
ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON FINES ENERGÉTICOS



INFORME 1: MONTEVIDEO

Informe 1
Febrero 2013

LKS_{ur}

ÍNDICE

1	Introducción	3
2	Objetivo General	4
3	Nomenclatura.....	5
4	Objeto de este informe	6
5	Área de Estudio	7
5.1	Gestión de residuos en Montevideo.....	7
5.2	Sitio de Disposición Final (SDF)	7
6	Diseño del plan de muestreo	10
6.1	Condicionantes previos.....	10
6.2	Datos previos de caracterización de los RSU	10
6.3	Datos de las zonas de recogida.....	11
6.4	Datos poblacionales.....	13
6.5	Determinación de la cantidad mínima de muestras a analizar	13
6.6	Plan de muestreo	15
7	Trabajo desarrollado	17
7.1	Muestreo.....	17
7.2	Metodología de muestreo	17
7.3	Proceso de muestreo y clasificado de las fracciones.....	18
7.4	Determinaciones en Laboratorio	20
7.5	Procesamiento de los datos.....	21
7.6	Composición física de los RSU	24
7.7	Densidad Aparente (kg/m ³)	26
7.8	Contenido de Humedad.....	26
7.9	Poder Calorífico (kCal/kg)	27
7.10	Validación del número de muestras vehiculares.....	29
7.11	Validación del número de muestras de laboratorio.....	30
8	Discusión de los resultados	32
9	Conclusiones.....	37
10	Fuentes Consultadas	38

1 Introducción

Este Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se realiza como consecuencia de la aceptación de la oferta de LKSur presentada en concurso público en octubre de 2012, cuyo promotor es Alcoholes del Uruguay S.A. (ALUR), y dentro del acuerdo realizado por ALUR con la Dirección Nacional de Energía (DNE). Esta caracterización se realiza para los RSU de la ciudad de Montevideo y en las capitales departamentales de Salto, Paysandú, Tacuarembó, San José y Cerro Largo (Melo), y en el SDF de Canelones.

Durante el periodo comprendido entre Diciembre del 2012 y Marzo de 2013, se han realizado los trabajos en las primeras cuatro ciudades mencionadas en el párrafo anterior y se realizarán en las restantes, las diferentes tareas de muestreo siguiendo lo establecido en la Norma ASTM 5231-92 "Standard Test of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Wastes" y Norma IRAM 29523 "Determinación de la composición de RSU sin tratamiento previo".

Cabe destacar que a la fecha hemos contado con la inestimable colaboración en el estudio, de los técnicos de ALUR y DNE, así como del personal de las Intendencias y del MIDES, y de manera muy especial, de los clasificadores que trabajaron con nosotros. En cada sitio se ha seleccionado un equipo de clasificadores, los que luego de recibir las instrucciones correspondientes para la buena ejecución de las tareas, han participado bajo nuestra dirección, de todo el proceso de homogeneización, cuarteo y clasificación de las distintas fracciones que componen los RSU de las diferentes ciudades.

El equipo técnico que desarrolló este Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos está compuesto por:

Cargo del proyecto	Nombre
Jefe de Proyecto Local	Ing. MBA Nicolás Reherrmann
Asesor Internacional Experto en Residuos	Ing. Johann Schmal
Coordinadores Generales	Ing. H/S Gabriel dos Santos Ing. Carmen Fuentes Ing. MSc. Alejandra Benítez
Equipo de Apoyo	Arq. Iñigo Ezquerro Ay. Claudio Buzzi

A su vez para las tareas de clasificación manual se contó con equipos de clasificadores de entre 7 y 10 personas dependiendo del volumen a muestrear.

2 Objetivo General

Este estudio tiene como objeto obtener información sobre la composición de los RSU en las ciudades de Montevideo, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Melo, Canelones y San José, así como el poder calorífico y contenido en humedad de los RSD que llegan al sitio de disposición final de Felipe Cardoso, en Montevideo. El trabajo facilitará a la Administración decidir qué modelos son los más adecuados para la gestión de residuos, y además podrá servir como precedente para futuros estudios o proyectos.

Este trabajo se centra en la caracterización de los RSD que son destinados a eliminación, por lo que las tareas de muestreo se realizan en los lugares de deposición final o vertederos. El desarrollo del mismo se ha realizado en dos etapas:

ETAPA 1: Esta se desarrolla en diciembre 2012. En ella se realiza el estudio de caracterización de RSD con fines de valorización energética, en el SDF de Felipe Cardoso de Montevideo. En este caso, las operaciones realizadas fueron:

1.- Identificación de las cantidades reales de residuos en peso y en volumen que reciben a diario.

2.- Estimación de las diferentes fracciones que componen los RSD en porcentaje % en peso.

3.- Determinación en laboratorio de la Humedad y el Poder Calorífico, que permitan evaluar alternativas de valorización energética.

ETAPA 2: Entre enero a marzo 2013, se realizará el estudio de caracterización para obtener una línea de base de RSU, en varias ciudades del país:

- Sitio de Cañada Grande, departamento de Canelones,
- Sitio de Melo, departamento de Cerro Largo,
- Sitio de Paysandú, departamento de Paysandú,
- Sitio de Ciudad del Plata, departamento de San José,
- Sitio de Salto, departamento de Salto
- Sitio de Tacuarembó, departamento de Tacuarembó.

3 Nomenclatura

A continuación se definen los términos utilizados en el documento:

COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS (CDR): Combustible obtenido a través de una fracción segregada y triturada de los residuos sólidos urbanos que presentan un alto poder calorífico.

MUESTRA PRIMARIA: Es la carga vehicular o procedente del camión que realiza la recolección en el área seleccionada para su estudio.

MUESTRA SECUNDARIA: Es la muestra que después de sucesivos cuarteos y homogeneizaciones, queda como representativa del camión estudiado. Suele pesar entre 150 kg a 300 kg. Con ella se ha determinado la composición en peso de los RSU y la Densidad Aparente.

MUESTRA Terciaria: Es la muestra obtenida de sucesivos cuarteos y homogeneizaciones de la muestra secundaria. Suele pesar entre 90 kg y 150 kg. Esta muestra es la que se ha triturado y homogeneizado, y nos ha permitido tomar muestras de 2 kg para enviar a laboratorio.

MUESTRA REPRESENTATIVA (MR): Muestra obtenida que muestra la composición inalterada y fiel de los RSU a estudiar.

MUESTRA MODIFICADA (MM): Muestra resultante del reciclado de una masa de RSU. Es decir, muestra que contiene únicamente las fracciones no valorizables.

