the municipality of Ensenada in the state of Baja California, located in the northwest of Mexico. The municipality of Ensenada has a land area of 52,510.712 square kilometers and represents 74.84% of the total area of the state and 2.6% of the total area of Mexico, making it the largest municipality in the country.

Characterization Study

The waste characterization study was carried out during one week in February of 2009 at the ECO-TERRA Transfer Station in the city of Ensenada. The wastes deposited at the transfer station were initially characterized by socioeconomic stratification (low, median and high). To choose the waste collection trucks, several truck drivers were asked from which route (residential area) the waste was being collected until getting the first truck for every socioeconomic status a day. In order to choose the residential areas for every socioeconomic status, the Basic Geostatistical Area (AGEB) was taken as a reference, which was the stratification used by the National Institute of Statistics, Geography, and Data Processing (INEGI) in the population and housing census carried out in 2000. The criteria to establish the status of the residential areas were based on minimum wage, roofing and wall materials, and available public services, such as sewage infrastructure, running water and electricity.

The AGEBS corresponding to a low socioeconomic status were those where inhabitants' income was from less than and up to twice the minimum wage, most of the households' walls and roofs were light, natural and precarious, and limited access to sewage infrastructure, running water and electricity. The AGEBS where inhabitants' income was twice and up to five times the minimum wage were included in the median socioeconomic status, where most of the housing materials were concrete floor, brick, block, and cement and most of the households had access to sewage infrastructure, running water and electricity. The AGEBS where

inhabitants' income was more than five times the minimum wage were included in the high socioeconomic status and the construction materials used in these households were high quality concrete, brick, block and cement and unlimited access to public services. The SCINCE software [30] of the INEGI was used to identify the AGEBS.

Once the waste collection trucks were chosen, approximately 100 kg of household waste load/socio-economic status/ day were sampled. This figure is higher than that proposed in the Mexican Standard NMX-AA-015-1985 (Quartering Method) [31], yet consistent with other research [4, 5, 22, 23]. These samples were classified, weighed and registered.

The household waste was classified into different types according to the possibility of recovering the corresponding materials and placed into individual plastic containers. Two electronic weighing scales were used to weigh every single load: a 50-kg Torrey EQBV50/100 with a 10-g least count and a 500-kg Torrey L-EQM 500/1000 with a 100-g least count. To quantify by-products, an index card based on the Mexican Standard NMX-AA-022-1985 (By-Product Selection and Quantification) [32] was used.

For composition analysis, the household waste was separated into three broad categories: 1) waste with potential for energy recovery, 2) recyclable waste, and 3) non-recyclable waste. In the first category, food residuals, textiles, yard trimmings and other organic wastes (wood and leather) were gathered; in the second category, paper, cardboard, plastic, glass, tin cans and metals (aluminum, ferrous and non-ferrous metals) were gathered; and in the third one (non-recyclable), disposable diapers, inert waste (expanded polystyrene, construction materials, crockery and ceramics), other non-organics (electronic waste and batteries) and miscellaneous (fine waste, tetra pak packages, others) were gathered as well.

Determination of the Generation of MSW

In order to obtain a higher accuracy in the generation rates, daily data on the waste load weights collected by the trucks of the municipality were used. The data used in the study were collected in 12 whole weeks corresponding to the first quarter of 2009 (i.e., the 7 days of the week). Such information was provided by the Department of Municipal Public Works, which belongs to the Secretariat of Urban Management of the municipality of Ensenada. The entire population of 284,530 people from Ensenada, El Sauzal and Rodolfo Sánchez T. "Maneadero" was considered in order to obtain a per capita estimate, according to the INEGI's data, 2005. The MINITAB® 14.1 program was employed within a 98% confidence interval, which was based on 12-week samples using the student's t-statistic.

RESULTS

The results the composition and quantification analysis of municipal solid waste in the city of Ensenada are shown in the next sections. As to the composition, 15 samples were taken of approximately 100 kg with the entire weight of 1,379.13 kg of the sample analyzed. As to the generation, we counted on data on daily waste load weights gathered in the first quarter of 2009.

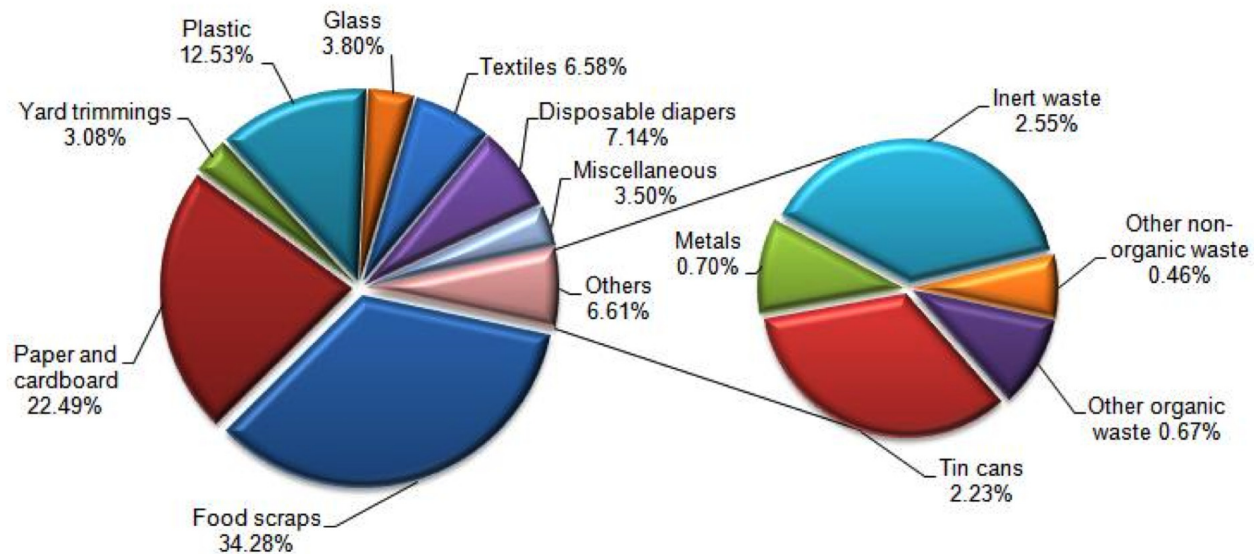


Fig. (1). Composition of MSW in Ensenada.

Composition of Municipal Solid Waste

A total waste load of 1,379.13 kg was weighed, out of which 439.02 kg belonged to the low socioeconomic status, 452.26 kg to the median status, and 487.85 kg to the high status. (Fig. 1) provides details regarding the composition of household waste (HW) generated by the combined three socioeconomic statuses in Ensenada over the entire study period. From these results, certain waste categories stand out: food residual accounts for 34.28%, followed by paper and cardboard at 22.49%, plastic at 12.53%, disposable diapers at 7.14%, and textiles at 6.58%.

Of the total waste stream that is sent to the SL, 86.36% could be reused and just 13.65% has no use and must be discarded. Of the useful percentage, 48.34% is potentially recyclable with financial and environmental benefits, and 51.66% of the waste stream could be reused to generate energy. However, the waste at the SL is not being segregated for later reused. Therefore, the material disposed of is ultimately wasted.

Table 1 provides details regarding the composition of the HW generated by the socioeconomic statuses and, their percentages with respect to the total of categories.

As shown in the chart, the high socioeconomic status discards a higher amount of waste with potential for energy recovery at 46.53%. As to food scraps, this status generates 39.29% in contrast to the low status, which generates only 30.59%. Another category that stands out is textiles, which is the least generated by the high socioeconomic status at 3.22%, as opposed to what it might be thought given their purchasing power and the ever-changing fashion trends.

As to recyclable waste, the high socioeconomic status has the most waste disposal at 43.73%. The category “paper and cardboard” has the highest percentage in the three statuses, of which the low and high ones rank first and second, respectively. The category “plastics” ranks second at 13.01% in the low socioeconomic status.

As to non-recyclable waste, 10.55% of disposable diapers are generated by the median socioeconomic status, followed by the low status at 6.96% and the high status at 4.14%. As to the category “miscellaneous”, the low status generates 5.74%, containing organic and non-organic elements. As to the category “other non-organics”, a greater amount was found in the low socioeconomic status at 0.67%; this might be due to second-hand purchases of electronics, as well as disposable battery acquisitions, compared to the high status, which reports only 0.20%.

Determination of the Generation of MSW

To determine the per capita generation, we counted on data provided by the municipality on daily weights of waste loads collected by the municipality-owned collection vehicles over the first quarter of 2009. Only weeks that had daily data were considered (i.e., whole weeks, Monday through Sunday) except the first and second weeks of 2009.