PODER CALORÍFICO (PC): es una característica intrínseca del material. Y se define como la cantidad de calor desprendida en la combustión completa por unidad de masa. Sus expresiones más comunes son Kcal/Kg.

PODER CALORIFICO INFERIOR (PCI): es la cantidad de calor por volumen de combustible cuando se considera el combustible en base húmeda, y por tanto la vaporización del agua formada en la combustión.

PODER CALORIFICO SUPERIOR (PCS): El poder calorífico superior es la cantidad de calor que desprende un combustible en base seca y sin considerar la cantidad de calor necesaria para vaporizar el agua que se forma durante la combustión.

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU): Residuos originados por una colectividad dentro de una actividad doméstica, comercial e institucional, así como de los procedentes de la limpieza del espacio público de los núcleos habitados.

RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS (RSD): Residuos sólidos generados por actividades propias realizadas en las viviendas o en cualquier establecimiento semejante a aquellas.

4 Objeto de este informe

Este informe refleja las tareas realizadas en la **ETAPA1** y los resultados del potencial de los RSD de la ciudad de Montevideo como Combustible Derivado de Residuos (CDR), para el diseño de alternativas de valorización energética.

Las operaciones de caracterización se han desarrollado durante el mes de diciembre de 2012 en el SDF de Felipe Cardoso de Montevideo tal y como se ha comentado anteriormente, según se detallan a continuación:

1.- Identificación de las cantidades reales de residuos en peso y en volumen que se reciben a diario en el SDF.

2.- Estimación de las diferentes fracciones que componen los RSD en peso y en porcentaje (%) en peso.

3.- Determinación en laboratorio de la Humedad y el Poder Calorífico Inferior, que permitan evaluar tecnologías de valorización energética. Para ello, se han tomado Muestras Representativas (MR) y Muestras Modificadas (MM) que se han llevado a estudiar al laboratorio.

Una vez realizados esta serie de trabajos, se ha procedido a la interpretación de los mismos para poder extraer las conclusiones que se exponen a lo largo de este informe.

5 Área de Estudio

5.1 Gestión de residuos en Montevideo

Este estudio se centra en los RSUDU, puesto que son los que resultan más convenientes y seguros, para analizar la posible implantación o no de alguna instalación de valorización energética, e incluso elegir la mejor tecnología disponible.

En la ciudad de Montevideo, la recolección de RSU se realiza a través de dos mecanismos que se solapan en la mayoría de las calles de la ciudad:

1. Mecanismo de recolección formal de RSU, realizado directamente por funcionarios públicos o tercerizado a una empresa privada (Círculo CAP) y a una ONG (Círculo Tacurú), ambas en un área fija y determinada. Este mecanismo tiene una alta cobertura de recolección de residuos.
2. Mecanismo de recolección informal de RSU, realizado por clasificadores, que en su mayoría trabaja de una manera autónoma. Ellos separan de los contenedores de RSU, en la vía pública, los materiales valorizables como el cartón, algunos plásticos y metales, y los comercializan individualmente. En 2005 se estimó que esta forma de recolección representaba el 40%¹ de los RSU generados.

Respecto a la recolección formal, en algunas zonas de la ciudad se implantó a partir del año 2006, un sistema de recogida por contenedores con camiones compactadores de carga lateral, pero persisten muchos lugares donde se mantiene la recolección manual de bolsas de basura.

La recogida de residuos en Montevideo, se realiza durante los siete días de la semana con servicio de tres turnos, el matutino, el vespertino, y el nocturno.

Existe recogida selectiva, aunque no completamente desarrollada, de algunos residuos específicos como los residuos industriales asimilables a urbanos, comerciales, los originados del barrido y limpieza de calles y ferias, los residuos de jardinería y los residuos de la construcción. Estos se trasladan al sitio generalmente de forma separada a los Residuos Domiciliarios (RSD); los residuos de áreas verdes y de ferias que recoge la municipalidad se llevan a una planta de compostaje que gestiona la propia intendencia.

5.2 Sitio de Disposición Final (SDF)

Montevideo cuenta con único Sitio de Disposición Final (SDF), Felipe Cardoso que admite RSU tanto de la ciudad de Montevideo, como de su área metropolitana. Este estudio de caracterización y extracción de muestras para obtener el PCI, se realizó en dicho sitio que se encuentra en Camino Felipe Cardoso 3220, Montevideo.

Se han analizado los datos de la balanza del SDF de Felipe Cardoso, facilitados por la Intendencia de Montevideo, obteniendo información de las cantidades de los diferentes residuos que se eliminan en el sitio. Los datos

¹ FICHTNER-LKSUR Asociados. "Plan Director de Residuos Sólidos", Noviembre 2005. Tomo I, Pág. 14.

comprenden el periodo entre el 2 de enero de 2011 y el 13 de febrero de 2013.

De acuerdo con los datos aportados por la Intendencia, el sitio ha recibido durante el año 2011 1310 T/d promedio de residuos asimilables a domiciliario (RSD) y en el último año (2012), 1320 Ton/d.

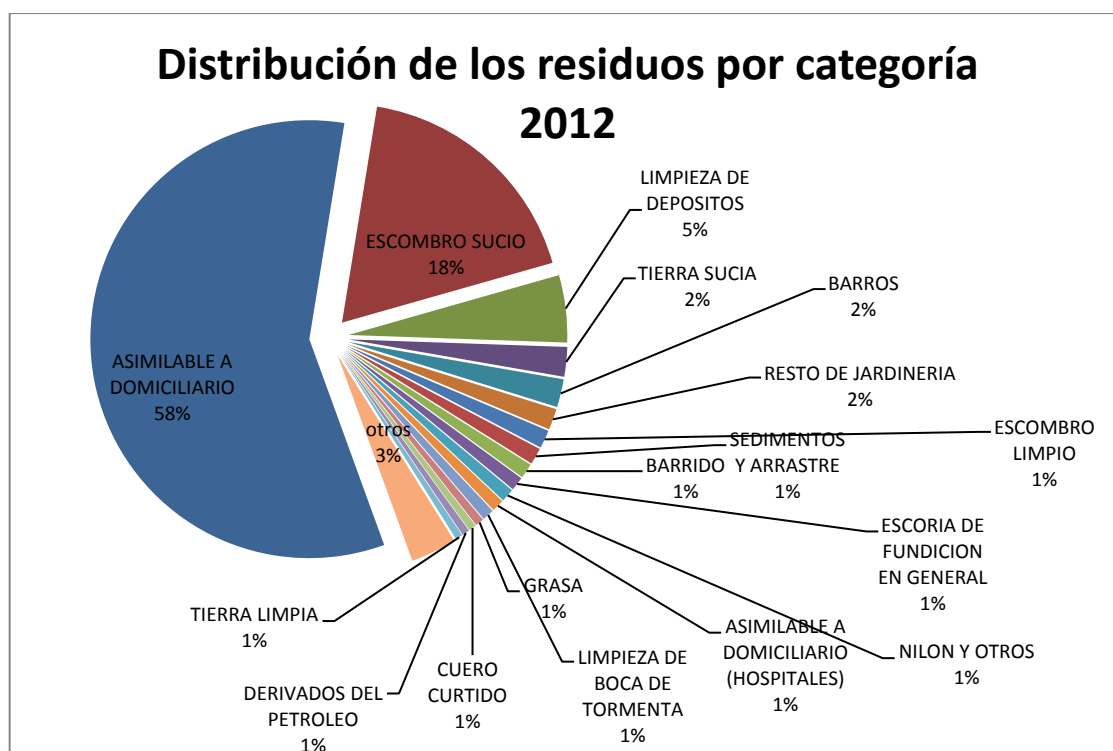
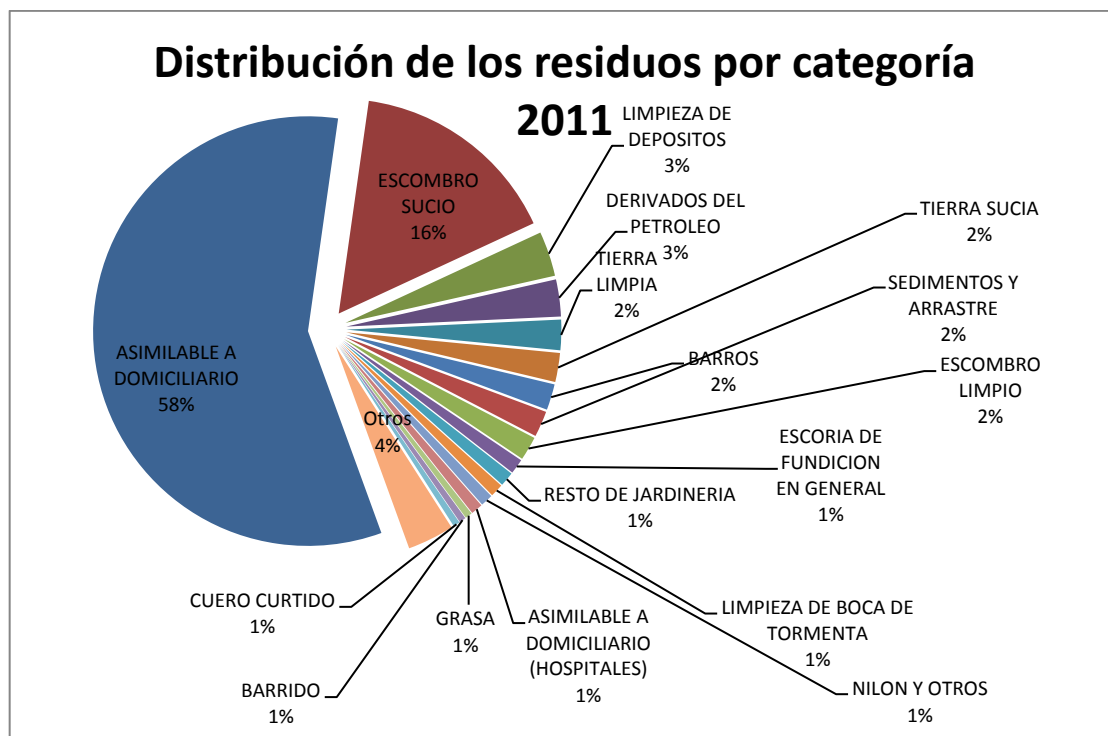
Si consideramos todos los residuos que se depositan en el mismo periodo, el peso ingresado al sitio en 2011 ascendió a 2.220 Ton/día y 2.230 Ton/d en 2012. Estos residuos provenientes de las diferentes actividades que se desarrollan en la ciudad y su periferia, como Residuos Sólidos Urbanos, Residuos Sólidos Industriales, Residuos de la construcción y demolición y Residuos comerciales, como se muestra en los gráficos siguientes.

Ilustración 5-1. Ubicación del SDF de Felipe Cardoso.



Con los datos de la balanza del SDF de Felipe Cardoso, facilitados por la Intendencia de Montevideo referentes a los materiales enviados a sitio, se ha podido analizar la tipología general de los mismos tal y como se muestra en el siguiente gráfico.

Ilustración 5-2. Distribución de los residuos eliminados en el SDF por categoría.



Es de señalar que el porcentaje de residuos asimilables a domiciliarios se mantiene de un año a otro, resultando en 1 kg de RSD por habitante por día. Este valor resulta comparable con los valores de la región pero por debajo de lo estimado por el Plan Director, presumiblemente debido el total de la generación no es canalizado hacia el sitio. Cabe señalar así mismo que en ambos años se evidencia un alto porcentaje de escombros sucios entrando al Sitio.

6 Diseño del plan de muestreo

Dada la heterogeneidad de los Residuos Domiciliarios (RSD), principal componente de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), la calidad de los residuos obtenidos va a depender fundamentalmente de la fiabilidad de las muestras tomadas. Es por ello, que resulta importante la correcta selección de los itinerarios a muestrear y su representatividad en el conjunto de los residuos generados en la ciudad, donde debería tenerse en cuenta también las variaciones estacionales.

Las muestras tomadas deben tratarse de forma cuidada atendiendo a una normativa establecida para poder llegar a efectuar estudios comparativos. En este caso, los procedimientos seguidos se basan en la Norma ASTM 5231-92 "Standard Test of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Wastes" y Norma IRAM 29523 "Determinación de la composición de RSU sin tratamiento previo".

Previo al inicio de las tareas de estudio propias de este proyecto, es imprescindible la planificación de las mismas para poder comenzar a operar de manera fiable. Así, es fundamental diseñar un plan de muestreo que indique cuántas muestras se debían tomar en el SDF y cuál era su procedencia, para que los resultados finales de composición de los residuos fueran representativos del conjunto de la ciudad de Montevideo.

Este plan de muestreo se apoya sobre los datos existentes de caracterizaciones de residuos previas realizadas en Montevideo, los datos del censo poblacional de la ciudad, la distribución de los recorridos de recogida de RSU, las diferentes zonas de niveles socioeconómicos y sobre el cálculo de las muestras mínimas necesarias que aseguren la representatividad.