The average weekly generation of waste was $1,727.588 \pm 142.815$ tons giving a per capita generation of 0.87 ± 0.07 kg per person per day (see equations 1 and 2), where pcg_m is the mean and pcg_l is the tolerance limit. (Fig. 2) provides details regarding the distribution of MSW collection by the municipality of Ensenada.

$$pcg_m = \left[\frac{\left(\frac{1727,583 \text{ kg}}{1 \text{ week}} \right) \left(\frac{1 \text{ week}}{7 \text{ days}} \right)}{284530 \text{ persons}} \right] = 0.87 \frac{\text{kg}}{\text{day} \times \text{person}} \quad (1)$$

$$pcg_l = \left[\frac{\left(\frac{142815 \text{ kg}}{1 \text{ week}} \right) \left(\frac{1 \text{ week}}{7 \text{ days}} \right)}{284530 \text{ persons}} \right] = 0.07 \frac{\text{kg}}{\text{day} \times \text{person}} \quad (2)$$

Table 1. Composition of the MSW by Socioeconomic Status

Type of Waste	LOW		MEDIAN		HIGH	
	KG	%	KG	%	KG	%
Energy recovery						
Food scraps	134.28	30.59%	146.88	32.48%	191.69	39.29%
Textiles	41.74	9.51%	33.26	7.35%	15.73	3.22%
Yard trimmings	6.05	1.38%	18.92	4.18%	17.54	3.60%
Other organics	5.19	1.18%	2.05	0.45%	2.04	0.42%
Total	187.26	42.65%	201.11	44.47%	227.00	46.53%
Recyclable						
Paper and cardboard	104.35	23.77%	90.17	19.94%	115.66	23.71%
Plastics	57.13	13.01%	56.12	12.41%	59.47	12.19%
Glass	11.34	2.58%	20.16	4.46%	20.92	4.29%
Tin can	7.36	1.68%	9.83	2.17%	13.59	2.79%
Metals	2.31	0.53%	3.66	0.81%	3.70	0.76%
Total	182.49	41.57%	179.94	39.79%	213.34	43.73%
Non-recyclable						
Disposable diapers	30.57	6.96%	47.70	10.55%	20.19	4.14%
Inert waste	10.52	2.40%	9.62	2.13%	14.92	3.06%
Other non-organics	2.96	0.67%	2.33	0.52%	1.00	0.20%
Miscellaneous	25.22	5.74%	11.56	2.56%	11.40	2.34%
Total	69.27	15.78%	71.21	15.75%	47.51	9.74%

DISCUSSION

Composition of MSW

Of the total amount of waste generated, 86.36% has the potential to be reused and just 13.65% must be discarded in the SL. In turn, out of the useful percentage, 41.75% could be recycled and 44.61% could be used to generate energy, thereby obtaining a host of financial and environmental returns. However, a study carried out by Ojeda *et al.* [33] in Mexicali shows that the potential for waste recycling in this city is 33.12% and the waste with potential for energy recovery represents 43.83%. The reduction of potentially recyclable materials may be due to the fact that Mexicali

disposes of less paper and cardboard, tin cans, and glass since it counts on more recycling companies, as opposed to the current situation in Ensenada, where there are no recycling businesses at all. The closest activities related to recycling are the drop off centers provided by companies or institutions.

In contrast to this study, another study carried out by the Secretariat of Social Development (SEDESOL) [34] in Ensenada shows that only 54.93% could be recycled (a percentage higher than those found) and 30.96% could be used to generate energy. Another study, carried out by the Secretariat of the Environment and Natural Resources

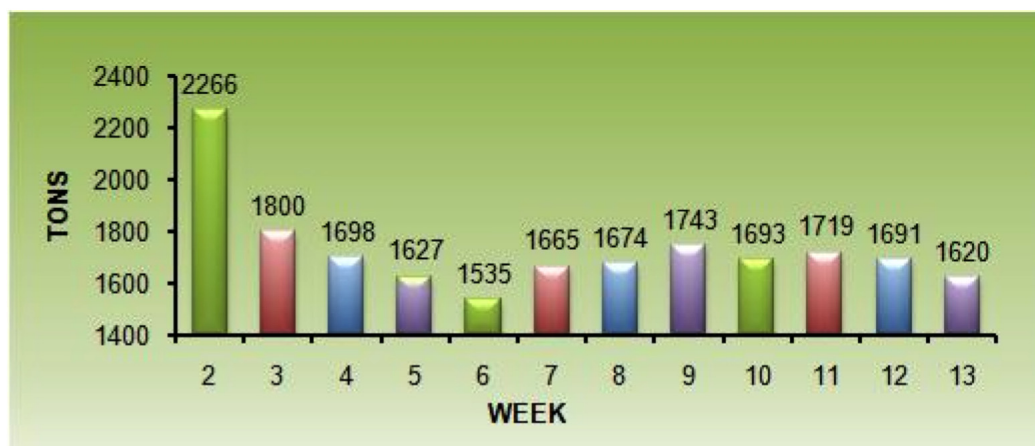


Fig. (2). MSW collected in the first quarter of 2009.

(SEMARNAT) [35], reports that the beneficial use of waste for recycling is 52.02% and for energy recovery is 29.44%. One explanation for these differences may be that the recycling culture in the community is increasing; therefore, waste with potential value is not discarded for later collection by the waste collection services. This might be due to the promotion and support of recycling campaigns launched by the municipality and nongovernmental organizations (NGO).

In the international stage, for example, a study carried out in Hong Kong and Dublin shows that the domestic household waste generated separately in these two cities that can be recycled is 51.4% and 50.5%, respectively [23]. These percentages are higher than the ones found and set forth in this study (approximately 10%). This may be because within the recyclables reported in those studies are included disposable diapers, while in the research reported here diapers are not considered as recyclable for not having adequate facilities for its recycling.

It is known that the facts and figures about the waste reported in the U.S.-Mexican border have the particular characteristic of less organic content than in the rest of Mexico. Research carried out in several places around Mexico show that, indeed, the organic composition of food scraps and yard trimmings is lower in the north border region. For example, the results published by Bernache-Pérez *et al.* [26] in Guadalajara show food scraps at 40.7%, yard trimmings at 12.2%, paper at 10%, and plastics at 9%. On the other hand, Buenrostro [25] reports that food scraps in Morelia accounted for 50.95%, paper 7.62% and plastics 7.68%. As to Chihuahua, Gómez *et al.* [24] reports that out of the total amount of waste generated, 48.0% is food scraps, 16.1% is paper, and 11.9% plastics.

Different fact and figures regarding waste composition were found in other countries. For example, organic waste generated in Portugal accounts for 27.4%, paper accounts for 20.3%, plastics 18%, glass 6%, metals 5%, and textiles 3.8% [36]. In Missouri, USA, the waste composition reported paper at 41%, organics at 21%, plastics at 16%, metals at 6%, glass at 3%, and other waste at 13% [5]. In Cyprus, waste composition reported paper at 24%, plastics at 5%, food scraps at 39%, yard trimmings at 14%, glass at 1.5%, and metals at 2% metals [37]. In every study mentioned, the organic waste compositions generated in these countries are lower than the one reported in Mexico. Ensenada's waste composition most closely resembles that of Cyprus. As for the composition of glass and metal, the difference can be partially attributed to the informal recycling.

Daily Per Capita Generation

In the present study, it was determined that Ensenada's municipal solid waste is 0.87 ± 0.07 kg per person per day. Such a figure lies below the 1.3837-kg-per-person-per-day estimate proposed by the National Institute of Ecology [38] for Ensenada in 2010 (444 grams above the upper limit). SEMARNAT [35] reported that the daily per capita generation in the border zone in 2006 was 1.06 kg per person per day. The figure found in the present study was lower than the one set forth in the study previously mentioned.

Other studies carried out along the Mexican border show that the waste generation in Reynosa is 1.96 kg per person per day, in Ciudad Juárez is 1.21 kg per person per day, and in Tijuana is 1.17 kg per person per day [39]. All of these figures are above one kilogram per person per day, higher than the per capita generation estimated for Ensenada, which is the most similar to Tijuana's. In contrast to what was found by Ojeda *et al.* [28], Mexicali's waste generation is 0.592 kg per person per day, probably due to the data sampling period, which was in two stages: from May to June of 1999 and from March to April of 2000. The findings have shown that Ensenada's waste generation, to date, corresponds to just the first quarter of 2009. Other reasons for this may be 1) the political elections in 2000, where political propaganda materials had an impact on waste generation, and 2) Mexicali's greater recycling culture over that of Ensenada as well as more recycling-oriented enterprises in the city. It is important to state that in these previously mentioned studies, the samplings were done door-to-door, contrary to sampling in this study, where the sampling was done right from the waste collection trucks.

Findings from this study show the opposite of what happens in other cities around the country. Lower figures are shown by Gómez *et al.* [24] in Chihuahua with 0.676 kg per person per day, Bernache-Pérez *et al.* [26] in Guadalajara with 0.580 kg per person per day, and Buenrostro [25] in Morelia with 0.629 kg per person per day. Compared to other cities worldwide, it can be observed that daily per capita generation in Ensenada is similar to the generation rates described by Hristovski *et al.* [40] with 1.06 ± 0.56 kg in Veles, Macedonia (developing economy); Bernache-Pérez *et al.* [26], who states that developed countries such as Japan generates 1.22 kg per person per day and Germany 1.15 kg per person per day; and Gomes *et al.* [36], who states that Portugal generates 1.2 kg per person per day. This is in contrast to other developed countries such as the United States with a daily per capita generation of 1.98 kg per person per day and Canada with 1.64 kg, countries where a stressed difference may be noted.

CONCLUSIONS

Knowledge about household waste composition is essential in order to properly plan its management. To know the organic waste proportions is relevant to estimate the methane gas generation during anaerobic decomposition and reuse the waste to generate energy or to use this portion to produce compost. In this regard, this study shows that Ensenada's waste contains an organic component of above 60%, taking into account paper and cardboard.

The large amount of waste generated in the city (86.36%) could be reused, whether by recycling or energy recovery, thereby generating financial, environmental, and social returns that would otherwise be lost to disposal in the sanitary landfill. However, due to a combination of the lack of waste management plans and conservation, recycling practices and recycling industry development policies, as well as recycling licensees' financial interests with the ignorance of local authorities regarding the potential value of waste material, the disposal of potentially marketable waste material is a practice that will likely continue.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by CONACYT FOMIX-BC and is part of doctoral research project the first author. We thank the Direction of Ecology and the Direction of Public Services Municipal, belonging to the Secretariat of Urban Management of Municipal Government Ensenada of the XIX City Council Ensenada for the facilities granted to carry out this investigation.

REFERENCES

- [1] O. Buenrostro, and G. Bocco, "Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, pp. 251-263, March 2003.
- [2] G.M. Ayinoluola and M.A. Muibi, "An engineering approach to solid waste collection system: Ibadan North as case study", *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 1681-1687, February 2008.
- [3] P.T. Williams, *Waste Treatment and Disposal*, John Wiley & Sons, 1998.
- [4] G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Madrid, España: McGraw-Hill, 1994.
- [5] Y. Zeng, K.M. Trauth, R.L. Peyton, and S.K. Banerji, "Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri", *Waste Manage. Res.*, vol. 23, pp. 62-71, January 2005.
- [6] E. Gidarakos, G. Havas, and P. Ntzamilis, "Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete", *Waste Manage.*, vol. 26, pp. 668-679, April 2006.
- [7] N. Chang, and E. Davila, "Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas", *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 776-794, June 2008.
- [8] M. Giugliano, M. Grosso, and L. Rigamonti, "Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district", *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 39-50, June 2008.
- [9] P. Lawson, "Landfill, Microbiology and Research: An Introduction to the Workshop", *Landfill Microbiology: R & D Workshop*, pp. 1-9, 1989.
- [10] A. Marshall, "Growing bigger", *Waste Management World*, vol. 8, 2007.
- [11] F. Robles Martínez, *Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios*, México: Instituto Politécnico Nacional, 2008.
- [12] K.L. Shah, *Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology*, United States of America: Prentice Hall, 2000.
- [13] S.L. Machado, M.F. Carvalho, J. Gourc, O.M. Vilar, and J.C.D. Nascimento, "Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results", *Waste Manage.*, vol. 29, pp. 153-161, January 2009.
- [14] EPA - LMOP, *Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook*, United States of America: Environmental Protection Agency, 1996.
- [15] EPA - METHANE TO MARKETS, "Landfill Methane Recovery and Use Opportunities", 2008.
- [16] S. Kumar, A. Mondal, S. Gaikwad, S. Devotta, and R. Singh, "Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study", *Atmos. Environ.*, vol. 38, pp. 4921-4929, April 2004.
- [17] R. Bove, and P. Lunghi, "Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies", *Energy Conversion Manage.*, vol. 47, pp. 1391-1401, August 2006.
- [18] F.G. Pohland, and S.R. Harper, *Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills*, EPA-600/2-86-073. Washington DC: 1986.
- [19] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, "Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill", *Energy*, vol. 31, pp. 3208-3219, May 2006.
- [20] SEMARNAT, *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*, México: 2001.
- [21] S. Ojeda Benítez, "El consumo como fuente de generación de basura y contaminación", *Contaminación y medio ambiente en Baja California*, México: Universidad Autónoma de Baja California y Miguel Ángel Porrúa, librero-editor, pp. 227-249, May 2006.
- [22] B.E.J. Jiménez Cisneros, *La contaminación ambiental en México*, México: Limusa, 2002.
- [23] S. Chung and C. Poon, "Characterisation of municipal solid waste and its recyclable contents of Guangzhou", *Waste Manage. Res.*, vol. 19, pp. 473-485, February 2006.
- [24] G. Gomez, M. Meneses, L. Ballinas, and F. Castells, "Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico", *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 2465-2471, June 2008.
- [25] O. Buenrostro Delgado, *Los residuos sólidos municipales. Perspectivas desde la investigación multidisciplinaria*, México: Universitaria, 2001.
- [26] G. Bernache-Perez, S. Sanchez-Colon, A.M. Garmendia, A. Davila-Villarreal, and M.E. Sanchez-Salazar, "Solid waste characterisation study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico", *Waste Manage. Res.*, vol. 19, pp. 413-424, July 2001.
- [27] G. Gómez, M. Meneses, L. Ballinas, and F. Castells, "Seasonal characterization of municipal solid waste (MSW) in the city of Chihuahua, Mexico", *Waste Manage.*, vol. 29, pp. 2018-2024, September, 2009.
- [28] S. Ojeda-Benítez, C. Armijo-de Vega, and M.E. Ramírez-Barreto, "Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city", *Resour., Conserv. Recycl.*, vol. 39, 2003, pp. 211-222.
- [29] S. Ojeda-Benítez, C. Armijo-de Vega, and M.Y. Marquez-Montenegro, "Household solid waste characterization by family socioeconomic profile as unit of analysis", *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 52, pp. 992-999, January 2008.
- [30] SCINCE, "The System for Consultation of Censuses Information", 2000.
- [31] NMX-AA-015-1985, *Norma Mexicana NMX-AA-015-1985*, México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de Cuarteo.
- [32] NMX-AA-022-1985, *Norma Mexicana NMX-AA-022-1985*, México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y cuantificación de Subproductos.
- [33] S. Ojeda Benítez, C. Armijo de Vega, and M.E. Ramírez Barreto, "Gestión de residuos sólidos municipales", *Una visión de la problemática ambiental de Mexicali y su valle*, México: UABC, pp. 137-167, January 2006.
- [34] SEDESOL, *Proyecto de relleno sanitario y estudio de impacto ambiental en Ensenada, B.C.*, México: 1998.
- [35] SEMARNAT, "Compendio de Estadísticas Ambientales 2008", 2008.
- [36] A. Gomes, M. Matos, and I. Carvalho, "Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: An economic assessment", *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 1711-1719, September, 2008.
- [37] P. Eleftheriou, "Energy from waste: a possible alternative energy source for large size municipalities", *Waste Manage. Res.*, vol. 25, pp. 483-486, March 2007.
- [38] INE, *Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México*, México: 1997.
- [39] I. Couto Benítez, "Evaluación de la gestión integral de residuos sólidos urbanos en la frontera norte: los casos de Juárez, Reynosa y Tijuana", Tesis de Maestría, El Colegio de la Frontera Norte, 2008.
- [40] K. Hristovski, L. Olson, N. Hild, D. Peterson, and S. Burge, "The municipal solid waste system and solid waste characterization at the municipality of Veles, Macedonia", *Waste Manage.*, vol. 27, pp. 1680-1689, December 2007.



ANEXO B: POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DISPUESTOS EN UN RELLENO SANITARIO

Autores: Aguilar-Virgen Q., C. Armijo-de Vega, P.A. Taboada-González, y X.M. Aguilar

Artículo: "Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario"

Revista: Revista de Ingeniería

Numero: 32

Año: 2010

Páginas: 16-27

ISSN: 0121-4993

Indexación: PUBLINDEX Categoría A2, SciELO, Redalyc, LATINDEX, PERIÓDICA, ACTUALIDAD IBEROAMERICANA, Gale Cengage Learning, EBSCO, Oceanet, DOAJ.

Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario

Potential Recovery of Domestic Solid Waste Disposed of in a Landfill

Quetzalli Aguilar-Virgen^a, Carolina Armijo-de Vega^b, Paul Taboada-González^c,
Xochitl M. Aguilar^d

PALABRAS CLAVES

Composición de residuos, reciclaje, relleno sanitario, residuo sólido doméstico.