Además, el plan debía ajustarse a los tiempos y condicionantes del propio proyecto.

6.1 Condicionantes previos

La primera consideración a tener en cuenta, es la existencia de limitación en la duración del proyecto de muestreo. Llevándose a cabo en solo un proceso de muestreo que duró 10 días, comprendiendo dos semanas consecutivas.

En cuanto a la época de muestreo, hubiese sido más representativa la caracterización obtenida con campañas de muestreo en las diferentes estaciones del año. Dado que se disponen de datos históricos de cantidades de RSU depositados en el SDF a lo largo de todo el año y de diferentes estudios realizados, se podrán extrapolar los datos si fuese necesario, para obtener resultados con un mayor grado de confianza.

6.2 Datos previos de caracterización de los RSU

La pre-caracterización de los RSU se ha realizado recopilando y consultando los antecedentes bibliográficos existentes disponibles. Estos fueron:

- 1.- Primer Estudio de caracterización y cuantificación de los RSU en la ciudad de Montevideo (IMM, 1996).

2.- Plan Director de RSU de Montevideo y Área Metropolitana (Fichtner-LKSur, 2005).

3.- Estudio de Prefactibilidad Técnica y Económica para la Instalación de Capacidad de Generación de energía a partir de residuos (WTE) en Uruguay (N.J.Themelís, M.E. Díaz Barriga, 2012).

4.- Información base para el diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos (CSI Ingenieros, 2011).

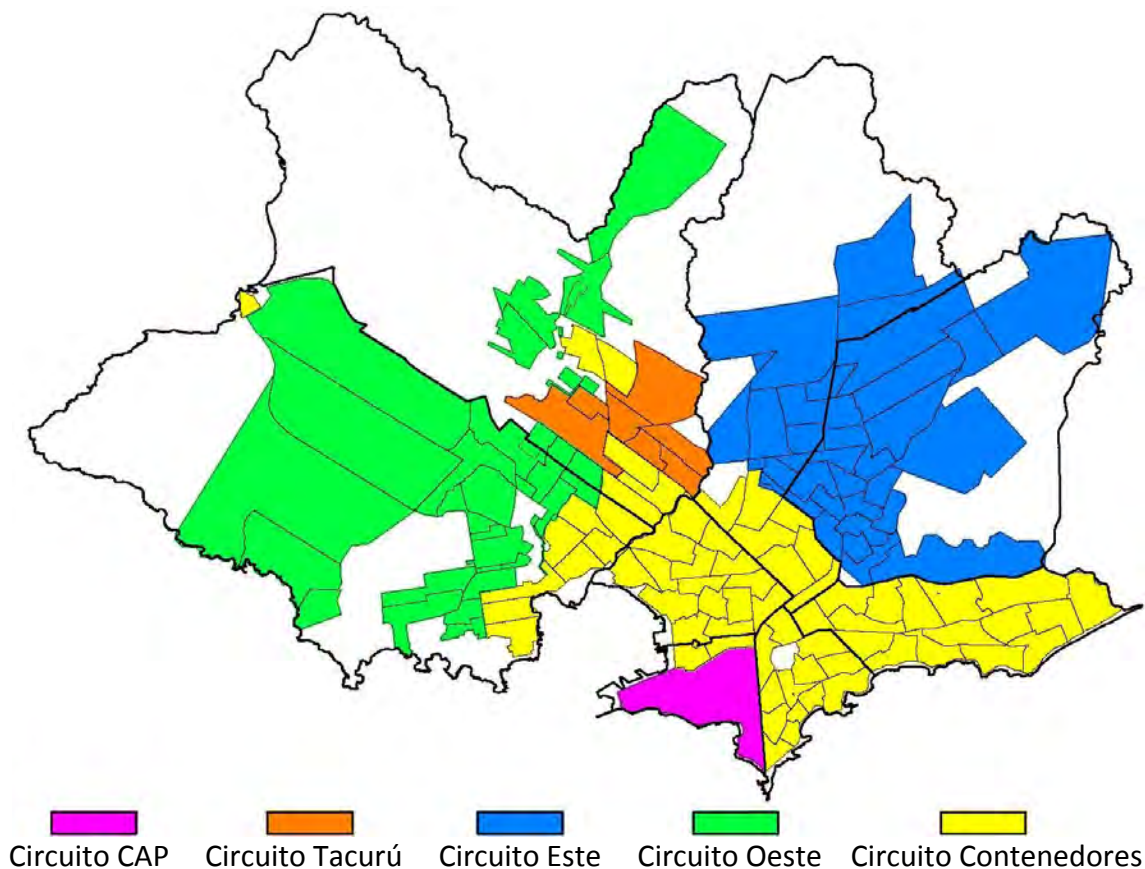
Toda esta información, ha permitido el diseño de la técnica más adecuada de muestreo, así como a reforzar las conclusiones del presente informe.

6.3 Datos de las zonas de recogida

Para diseñar el plan de muestreo, se ha analizado la información bibliográfica disponible y la documentación facilitada por la Intendencia de Montevideo sobre el sistema de recogida de contenedores de RSU en la ciudad. Además, se ha tenido en cuenta el estudio sobre el Índice de Nivel Socioeconómico (INSE) realizado por el CEISMU en el año 2012, que zonifica la ciudad según los distintos niveles socioeconómicos.

Intendencia divide la ciudad de Montevideo en cinco zonas de recogida, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Ilustración 6-1. Mapa de recorridos de recogida de RSU en Montevideo.