KEY WORDS

Domestic Solid Waste, landfill, recycling, waste composition.

RESUMEN

Conocer las cantidades y tipos de residuos sólidos domésticos (RSD) que son depositados en el relleno sanitario, brinda la posibilidad de proponer opciones sustentables para su aprovechamiento. Los residuos de cualquier localidad manejados de forma apropiada se pueden convertir en insumos de algún otro proceso. El objetivo de este estudio fue cuantificar los componentes de los RSD susceptibles de ser reciclados, depositados en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada (Baja California, México), para ser valorizados en el mercado de los reciclables. En promedio se podrían comercializar semanalmente 643.67 toneladas de residuos alimenticios para composta, 389.45 toneladas de papel y cartón, 217.55 toneladas de plástico, 78.81 toneladas de vidrio, 37.20 toneladas de metales y 8.11 toneladas de aluminio. Se obtendría en total un aproximado de MXP \$911,224.18 (USD \$ 71,693.48) por la comercialización de los principales reciclables.

ABSTRACT

Knowing the amount and type of Domestic Solid Waste (DSW) that is deposited in the landfill gives us the possibility to consider options in how to make sustainable use of it. Waste from any location, if properly handled, can be turned into the raw material for other processes. The aim of this study was to quantify the components of the DSW likely to be recycled, deposited in the landfill in the city of Ensenada, Baja California, Mexico, so that they could be valued on the market as recyclables. The average weekly market could be 643.67 tons of food waste for composting, 389.45 tons of paper and cardboard, 217.55 tons of plastic, 78.81 tons of glass, 32.20 tons of metal and 8.11 tons of aluminum. This should result in a total of approximately MXP \$ 911,224.18 (USD \$ 71,693.48) for the marketing of major recyclables.

a M.Sc. Estudiante de Doctorado en Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México. Profesora e investigadora, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. ✉ gaguilar@uabc.edu.mx

b Ph.D. Profesora-Investigadora, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. ✉ carmijo@uabc.edu.mx

c M.Sc. Estudiante de Doctorado en Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México. Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. ✉ ptaboada@uabc.edu.mx

d Ingeniera Industrial. Profesora-Investigadora, Instituto Tecnológico de Tijuana. Tijuana, Baja California, México. ✉ xmaguilar@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano ha causado un incremento en la generación de residuos domésticos, de manejo especial¹ e industriales no peligrosos. Dichos residuos son acumulados en los sitios de disposición final; los cuales, sin un manejo apropiado, pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, así como de salud pública.

En general, los países en desarrollo desconocen las cantidades y tipos de residuos sólidos (RS) que son recolectados, la cantidad reciclada y la recuperada, la inadecuada selección de sitios de disposición final, así como los programas ineficientes de reutilización y reciclaje [1, 2 y 3]. Por esta razón, es muy importante conocer la generación y composición de los residuos sólidos.

Para determinar la generación y composición de los residuos sólidos domésticos (RSD), se pueden utilizar diferentes metodologías para la toma de muestras: a través de la recolección casa por casa o la toma de muestras directamente del camión recolector de basura [4, 5, 6, 7, 8 y 9]. En cuanto al tamaño de muestra, Tchobanoglous et al. [4] explica que las muestras tomadas de 90 kg no varían significativamente de las tomadas en muestreos de hasta 770 kg, obtenidos de la misma carga de residuos. Sin embargo, en otras investigaciones realizadas por Jiménez [10], Zeng et al. [5] y Gidaracos et al. [11], se menciona que las muestras tomadas para análisis pueden ser de entre los 90 y 180 kg. En México, la norma mexicana NMX-AA-015-1985 [12] propone muestras de 50 kg. En cuanto a la duración del estudio, diversas investigaciones reportan una duración desde una semana [5, 11, 13, 14 y 15], hasta meses [7, 8, 16 y 17].

En México, son pocas las ciudades que han cuantificado los RS; de hecho, los estudios para determinar la generación de residuos están enfocados principal-

mente a los RSD [8, 9, 13, 18 y 20]. Algunos RSD de cualquier localidad manejados de forma apropiada se podrían reutilizar o convertir en insumos de algún otro proceso. De esta manera, lo que al final se vertiera en los sitios de disposición final sería una cantidad menor.

Los programas de manejo de residuos deben estar fundamentados en el conocimiento de la composición de residuos y las condiciones de los mercados de los reciclables [21]. Es importante tener en cuenta dichos aspectos y no adoptar y basarse exclusivamente en las experiencias de otras localidades, ya que esto podría ocasionar que el programa no funcione, lo que desincentivaría a la sociedad y generaría pérdidas económicas por las campañas realizadas, mano de obra y equipo subutilizado.

Diversas investigaciones muestran el potencial de reciclaje de los RS, sobre todo en países industrializados donde existen legislaciones y regulaciones gubernamentales más controladas incentivos económicos, así como una mayor conciencia ambiental. Estos estudios se han realizado desde diferentes puntos de vista, que pueden ser el valor de los reciclables en el mercado y los beneficios ambientales. Se han utilizado diferentes metodologías: la toma de muestras casas por casa, la toma directa de los camiones recolectores o de los contendedores de reciclaje de casas, la diferente duración de muestreos que van de semanas a meses y las diferentes formas de clasificar los residuos. Algunos utilizan el método de experimento de elección y/o entrevistas. Otros buscan conocer la eficiencia de recolección, clasificando el potencial de acuerdo con los índices demográficos [5, 6, 7 y 16].

Por otra parte, también se han realizado investigaciones en países en desarrollo, en las que se busca impulsar más este tipo de estrategias de manejo de residuos. Estos estudios abarcan los residuos sólidos

1 La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México define a los residuos de manejo especial como “aquéllos 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”.

universitarios, los RSD, las investigaciones desde el punto de vista de capital social y la evaluación del ciclo de vida; todos ellos llevados a cabo con diferentes metodologías [8, 9, 17, 18, 21 y 22].

El objetivo de este estudio es cuantificar los componentes de los RSD susceptibles de ser reciclados y depositados en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada (Baja California, México), para ser valorizados en el mercado de los reciclables.

Se debe señalar que la cantidad de residuos que podrían cuantificar para ser reciclados en la ciudad sería mayor. Sin embargo, no estaba en el alcance de esta investigación lo que se separa en diversas fuentes generadoras y aquello que es llevado por los usuarios a centros de acopio o lo que se recupera en los contenedores y/o camiones de recolección, debido a que lo que se busca es saber cuánto se podría aprovechar de lo que se vierte en los sitios de disposición final.

MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN ENSENADA (BAJA CALIFORNIA, MÉXICO)

El sistema de gestión de residuos de Ensenada corresponde a 3 etapas: 1) la generación, 2) el barrido y la recolección mixta, y 3) la disposición final.

Los residuos sólidos urbanos generados en Ensenada son principalmente depositados en el relleno sanitario (RESA) de la ciudad; una pequeña cantidad es reciclada desde las fuentes generadoras y son llevadas al centro de acopio de compañías particulares, ya sea para vender dichos residuos o simplemente para apoyar estas iniciativas; también existen algunos programas de reciclaje por parte del gobierno.

El barrido es realizado por el municipio y puede ser manual (zonas turísticas y centro de la ciudad) o mecánico (calles y avenidas principales). Los RSD son llevados al sitio por camiones recolectores del ayuntamiento de Ensenada, así como por empresas particulares. Los residuos de manejo especial y los industriales no peligrosos son recolectados y trasladados

al relleno sanitario por empresas: i) particulares generadoras y ii) privadas dedicadas a la recolección de residuos. La frecuencia de recolección por parte del ayuntamiento de Ensenada varía de acuerdo al sector de la ciudad atendido: una vez por semana (1/7) en la mayoría de las rutas de recolección (cada vez que se recolectan residuos en algún domicilio, éstos corresponden a la generación de una semana); en otros casos, como el de la zona céntrica de la ciudad, la recolección es diaria (7/7). En el caso de los recolectores particulares, la frecuencia de la recolección y la disposición en el relleno sanitario varía de acuerdo a las necesidades de sus clientes.

La disposición final de los residuos está concesionada a una compañía particular. Los residuos que llegan al RESA se vierten directamente en las celdas de confinamiento, no tienen ningún tipo de tratamiento y no existen mecanismos de recuperación o reciclaje, ni siquiera por parte de recicladores ya que tienen restringido el acceso al sitio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Ensenada, cabecera municipal del municipio del mismo nombre en el Estado de Baja California, ubicado al noroeste de México. Este municipio, con sus 52,510.712 km² de superficie, representa el 74.84% de la superficie del estado de Baja California y 2.6% de la superficie del país, por lo que es el municipio de mayor extensión en México. La ciudad se encuentra ubicada a los 31°52' de latitud norte y los 116°36' de longitud oeste. La precipitación total anual es de 250 mm, con un clima mediterráneo, temperatura templada la mayor parte del tiempo y lluvias principalmente en invierno.

En el 2005 la ciudad de Ensenada tenía 260,075 habitantes², agrupados en 57,409 viviendas de 77 colonias (barrios)³. Las principales actividades económicas en la ciudad eran en el sector secundario y terciario

2 INEGI, "Censo de Población y Vivienda 2005", 2005.

3 ITER, "Integración territorial del censo de Población y Vivienda", 2000

con un 30.91% y 62.71% respectivamente. De acuerdo con el Catálogo ITER³ del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en Ensenada la población económicamente activa es del 37.87% y los estratos socioeconómicos se dividen en 25.82% para el bajo, 51.87% medio y 22.31% alto.

ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE RSD

El estudio de caracterización se llevó a cabo en el relleno sanitario (RESA) de la ciudad de Ensenada, durante 5 días seguidos los meses de febrero y junio de 2009. Los residuos analizados fueron los depositados en el relleno sanitario por los camiones recolectores municipales, que se caracterizan por estrato socioeconómico (bajo, medio y alto). Para elegir el camión recolector se indagó con los conductores de qué ruta (colonia) procedían los residuos recolectados; esto se realizó hasta obtener el primer camión de cada estrato socioeconómico por día, durante los 10 días.

Para la elección de colonias de cada estrato se tomó como referencia el Área Geoestadística Básica

(AGEB's)⁴; ésta es la estratificación que maneja el INEGI en los Censos de Población y Vivienda del año 2000. El criterio considerado para establecer los estratos de las colonias fue los salarios mínimos devengados (SM; en el 2009 el salario mínimo en Ensenada fue de aproximadamente US\$4.5 por día). Que- dando como estrato bajo aquellas AGEB's en la que los ingresos eran de menos de uno y hasta dos SM. En estrato medio se consideró a las AGEB's con ingresos de más de dos y hasta cinco SM. En el caso del estrato alto se consideró a las AGEB's con ingresos de más de cinco SM. Se utilizó el software SCINCE⁵ del INEGI para identificar a las AGEB's.

Ya elegido el camión recolector, se tomaron aproximadamente 90 kg por día de muestreo, por cada estrato socioeconómico y por camión (un total de 29 muestras, debido a que el último día de muestreo no llegaron camiones de estrato alto), cantidad mayor a la propuesta en la norma mexicana NMX-AA-015-1985, pero acorde a otras investigaciones [4, 5, 10, 11]. Se separaron y clasificaron los residuos de

Reciclables orgánicos	
Residuos alimenticios	Cualquier tipo de residuos de alimentos.
Papel y cartón	Revistas, periódicos, libros, materiales de embalaje, papel de oficina, cajas, cartón corrugado, otros.
Textiles	Algodón, cortinas, nailon, ropa usada, retazos de tela.
Otros orgánicos	Madera, cuero, residuos de jardinería.
Reciclables inorgánicos	
Plástico ^a	PET, HDPE, LDPE, PP, entre otros.
Vidrio	Vidrios claros, ámbar y verdes.
Metales	Latas de los alimentos procesados y bebidas, materiales ferrosos y no ferrosos.
Envases Tetra pak® ^a	Envases de bebidas y alimentos procesados.
Aluminio	Latas de aluminio, otros tipos de aluminio.
Otros inorgánicos	Loza y cerámica, materiales de construcción.
No reciclable	
Residuos sanitarios	Pañal desechable de niño y adulto, toallas sanitarias.
Residuos fino	Tierra de jardín, residuos finos que pasan el tamiz.
Residuos electrónicos	Cualquier tipo de residuo electrónico doméstico.
Varios	Residuos que no se ajustan a las categorías anteriores.

^a La clasificación se realizó de acuerdo a su componente biodegradable

Tabla 1. Categorías usadas para determinar la composición de los residuos

- 4 Las unidades geográficas que se clasifican son grupos de manzanas que reciben el nombre de AGEB's.
5 SCINCE, "Sistema para la Consulta de Información Censal", 2000.

acuerdo al procedimiento modificado propuesto por Ojeda-Benítez et al. [8] y se agruparon en tres grandes categorías: 1) reciclables orgánicos, 2) reciclables inorgánicos, y 3) no reciclables (ver Tabla 1). Se pesaron y se registraron los valores obtenidos. Los pesajes se realizaron *in situ* con una balanza electrónica Torrey EQB_50/100 de 50 kg con sensibilidad de 10 gr.

Posteriormente, se calculó el potencial de los reciclables que se están desaprovechando en términos de toneladas semanales. En el aspecto económico, se realizó un cálculo considerando el valor en el mercado, cuyos precios de compra manejados fueron el promedio otorgado por los diferentes centros de acopio y recicladores de la región. Cabe resaltar que en este aspecto sólo se obtuvieron los precios de compra de los siguientes subproductos: papel y cartón, plásticos, vidrio, metales, aluminio. A pesar que los envases asépticos son reciclados en la Ciudad de México, no se pudo obtener el precio de compra, debido a que en la región éstos no son reciclados. Los residuos alimenticios tampoco son vendidos a terceros, sin embargo, pueden ser comercializados por el propio municipio para la elaboración de composta.

DETERMINACIÓN DE LA GENERACIÓN DE RSD

La Ecuación 1 muestra cómo se determinó la generación de residuos de acuerdo con el método indirecto propuesto por la SEMARNAT [19].

$$gpc = \frac{\text{Cantidad total de residuos que se recolectan (kg/día)}}{\text{Población atendida por el servicio de recolección (hab)}} \quad (1)$$

Con la finalidad de proporcionar una mayor precisión en las tasas de generación, se utilizaron los datos de los pesajes diarios de los camiones recolectores del ayuntamiento de Ensenada del 23 de febrero al 1 de marzo (primer semana del muestreo) y del 22 al 28 de junio (segunda semana del muestreo), así como el número de habitantes. Dicha información fue proporcionada por la Dirección de Servicios Públicos Municipales de la Secretaría de Administración

Urbana del Gobierno Municipal de Ensenada. Para la estimación per cápita, se consideró una población total de 260,075 habitantes. Se empleó el programa MINITAB® 14.1 con un intervalo de confianza del 98%, el cual se basó en muestras de 14 días y utilizó el estadístico t-student. Además, para conocer la precisión de la estimación, se determinó el error estándar muestral de acuerdo con la Ecuación 2. Por último, se determinó el error estándar muestral per cápita.

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPOSICIÓN DE LOS RSD

Se pesaron en total 2,510.82 kg, de los cuales 850.35 kg eran del estrato bajo, 844.69 kg del estrato medio y 815.78 kg del estrato alto. Los resultados obtenidos reportan un alto porcentaje de residuos que pueden ser reciclados, el 90.79% (ver Figura 1). De acuerdo con Wehenpohl y Ambrosius [23], dos terceras partes de los residuos que se generan pueden ser reciclados, lo cual incluye a los materiales biodegradables e inorgánicos. Dichos autores mencionan que México tiene un gran potencial en reciclaje pero que éste ha sido poco apoyado por las leyes del país; por tanto, sólo se aprovecha entre el 2% y el 5% de los materiales reciclables. Esto, a pesar que desde el 2004 en México entró en vigor la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Sólidos (LGPGIRS)⁶, la cual obliga a los generadores⁷ de residuos a minimizar la generación de los mismos y a valorizarlos y a gestionarlos de una manera integrada. A pesar de ello, a la fecha existe una carencia de estudios sobre reciclaje en México.

El porcentaje aprovechable se compone del 75.51% residuos orgánicos reciclables y el 24.49% residuos inorgánicos reciclables, de ellos se podrían obtener beneficios económicos y ambientales. Sin embargo,

6 LGPGIR, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, México: 2003.

7 La LGPGIRS define a los generadores como “personas físicas o morales que produce residuos, a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo”.