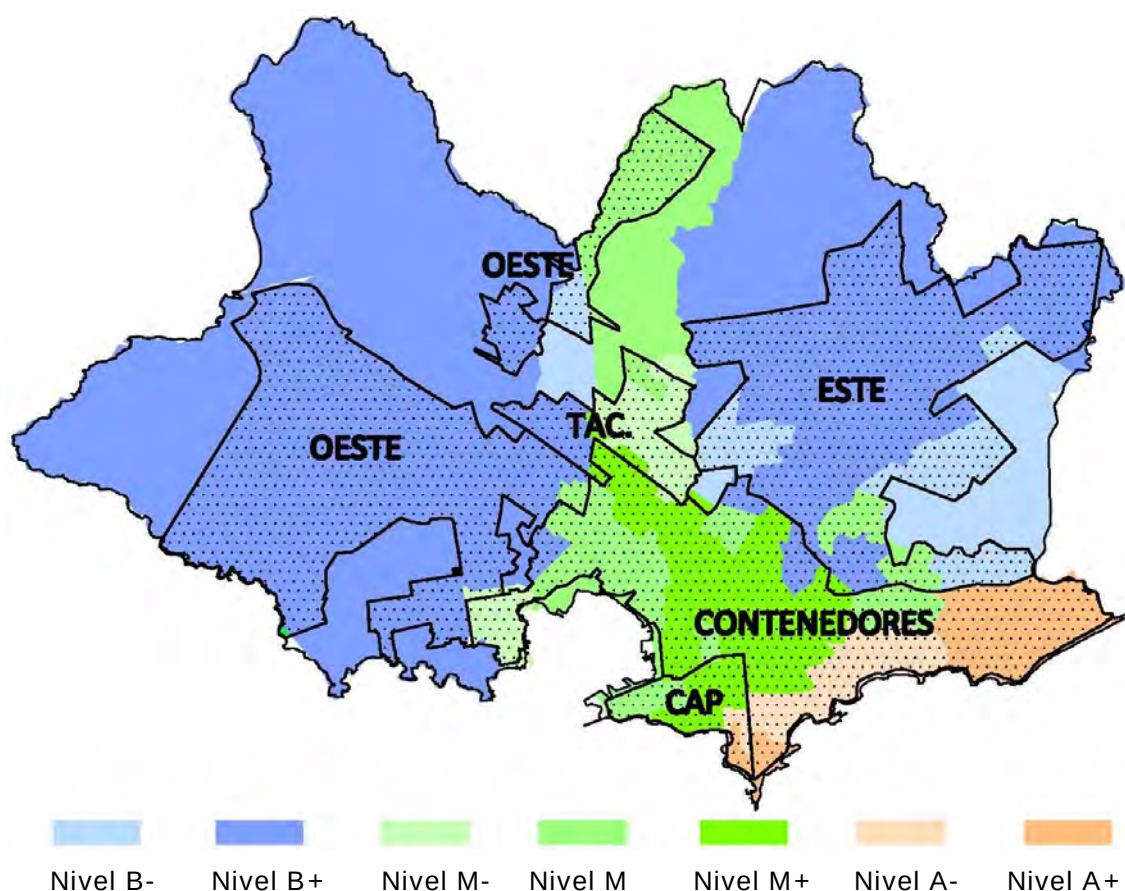
Por otra parte, la Cámara de Empresas de Investigación Social y de Mercado del Uruguay (CEISMU) estableció siete zonas correspondientes a los siete estratos socioeconómicos: Hogares de Nivel Bajo Inferior (B-), Hogares de Nivel Bajo Superior (B+), Hogares de nivel Medio Inferior (M-), Hogares de Nivel Medio (M), Hogares de Nivel Medio Superior (M+), Hogares de Nivel Alto Inferior (A-), y Hogares (A+)².

Si solapamos gráficamente estas zonas, como se muestra en el plano siguiente, se pone de manifiesto que los circuitos presentan las siguientes particularidades:

- el CIRCUITO ESTE y CIRCUITO OESTE se corresponden con un nivel Bajo;
- el CIRCUITO TACURÚ, con uno Bajo-superior y Medio-inferior;
- el CIRCUITO CAP y CIRCUITO CONTENEDORES, con unos niveles Medio-alto y Altos.

De esta manera, la composición de los residuos obtenida de los diferentes recorridos muestreados, reflejará asimismo, el tipo de residuos generado por los diferentes estratos socioeconómicos.

Ilustración 6-2. Superposición de los recorridos de recogida de residuos sobre los estratos socioeconómicos.



² CEISMU. "Índice de Nivel Socioeconómico (INSE)", 2012. Pág. 50-51.

6.4 Datos poblacionales

Para determinar el peso específico de cada recorrido dentro del conjunto, es necesario conocer cuál es la población correspondiente a cada uno de ellos. Según los datos del último censo realizado en el año 2011 por INE, cada zona cuenta con los siguientes habitantes:

Tabla 6-1. Población estimada por cada zona de recogida de RSU en Montevideo.

ZONAS	Población	%
Zona Este	250.522	18,99%
Zona Oeste	144.169	10,93%
Zona Contenedores	620.877	47,07%
Zona CAP	231.171	17,52%
Zona Tacurú	72.369	5,49%
Total	1.319.108	100 %

6.5 Determinación de la cantidad mínima de muestras a analizar

Uno de los factores más determinantes a la hora de diseñar correctamente un plan de muestro es, sin duda, conocer el número mínimo de muestras que se deben realizar para saber de manera fiable cuál es la composición física promedio de los residuos sólidos urbanos del lugar. La determinación del número de muestras a tomar no es aleatoria, sino que su valor oscila entre un mínimo obtenido a partir de estudios estadísticos previos, y un máximo definido por los propios condicionantes del estudio y del lugar a muestrear.

Para que éste cumpla con unos mínimos de representatividad, es fundamental utilizar una metodología de cálculo normalizada sobradamente aceptada, así como trabajar con un alto grado de confianza y un margen de error lo más limitado posible a la hora de manejar los datos previos.

En este sentido, una de las normas más recurrentes para la determinación de número de muestras, es la propuesta por la ASTM Standard en su "Standard Test Method for Determination on the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. D5231-92". Esta normativa supone los datos distribuidos según una Distribución t-Student:

$$n = \left[\frac{t * s}{e * \bar{x}} \right]^2$$

Siendo:

n = número de muestras, en este caso el número de camiones.

e = nivel de precisión deseado o error de muestreo admitido.

S = desviación estándar correspondiente al componente estudiado.

t = Valor estadístico referente al nivel de confianza planteado para el muestreo.

X = Valor medio porcentual del componente respecto al total.

El nivel de precisión o error de muestreo admitido más utilizado, y por el que

finalmente se ha optado, es del 20%, por lo que $e = 0,2$.

Los valores de t , se obtienen de la tabla 4 de la norma ASTM mencionada, también denominada "tabla de la t de Student". Éstos se consiguen a partir del número de muestras y del grado de confianza seleccionado, en este caso del 90%.

Tanto la media (X) como la desviación típica (S), son términos que se obtienen de datos bibliográficos referentes a estudios de caracterización de residuos realizados con anterioridad.

Inicialmente, los datos de caracterizaciones previas con los que se trabajó fueron los del Estudio Básico del Plan Director de Residuos Urbanos (PDRS) de Montevideo y Área Metropolitana del año 2004, en el que se mostraban los resultados de muestreos realizados en diferentes barrios³. Tal y como se expone en el citado PDRS, los porcentajes de las diferentes fracciones que componen los RSU son muy similares en todos los muestreos, por lo que las desviaciones son muy reducidas⁴. Así, el número mínimo de muestras que resultaba del cálculo tomando estos datos, era irrazonablemente pequeño, por lo que finalmente, se decidió trabajar con datos históricos publicados en el mismo PDRS.