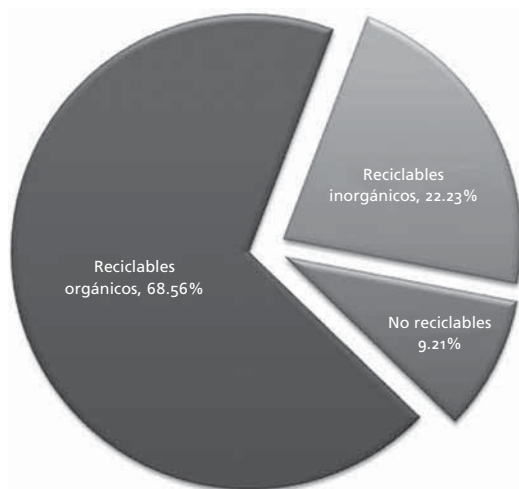


Figura 1. Porcentajes de residuos reciclables y no reciclables

en un estudio realizado en Mexicali en 1998 por Ojeda et al. [9], se encontró que el total de residuos por reciclar es de 86.69%, del cual el 67.00% son residuos orgánicos reciclables y el 33.00% son residuos inorgánicos reciclables. Dichas cantidades son menores a la presente investigación; en cuanto a la cantidad total que se podría reciclar, se encuentra aproximadamente 4 puntos porcentuales abajo. En otro estudio realizado en la misma ciudad, pero en el año 2000 por Ojeda et al. [8], se encontró que el total de residuos que se podrían reciclar es de 71%, del cual el 87.32% son residuos orgánicos reciclables y el 12.68% son residuos inorgánicos reciclables. Porcentajes menores a los de 3 años atrás en la misma ciudad en un 15.69% y un 19.79% menor a la presente investigación.

Estas diferencias pueden deberse a que el muestreo realizado en esta investigación fue directamente del camión recolector y no casa por casa como en dichas investigaciones. Aunado a que estos estudios fueron realizados hace más de 10 años, los patrones de consumo han cambiado y la población se ha incrementado en un 16.37%⁸ del 2000 al 2005. Además, en el sitio de disposición final de la ciudad de Mexicali, trabajan alrededor de 120 recicladores [9], mientras que en la ciudad de Ensenada, los recicladores no tienen

acceso a las instalaciones. También afecta el hecho de que en Ensenada de acuerdo con el XVIII Ayuntamiento de Ensenada, los subproductos susceptibles al reciclaje son acopiados y comercializados mediante canales de distribución directa hacia ciudades con mayor infraestructura como Tijuana, Mexicali y los Estados Unidos.

En la Tabla 2 se muestra que en promedio los residuos de comida, y de papel y cartón son los más altos de los reciclables orgánicos, siendo el 36.51% y el 22.09% respectivamente. De igual manera, se expone que dentro de los reciclables inorgánicos el residuo que presenta una mayor proporción es el plástico con 12.34%. Es importante marcar que los plásticos han sido reportados como residuos orgánicos con una composición de 16.85% [11] y otros lo reportan como residuos inorgánicos con una composición del 17.4% [9]; por lo que se puede clasificar de acuerdo a su grado de degradabilidad o a su origen. En el caso de los residuos no reciclables, los residuos sanitarios resaltan con un 5.81%. La composición de los residuos por estrato socioeconómico se comporta de forma muy similar; las proporción de reciclables orgánicos e inorgánicos oscilan de 89.80% a 92.51%.

Investigaciones realizadas en Brasil mencionan que se pueden llegar a utilizar para reciclaje o reúso el 90% de los RSD y los residuos que se pueden utilizar para compostaje (residuos alimenticios y residuos de jardinería) llegan a ser el 53.7% [24]. El porcentaje de reciclaje o reúso es muy similar a la presente investigación (90.79%). En cuanto al compostaje, el porcentaje reportado en este estudio es menor en un 13.43%. En este sentido, se debe marcar que los porcentajes de residuos alimenticios en ambas investigaciones son muy similares (36.51% en Ensenada y 40.10% en Brasil), al contrario de lo que se aprecia en los residuos de jardinería, que tienen un 3.76% en Ensenada (los residuos de jardinería se encuentran englobados en otros orgánicos) y un 13.60% en Brasil. Una explicación a esto puede ser de que, a pesar de que se siguió

8 Valor obtenido de acuerdo al Catálogo ITER del INEGI del 2000 y 2005.

Tipo de residuo		Porcentajes (%)			
		Promedio	Estratos socioeconómicos		
			Bajo	Medio	Alto
Reciclables orgánicos	Residuos alimenticios	36.51	34.21	36.02	39.29
	Papel y cartón	22.09	22.79	21.23	22.25
	Textiles	6.20	9.51	5.98	3.12
	Otros orgánicos	3.76	2.98	4.96	3.34
Reciclables inorgánicos	Plástico	12.34	12.31	12.21	12.51
	Vidrio	4.47	3.50	4.32	5.58
	Metales	2.11	1.92	1.94	2.48
	Envases Tetra pak®	0.55	0.40	0.44	0.81
	Aluminio	0.46	0.28	0.47	0.63
	Otros inorgánicos	2.30	2.15	2.23	2.51
No reciclable	Residuos sanitarios	5.81	5.63	7.32	4.49
	Residuos fino	1.55	1.42	1.48	1.75
	Residuos electrónicos	0.42	0.49	0.53	0.25
	Varios	1.42	2.40	0.87	0.99

Tabla 2. Composición de los residuos sólidos domésticos de Ensenada (Baja California, México)

una metodología muy similar en la que se tomaron las muestras directamente del camión recolector y se estratificaron en 3 estratos socioeconómicos, los climas de ambas regiones son muy diferentes; el de Ensenada es tipo Mediterráneo, con una precipitación total anual de 250 mm, y el de Brasil es de tipo Tropical, con una precipitación total anual de 1457 mm.

Otros estudios reportan cantidades menores, tal es el caso de Hong Kong y Dublín: los residuos domésticos que pueden ser reciclados son de 51.4% y 50.5% respectivamente [25]. Sin embargo, en estos estudios los residuos reciclables son papel, cartón, plásticos y vidrio, al contrario del estudio reportado en este artículo que, además de los mencionados, son los residuos alimenticios, textiles, latas, aluminio, otros orgánicos e inorgánicos.

Los resultados indican que los residuos alimenticios ocupan entre el 49% y 58% de los reciclables orgánicos en los tres estratos socioeconómicos (ver Figura 2). Una categoría que resalta es el papel y cartón ya que los porcentajes son muy similares 33%. Una investigación realizada en otra ciudad fronteriza, reporta los residuos alimenticios con un 75% y el papel y cartón con un 7.2% del total de los residuos orgánicos reciclables [8]. Ésta es una diferencia grande a

pesar de que se encuentran solamente a 284 km de distancia; y se le puede atribuir a que en Mexicali la actividad se centra en el reciclaje de papel y cartón (6 recicladoras de un total de 13) y, en el caso de Ensenada, sólo se tiene centros de acopio [22]. La metodología seguida es diferente a la de esta investigación, además, el estudio se llevó a cabo en 1999-2000; es decir, hace 10 años aproximadamente, período en que los patrones de consumo han cambiado y la industrialización de productos alimenticios y el exceso de los empaques han influido. En cuanto a los textiles, se pudo visualizar un mayor desperdicio del estrato bajo (14%), esto se puede deber a que mucha de esta ropa es adquirida de segunda mano en comercios minoristas *tianguis*.

Los reciclables inorgánicos se muestran en la Figura 3. El más alto porcentaje está representado por los plásticos que tienen una diferencia entre los estratos que va de 51% al 60%, siendo el de menor porcentaje el estrato alto y el de mayor porcentaje el estrato bajo. Sigue el vidrio: el 17% le corresponde al estrato bajo, el 20% al estrato medio y el 23% al estrato alto.

Un estudio realizado en Chihuahua en abril del 2006 muestra también porcentajes muy altos en los plásticos; éstos oscilan entre el 56% y el 64% [13], porcen-

tajes muy similares a los de la presente investigación. Sin embargo, el vidrio muestra porcentajes superiores que van de 24% a 31%. Se debe recalcar que en este estudio no se manejaron envases Tetra pak®, ni otros inorgánicos. Además, la metodología seguida fue diferente: se realizó un muestreo casa por casa y el tamaño de la muestra fue a través del número de casas necesaria de acuerdo a los estratos socioeconómicos. En cambio, en la investigación presente, la recolección fue directa del camión cuyas muestras fueron de 90 kg aproximadamente en cada estrato socioeconómico. Otra investigación, realizada en Missouri, indica al vidrio con un 22% [5]; dicho porcentaje es similar al este estudio, cuyos valores concuerdan con la cercanía a la frontera con Estados Unidos.

El porcentaje ascendente en el caso del vidrio y descendente en el caso del plástico, pueden deberse al poder adquisitivo de los consumidores. Las observaciones *in situ* mostraron que el vidrio desechado en los estratos altos, correspondía en su mayoría a en-

vases de bebidas alcohólicas nacionales e importadas. En el caso de los plásticos, correspondían en su mayoría a envases de refrescos.

El residuo que tiene un mayor porcentaje en los no reciclables es el sanitario. El estrato medio es el que reporta la cantidad más alta de los tres estratos con un 72%, comparado con el 57% del estrato bajo (ver Figura 4). Una investigación realizada por Ojeda et al. [8] muestra un 64.27% de dichos residuos; otro estudio llevado a cabo por Gidaracos et al. [11] indica un 69%. Estos porcentajes se encuentran dentro del rango de los residuos sanitarios reportados en esta investigación.

En la Tabla 3 se muestra la cantidad de residuos que se podrían recuperar en términos de toneladas semanales. Se resalta la recuperación de residuos alimenticios con 643.67 toneladas para composta, 389.45 toneladas de papel y cartón, 217.55 toneladas de plástico y 78.81 toneladas de vidrio. En total, se ob-

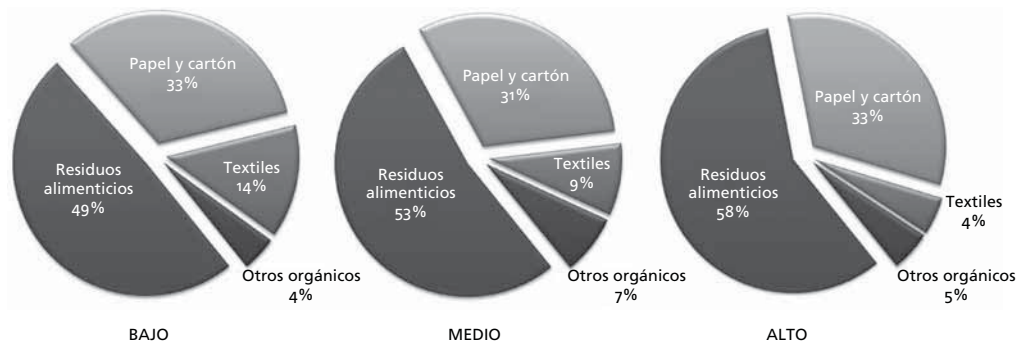


Figura 2. Porcentajes de residuos reciclables orgánicos en los tres estratos socioeconómicos

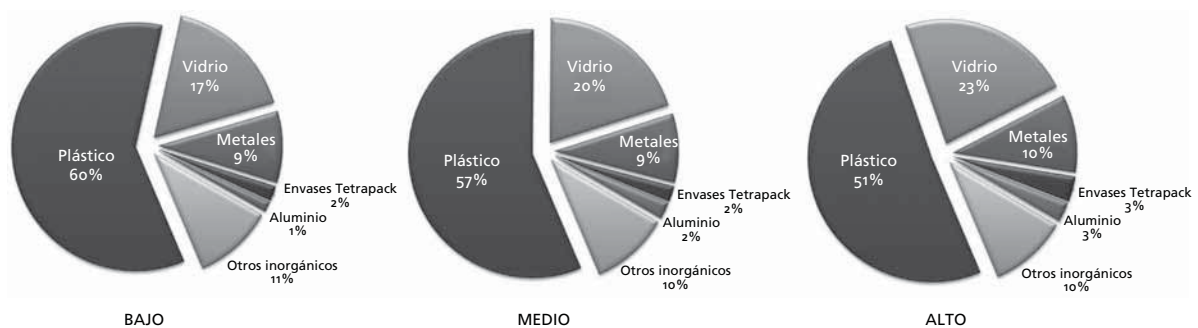


Figura 3. Porcentajes de residuos reciclables inorgánicos en los tres estratos socioeconómicos

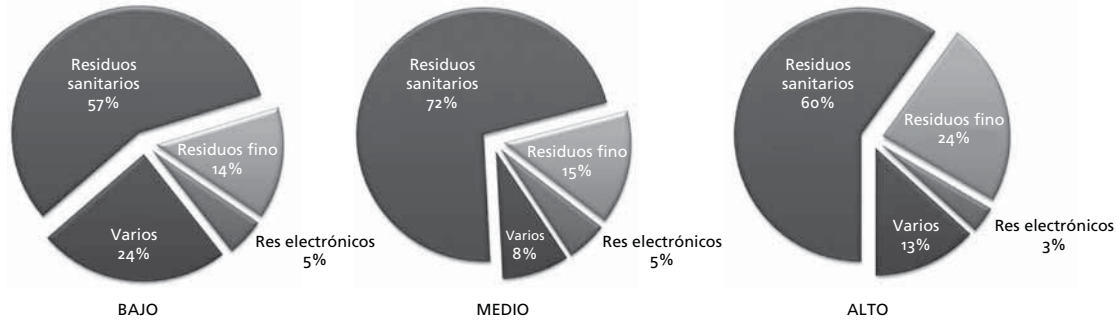


Figura 4. Porcentajes de residuos no reciclables en los tres estratos socioeconómicos

Tipo de residuo		Promedio (%)	Toneladas recuperables (ton/sem)	Precio de compra ^a (\$MXP/ton)	Valor en el mercado (\$MXP)
Reciclables orgánicos	Residuos alimenticios	36.51	643.67	N/A	
	Papel y cartón	22.09	389.45	600	233,668.02
	Textiles	6.20	109.31	N/A	
	Otros orgánicos	3.76	66.29	N/A	
Reciclable inorgánico	Plástico	12.34	217.55	2000	435,108.40
	Vidrio	4.47	78.81	400	31,522.44
	Metales	2.11	37.20	2400	89,278.32
	Envases Tetra pak®	0.55	9.70	N/A	
	Aluminio	0.46	8.11	15000	121,647.00
	Otros inorgánicos	2.30	40.54	N/A	
TOTAL		90.79	1,600.63		\$911,224.18

^aPrecios de compra promedio otorgado por los diferentes centros de acopio y recicladores de la región

Tabla 3. Potencial de recuperación de los residuos sólidos domésticos de Ensenada (Baja California, México)

tendría un beneficio económico aproximado de MXP \$911,224.18 (USD \$ 71,693.48) por la comercialización de los principales reciclables. Esto sin tomar en cuenta a los residuos alimenticios, los cuales son procesados por una empresa particular en la ciudad de Ensenada.

GENERACIÓN PER CÁPITA DE RSD

La generación per cápita de los RSD recolectados en las fechas de muestreo se estimó en 0.968 ± 0.208 kg/día-hab (ver Ecuaciones 3 y 4), donde gpc_m es la media y gpc_l son los límites de tolerancia. Estos cálculos se realizaron con base en la cantidad recolectada por el municipio de Ensenada (ver Figura 5).

$$gpc_m = \left[\frac{251857 \text{ kg/día}}{260075 \text{ hab}} \right] = 0.968 \frac{\text{kg}}{\text{día} \times \text{hab}} \quad (3)$$

$$gpc_l = \left[\frac{54183 \text{ kg/día}}{260075 \text{ hab}} \right] = 0.208 \frac{\text{kg}}{\text{día} \times \text{hab}} \quad (4)$$

Ahora bien, el error estándar muestral obtenido es de 20,443.88 kg/día (ver Ecuación 5), por lo que el error estándar muestral per cápita es de 0.079 kg/día-hab.

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{76494}{\sqrt{14}} = 20,443.88 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad (5)$$

La SEMARNAT [26] reportó que la generación per cápita diaria para el 2006 en zona fronteriza fue de 1.06 kg/día-hab; el dato encontrado en este estudio fue ligeramente menor a lo indicado en el estudio mencionado, en contraste con lo encontrado por Ojeda et al. [8] en Mexicali, con 0.592 kg/hab-día. Esto se puede deber a que el período de la muestra tomada fue en dos etapas: de mayo a junio 1999 y de marzo a abril 2000; con una diferencia de 9 a 10 años, período en el que ha habido un crecimiento poblacional y cambios en los patrones de consumo.