Considerando la materia orgánica, el plástico, y el papel y cartón como los materiales más representativos dentro de la muestra de residuos, se obtienen los datos de la siguiente tabla.

Tabla 6-2. Datos de muestreos previos realizados en Montevideo.

Material	Bco. Mundial 1986 ⁵	Fac. Ing. 1994 ⁵	IMM 1995 ⁵	IMM 1996 ⁵	Fichtner 2003 ⁵	PDRS TI 2003 ⁵	PDRS TII 2005 ⁵	Div. Limp 6	X Media	S Desviación
Mat. Orgánico	49,3	42,9	56	64	58,3	55,4	47,9	62,4	54,53	6,86
Papel	8,4	27,6	8	7,7	10,5	13,2	9	10	11,80	5,85
Plástico	10,8	18,4	13	10,9	13,8	12,6	13,9	11	13,05	2,35

El cálculo de número mínimo de muestras se inicia tomando una t correspondiente a $n = \infty$ para un nivel de confianza del 90%. Aplicando la fórmula expuesta en la norma ASTM se obtiene un primer número de muestras. Es necesario repetir esta operación tantas veces como sean necesarias hasta que los dos últimos valores de n difieran en menos del 10% o se llegue a una situación en la que éstos se repitan de manera cíclica. Una vez acabado el tanteo, se tomará el mayor número de muestras entre los dos últimos valores.

En ocasiones, cuando la primera aproximación de cálculo nos indica una $n \leq 1$, se ha seguido el procedimiento tomando una t correspondiente a $n=1$, para

³ FICHTNER-LKSUR Asociados. "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Estudios Básicos. Anexo Residuos Sólidos Urbanos". Noviembre 2004. Pág. 92.

⁴ IDEM. Pág. 94.

⁵ IDEM. Pág 97.

⁶ Datos de División de Limpieza, según "Diagnóstico rápido: basuras y deshechos de la ciudad de Montevideo-Uruguay" (CIEDUR), 2010.

obtener finalmente una $n \leq 1$ de nuevo. Estos cálculos se han desestimado considerando que no son representativos.

Tabla 6-3. Número mínimo de camiones a partir de los datos previos.

Nº muestras Mat. Orgánica	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,0686	0,2	0,5453	1
2º tanteo	6,3137	0,0686	0,2	0,5453	16
3º tanteo	1,7459	0,0686	0,2	0,5453	1

Nº muestras Papel	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,0585	0,2	0,1180	17
2º tanteo	1,7396	0,0585	0,2	0,1180	19
3º tanteo	1,7291	0,0585	0,2	0,1180	18
4º tanteo	1,7341	0,0585	0,2	0,1180	18

Nº muestras Plástico	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,0235	0,2	0,1305	2
2º tanteo	2,92	0,0235	0,2	0,1305	7
3º tanteo	1,8946	0,0235	0,2	0,1305	3
4º tanteo	2,3534	0,0235	0,2	0,1305	4
5º tanteo	2,1318	0,0235	0,2	0,1305	4

Tras el análisis realizado a partir de la metodología ya expuesta, se llega a la conclusión que, en principio, el número mínimo de muestras a tomar son **18 camiones**, el que se desprende de la iteración para el caso del Papel. En el caso de la materia orgánica el método t de Student no converge con los parámetros establecidos. Sin embargo, si establecemos una precisión (e) del 6%, resultan necesarios 14 camiones para la materia orgánica, pero en ese caso, en las fracciones de papel y plástico serían necesarias 185 muestras y 25 muestras vehiculares respectivamente.

6.6 Plan de muestreo

El método de muestreo adoptado es el aleatorio doblemente estratificado según la población existente en cada una de las zonas de recogida de RSU y su nivel socioeconómico. Establecido esto, la elección de los camiones de cada una de las zonas será aleatoria.

Tras la obtención de todos los datos previos, se procede a diseñar el plan de muestreo tomando como referencia el número de muestras mínimas necesarias calculado anteriormente (18 camiones).

Tabla 6-4. Distribución de los camiones según la población de cada recorrido.

ZONAS	Población	%	n s/población	estrato socioeconómico	n/ estrato	Muestras
Zona Este	250.522	18,99%	3	Bajo	3	FC3, FC4, FC6
Zona Oeste	144.169	10,93%	2	Bajo	2	FC5, FC10
Zona Contenedores	620.877	47,07%	9	Alto	6	FC12, FC14, FC16, FC17, FC18, FC19
				Medio	3	FC2, FC9, FC15
Zona Cap	231.171	17,52%	3	Medio	2	FC1, FC8
				Alto	1	FC7
Zona Tacuru	72.369	5,49%	1	Bajo Sup./ Medio Inf.	1	FC11
Total	1.319.108	100%	18		18	

7 Trabajo desarrollado

7.1 Muestreo

En el SDF de Felipe Cardoso de Montevideo se vierten tanto residuos domiciliarios, como residuos industriales y comerciales. Hay que comentar que una parte de los residuos de la construcción y demolición también se consideran RSU. No obstante, su cauce de eliminación a SDF no suele ser a través de los camiones contenedores de recogida municipal. Es por ello, que al tratarse de la caracterización de los RSD (no tanto de los RSU) con vistas a su valorización energética, esta circunstancia nos es favorable, y por tanto, no debemos de hacer ningún estudio adicional de este tipo de residuos. Todas las muestras estudiadas pertenecían a residuos domiciliarios de origen residencial, aunque se detectaron residuos procedentes de comercios.

La campaña de muestreo se ha realizado en diciembre previamente a las fiestas de Navidad y periodo vacacional por verano. Esta circunstancia ha evitado el efecto de la reducción de la población que se desplaza a otras zonas por la temporada veraniega. También se ha evitado que el aumento de otro tipo de residuos característicos de esta época, como embalajes, provoquen una desviación de los resultados respecto a la media real anual.

Se consideró como universo de muestreo al conjunto de rutas de recolección en que se encuentra dividida la ciudad de Montevideo. Se consideró que la unidad muestral primaria, es el camión recolector, el cual tiene asignada una ruta fija de recolección. La selección del camión recolector fue totalmente aleatoria dentro de una zona de recolección elegida.

7.2 Metodología de muestreo

Como se ha comentado anteriormente, para la caracterización de estos RSU, se ha aplicado la Norma ASTM D 5231-92 (American Society for Testing and Materials). Esta Norma establece los procedimientos que nos permitirán determinar la composición media de los RSU, en base a un número representativo de muestras aleatorias. También se ha tenido en cuenta la Norma IRAM 29523 para la determinación de la composición de RSU sin tratamiento previo.

El trabajo desarrollado ha consistido en:

1.- Muestreo de las cargas vehiculares aleatorias de RSU de entrada a sitio, procediendo a su homogeneización y cuarteo para obtener, de forma manual y mecánica muestras suficientemente representativas.

2.- Estimación de la Densidad Aparente de las muestras.

3.- Clasificación manual de muestras para estimar el porcentaje en peso de las diferentes fracciones que se han considerado: papel y cartón, pañales y apósitos, multilaminados (tetrabrik), metales, plásticos film, plásticos botellas y plásticos otros, vidrio, textiles, desechos alimenticios, cuero y corcho, madera y jardinería, escombros, materiales compuestos (electrónicos, juguetes, etc), y residuos peligrosos.

4.- Obtención de las muestras de laboratorio a partir de la trituración y homogeneización de las muestras terciarias. A partir de estas Muestras

Representativas (MR) y las Muestras Modificadas (MM), se determina su Humedad (H) y su Poder Calorífico Inferior (PCI) en laboratorio.

En este caso, la parte contratante fijó el número de muestras a llevar al laboratorio en 21 MR (Muestras Representativas) y 8 MM (Muestras Modificadas).

7.3 Proceso de muestreo y clasificado de las fracciones

La elección de los vehículos en una zona de recogida fue totalmente aleatoria. Únicamente se consideraron los camiones recolectores de residuos domiciliarios procedentes de zonas residenciales y residenciales-comerciales. Desechando aquellas unidades procedentes de recogida selectiva de residuos como podían ser escombros, papel y cartón de comercios, podas, muebles o enseres, residuos procedentes de la limpieza viaria, etc.

Todo vehículo a ser tenido en cuenta en la muestra, fue primeramente interrogado de manera tal de determinar el tipo de residuo recolectado, la fuente o lugar de origen de dicho residuo, y cualquier ítem inusual dentro de la carga. Aquellos donde se observaban mezclas de residuos comerciales, específicos o cuyo lugar de recolección ya se había muestreado con anterioridad, fueron desechados.



Ilustración 7-1. Interrogando al chófer del camión.

Una vez admitido como válido ese camión, se procedía a su descarga sobre una lona de plástico dispuesta en el terreno para aislar la muestra primaria de posibles contaminaciones procedentes del suelo.



Ilustración 7-2. Descarga del camión sobre la lona.

Se realiza la mezcla u homogeneización de los residuos descargados con medios mecánicos (una máquina combinada) y apoyo manual (7 operarios), y se cuartea de forma sucesiva, hasta obtener una muestra de alrededor 300 kg, la cual se divide en dos muestras de 150 - 100 kg cada una (muestra1 y muestra2). Durante todo este proceso, se van retirando aquellos fragmentos grandes cuyo tamaño sea mayor o igual a 50 cm o 25 litros. Y además, las bolsas cerradas se irán rompiendo manualmente.

La **muestra1** se depositará encima de la mesa de clasificación para determinar los porcentajes en peso (%) de las diferentes fracciones de las que se compone. El proceso de clasificación en las diferentes fracciones, se realizó con una cuadrilla de 7 personas, 1 persona de apoyo logístico y el coordinador de campo. Las muestras fueron separadas en 16 categorías.

Una vez finalizada la clasificación y pesado de las diferentes fracciones, se obtiene una muestra modificada (Felipe Cardoso Modificada, FC-M) volviendo a mezclar las fracciones combustibles no reciclables (pañales y apósitos, desechos alimenticios, restos jardinería, textiles, goma y finos). Esta muestra de entre 30 y 80 kg se preservó en una bolsa hermética, y junto con todas las obtenidas de cada una de las cargas vehiculares muestreadas, se sometieron a trituración y homogeneización. Posteriormente, fueron mezcladas manteniendo la representatividad del circuito o zona a la que pertenecen, y de este modo se obtuvieron las 8 Muestras Modificadas (MM) de 2 kg enviadas al laboratorio, para determinar su humedad y PCI.



Ilustración 7-3. Clasificación de las diferentes fracciones.

Con la **muestra2** se estima el Peso Volumétrico o Densidad (kg/m^3), y obtenemos las muestras real (Felipe Cardoso Real, FC-R), que trituradas y homogenizadas conforman las Muestras Representativas (MR) que también fueron enviadas al laboratorio para determinar su humedad y PCI.

Para la determinación de la Densidad, los residuos son colocados y pesados en una tarrina, previamente tarada de 130 litros, que es zarandeada tres veces (para cubrir los espacios vacíos) y se vuelve a enrasar con residuos.

Para obtener las Muestras Representativas (MR), se somete a las muestras FC-R de peso entre 30 y 80 kg, a una trituración fina. Posteriormente, se obtiene una mezcla de todas ellas manteniendo la representatividad del circuito o zona al que pertenecen. De esta mezcla se embolsan las 21 Muestras Representativas (MR) de 2 kg que son enviadas al Laboratorio Recycomb de Argentina.

7.4 Determinaciones en Laboratorio

En el Laboratorio de Recycomb de Argentina se llevaron a cabo las determinaciones de Humedad y PCI de la totalidad de las muestras enviadas. Previo a las determinaciones se acondicionaron las mismas para las determinaciones a realizar. Para ello se tomó una fracción representativa de la misma y se trituró hasta 0.25 cm.

Para determinar el % de Humedad se utilizó la técnica "perdida por desecación" en estufa a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta llegar a peso constante. La determinación de Poder Calorífico se llevó a cabo de acuerdo con la técnica ASTM D 240 "Heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter" adaptada por el laboratorio para combustibles sólidos.

7.5 Procesamiento de los datos

Los datos obtenidos se van anotando en unas planillas de campo, que luego fueron introducidos digitalmente para su análisis. Las fracciones separadas fueron:

Tabla 7-1. Descripción de la selección.

COMPONENTES	
Papel y Cartón	Papeles oficina, Cartones, Revistas, Periódicos, envases, bolsas papel
	Pañales descartables y apósitos
Multilaminados (Tetrabrik)	Envases multicapas de diferentes materiales
Metales	Ferrosos y no ferrosos
Plásticos	Film: bolsas, envoltorios, etc
	Botellas: agua, zumos, refrescos
	Otros
Vidrio	Vidrios transparentes y de colores
Textiles	
Desechos Alimenticios	Restos de comida
Goma, Cuero, Corcho	
Madera y jardinería	Restos de jardinería y poda, aglomerados, restos de madera
Escombros	Residuos de la construcción y demolición
Materiales Compuestos	Productos compuestos por varios materiales. Ej: juguetes, electrónicos, cables, etc.
Residuos Peligrosos	Botes de pintura, filtros de automoción, pilas, etc
Inertes Pétreos	Tierras y suelo

Para completar el cálculo de los porcentajes en peso de las diferentes fracciones que componen los RSU, se realizó una corrección de la fracción fina (tamaños inferiores a 20 mm) que atravesó la malla de la mesa de clasificación.