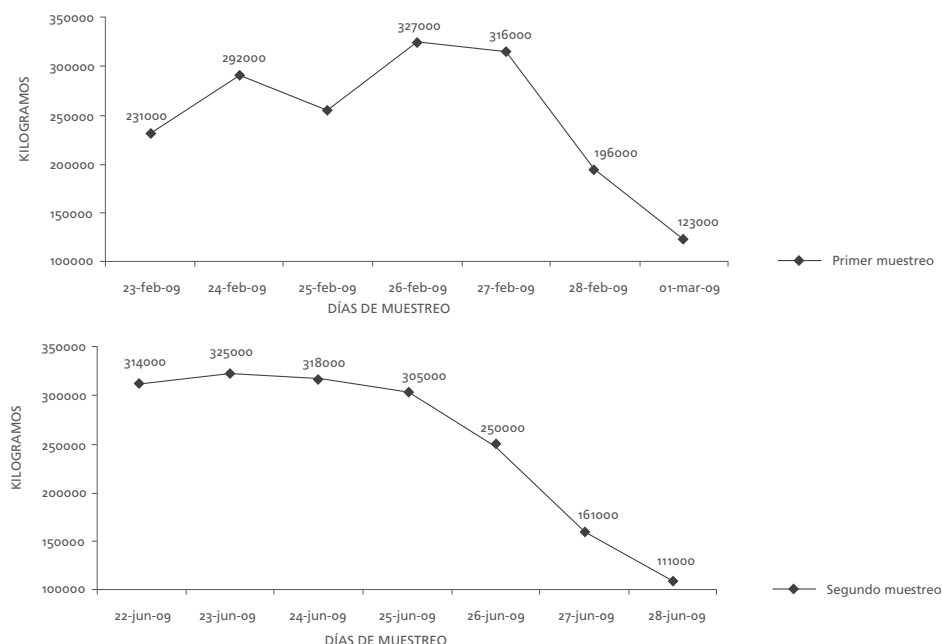


Figura 5. RSD recolectados por el Municipio en las fechas del muestreo

Comparando con otras ciudades del mundo, se puede apreciar que la generación per cápita diaria de Ensenada es muy similar a las descritas por Hristovski et al. [14] con 1.06 ± 0.56 kg en Veles, Macedonia (economías en desarrollo); Bernache-Pérez et al. [18], por su parte, señala países desarrollados tal como Japón con 1.22 kg y Alemania con 1.15 kg. A diferencia de otros países desarrollados como E.U. con 2.3 kg/hab-día [5] y Reino Unido con un 2.42 kg/hab-día [27], en los cuales se puede apreciar una marcada diferencia.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de composición de RS para cuantificar los componentes de los RSD depositados en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada (Baja California, México) y determinar su potencial de aprovechamiento. Los resultados indican que aproximadamente el 91% de los RSD tienen potencial de aprovechamiento. En promedio, se podrían emplear semanalmente 643.67 toneladas de residuos alimenticios para elaborar composta y reciclar 389.45 toneladas de papel y cartón, 217.55 toneladas de plástico y

78.81 toneladas de vidrio. Un estimado de la comercialización de los principales reciclables indica que se pudiera obtener un beneficio económico de MXP \$911,224.18 (USD \$ 71,693.48). Este valor no incluye los ingresos que pudieran generarse por el aprovechamiento de los residuos alimenticios.

En el presente estudio se puede apreciar que la composición de los residuos entre estratos presenta diferencias significativas en algunos componentes. Así, mientras el papel se desecha en los mismos porcentajes en los tres estratos, la diferencia porcentual en los textiles es sustancial. Por ello, es importante que los programas de educación ambiental y otras estrategias que se desarrollen para reducir la generación y elevar el aprovechamiento de tales componentes se realicen acorde a las condiciones de cada estrato.

Las diferencias en las clasificaciones de los componentes entre estudios hacen difícil una comparación *stricto sensu*. En el caso de los plásticos algunos investigadores los consideran como residuos orgánicos y en otras como residuos inorgánicos. Debido a que los plásticos se constituyen por polímeros orgánicos de alto peso molecular, la mayoría de la literatura lo

clasifico dentro de los residuos inorgánicos, esto considerando la degradabilidad de los componentes y no su origen. En otros casos, como en los envases escépticos (Tetra pak®), algunos investigadores no los consideraron dentro de su clasificación de componentes.

La generación de residuos sólidos domésticos per cápita en Ensenada es superior a lo reportado en otros estudios realizados en países en desarrollo. La cercanía con los Estados Unidos de América (USA) puede estar influyendo en el comportamiento de consumo de los habitantes. Otros factores como el clima, religión, tipo de muestreo realizado y la cantidad de residuos analizados entre otros, pudieran explicar esta diferencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **O. Buenrostro y G. Bocco.**
“Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 39, No. 3, 2003, pp. 251-263.
- [2] **I.A. Al-Khatib, H.A. Arafat, T. Basheer, H. Shawahneh, A. Salahat, J. Eid y W. Ali.**
“Trends and problems of solid waste management in developing countries: A case study in seven Palestinian districts”. *Waste Management*, Vol. 27, No. 12, 2007, pp. 1910-1919.
- [3] **G.M. Ayininuola y M.A. Muibi.**
“An engineering approach to solid waste collection system: Ibadan North as case study”. *Waste Management*, Vol. 28, No. 9, 2008, pp. 1681-1687.
- [4] **G. Tchobanoglous, H. Theisen, y S. Vigil.**
Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid, España: McGraw-Hill, 1994.
- [5] **Y. Zeng, K.M. Trauth, R.L. Peyton y S.K. Banerji.**
“Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri”. *Waste Management Research*, Vol. 23, No. 1, 2005, pp. 62-71.
- [6] **A.D. Emery, A.J. Griffiths y K.P. Williams.**
“An in depth study of the effects of socio-economic conditions on household waste recycling practices”. *Waste Management Research*, Vol. 21, No. 3, 2003, pp. 180-190.
- [7] **K. Karousakis y E. Birol.**
“Investigating household preferences for kerbside recycling services in London: A choice experiment approach”. *Journal of Environmental Management*, Vol. 88, No. 4, 2008, pp. 1099-1108.
- [8] **S. Ojeda-Benítez, C. Armijo-de Vega y M.E. Ramírez-Barreto.**
“Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 39, No. 3, 2003, pp. 211-222.
- [9] **S. Ojeda-Benítez, C. Armijo de Vega y M.E. Ramírez-Barreto.**
“The potential for recycling household waste: a case study from Mexicali, Mexico”. *Environment and Urbanization*, Vol. 12, No. 2, 2000, pp. 163-173.
- [10] **B.E.J. Jiménez Cisneros.**
La contaminación ambiental en México. México: Limusa, 2002.
- [11] **E. Gidarakos, G. Havas y P. Ntzamilis.**
“Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete”. *Waste Management*, Vol. 26, No. 6, 2006, pp. 668-679.
- [12] **Norma Mexicana NMX-AA-015-1985**, México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de Cuarteo.
- [13] **G. Gómez, M. Meneses, L. Ballinas, y F. Castells.**
“Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico”. *Waste Management*, Vol. 28, No. 12, 2008, pp. 2465-2471.

- [14] **K. Hristovski, L. Olson, N. Hild, D. Peterson, y S. Burge.**
“The municipal solid waste system and solid waste characterization at the municipality of Veles, Macedonia”. *Waste Management*, Vol. 27, No. 11, 2007, pp. 1680-1689.
- [15] *Norma Mexicana NMX-AA-061-1985*, México: Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Generación.
- [16] **J. Owens, S. Dickerson y D.L. Macintosh.**
“Demographic Covariates of Residential Recycling Efficiency”. *Environment and Behavior*, Vol. 32, No. 5, 2000, pp. 637-650.
- [17] **S.A. Batool y M.N. Chuadhry.**
“The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan”. *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, 2008, pp. 63-69.
- [18] **G. Bernache-Pérez, S. Sánchez-Colon, A.M. Garmendia, A. Davila-Villarreal y M.E. Sánchez-Salazar.**
“Solid waste characterization study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico”. *Waste Management Research*, Vol. 19, No. 5, 2001, pp. 413-424.
- [19] **SEMARNAT.**
Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. México: 2001.
- [20] **O. Buenrostro Delgado.**
Los residuos sólidos municipales: Perspectivas desde la investigación multidisciplinaria. México: Universitaria, 2001.
- [21] **C. Armijo de Vega, S. Ojeda Benítez y M.E. Ramírez Barreto.**
“Solid waste characterization and recycling potential for a university campus”. *Waste Management*, Vol. 28, Supplement 1, 2008, pp. S21-S26.
- [22] **S. Ojeda-Benítez, C. Armijo-de Vega y M.E. Ramírez-Barreto.**
“Formal and informal recovery of recyclables in Mexicali, Mexico: handling alternatives”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 34, No. 4, 2002, pp. 273-288.
- [23] **G. Wehenpohl y C. Ambrosius.**
Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos Experiencias de Nueve Años de Cooperación Técnica Alemana en México. México: 2006.
- [24] **S. Donnini Mancini, A. Rodrigues Nogueira, D. Aki-ra Kagohara, J.A. Saide Schwartzman, y T. de Mattos.**
“Recycling potential of urban solid waste destined for sanitary landfills: the case of Indaiatuba, SP, Brazil”. *Waste Management Research*, Vol. 25, No. 6, 2007, pp. 517-523.
- [25] **S. Chung y C. Poon.**
“Characterisation of municipal solid waste and its recyclable contents of Guangzhou”. *Waste Management Research*, Vol. 19, No. 6, 2001, pp. 473-485.
- [26] **SEMARNAT.**
“Compendio de Estadísticas Ambientales 2008”. México: 2008.
- [27] **K.N. Kumar y S. Goel.**
“Characterization of Municipal Solid Waste (MSW) and a proposed management plan for Kharagpur, West Bengal, India”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 3, 2009, pp. 166-174.