7.5.1 Corrección por finos

Una vez definida la composición de los residuos sólidos domiciliarios de Montevideo, se procedió a corregir las fracciones finas para repartirlas en las diferentes fracciones en las que se ha considerado clasificar los RSD.

La metodología adoptada en este caso fue asumir que los residuos que pasaron a través de la malla presentan la misma composición porcentual en peso que los residuos de mayor tamaño que fueron segregados. Sin embargo, se hicieron algunas hipótesis básicas tales como no considerar dentro del material fino los residuos correspondientes a algunas fracciones que por su tamaño no pudieron atravesar la malla (p.ej. pañales, botellas de plástico, etc.).

Tabla 7-2. Corrección por finos.

Concepto	FC1			FC2			FC3		
Total finos	23%			14%			18%		
Papel y cartón	16,7%	31,2%	7,1%	25,07%	49,8%	7,1%	8,2%	13,3%	2,4%
Metales	1,7%	3,1%	0,7%	0,27%	0,5%	0,1%	3,8%	6,2%	1,1%
Vidrios	8,3%	15,5%	3,5%	7,63%	15,2%	2,2%	7,8%	12,7%	2,3%
Materia orgánica	16,8%	31,4%	7,1%	7,36%	14,6%	2,1%	31,9%	51,6%	9,3%
Inertes pétreos	10,0%	18,7%	4,2%	10,00%	19,9%	2,8%	10,0%	16,2%	2,9%
Total	53,6%	100%		50,33%	100%		61,8%	100%	

Concepto	FC4			FC5			FC6		
Total finos	10%			12%			9%		
Papel y cartón	14,9%	19,6%	1,98%	16,62%	22,10%	2,59%	6,67%	11,60%	1,08%
Metales	2,1%	2,8%	0,28%	9,98%	13,27%	1,56%	0,86%	1,49%	0,14%
Vidrios	7,0%	9,3%	0,94%	6,12%	8,14%	0,96%	1,50%	2,61%	0,24%
Materia orgánica	42,1%	55,3%	5,59%	32,47%	43,18%	5,07%	38,48%	66,91%	6,21%
Inertes pétreos	10,0%	13,1%	1,33%	10,00%	13,30%	1,56%	10,00%	17,39%	1,61%
Total	76,1%	100%		75,18%	100,00%		57,51%	100,00%	

Concepto	FC7			FC8			FC9		
Total finos	16%			25%			9%		
Papel y cartón	5,5%	9,6%	1,5%	24,0%	39,9%	10,2%	16,5%	23,3%	2,1%
Metales	0,4%	0,7%	0,1%	2,4%	4,1%	1,0%	1,4%	2,0%	0,2%
Vidrios	1,9%	3,2%	0,5%	4,1%	6,9%	1,8%	2,8%	3,9%	0,3%
Materia orgánica	39,6%	69,0%	10,8%	19,6%	32,5%	8,3%	40,1%	56,6%	5,0%
Inertes pétreos	10,0%	17,4%	2,7%	10,0%	16,6%	4,2%	10,0%	14,1%	1,6%
Total	57,4%	100%		60,2%	100,0%		70,8%	100%	

Concepto	FC10			FC11			FC12		
Total finos	12%			22%			21%		
Papel y cartón	7,5%	11,37%	1,32%	25,41%	42,73%	9,51%	2,06%	3,56%	0,76%
Metales	1,5%	2,27%	0,26%	0,90%	1,52%	0,34%	2,40%	4,15%	0,89%
Vidrios	2,8%	4,24%	0,49%	4,21%	7,08%	1,58%	4,96%	8,59%	1,84%
Materia orgánica	43,9%	66,88%	7,78%	18,95%	31,86%	7,09%	38,31%	66,38%	14,23%
Inertes pétreos	10,0%	15,24%	1,77%	10,00%	16,81%	3,74%	10,00%	17,33%	3,71%
Total	65,63%	100 %		59,47%	100 %		57,72%	100%	

Concepto	FC14			FC15			FC16		
Total finos	20%			20%			16%		
Papel y cartón	13,64%	22,62%	4,49%	9,44%	15,72%	3,07%	16,61%	27,29%	4,27%
Metales	1,14%	1,90%	0,38%	2,10%	3,50%	0,68%	2,32%	3,81%	0,60%
Vidrios	4,29%	7,12%	1,41%	2,87%	4,78%	0,93%	5,11%	8,39%	1,31%
Materia orgánica	31,22%	51,77%	10,28%	35,64%	59,35%	11,58%	26,84%	44,08%	6,90%
Inertes pétreos	10,00%	16,59%	3,29%	10,00%	16,65%	3,25%	10,00%	16,43%	2,57%
Total	60,29%	100%		60,06%	100%		60,88%	100%	

Concepto	FC17			FC18			FC19		
Total finos	15%			5%			18%		
Papel y cartón	12,49%	21,58%	3,30%	27,25%	34,47%	1,56%	17,61%	29,36%	5,26%
Metales	2,28%	3,94%	0,60%	0,74%	0,93%	0,04%	0,80%	1,33%	0,24%
Vidrios	4,01%	6,92%	1,06%	4,98%	6,30%	0,29%	4,07%	6,79%	1,22%
Materia orgánica	29,10%	50,28%	7,70%	36,10%	45,65%	2,07%	27,51%	45,85%	8,22%
Inertes pétreos	10,00%	17,28%	2,65%	10,00%	12,65%	0,57%	10,00%	16,67%	2,99%
Total	57,87%	100%		79,07%	100 %		59,99%	100,00%	

7.6 Composición física de los RSU

En la tabla 7-3 se muestra la Composición Física obtenida para cada una de las muestras caracterizadas. Hay que apuntar que la carga vehicular FC13 se desestimó, cuando previamente se aceptó, porque en la descarga se observó gran cantidad de escombros y residuos específicos.

A su vez, en la tabla 7-4 E ilustración 7-4 se presentan la composición promedio obtenida de los RSD de la ciudad.

Tabla 7-3. Resultados de la caracterización de las muestras.

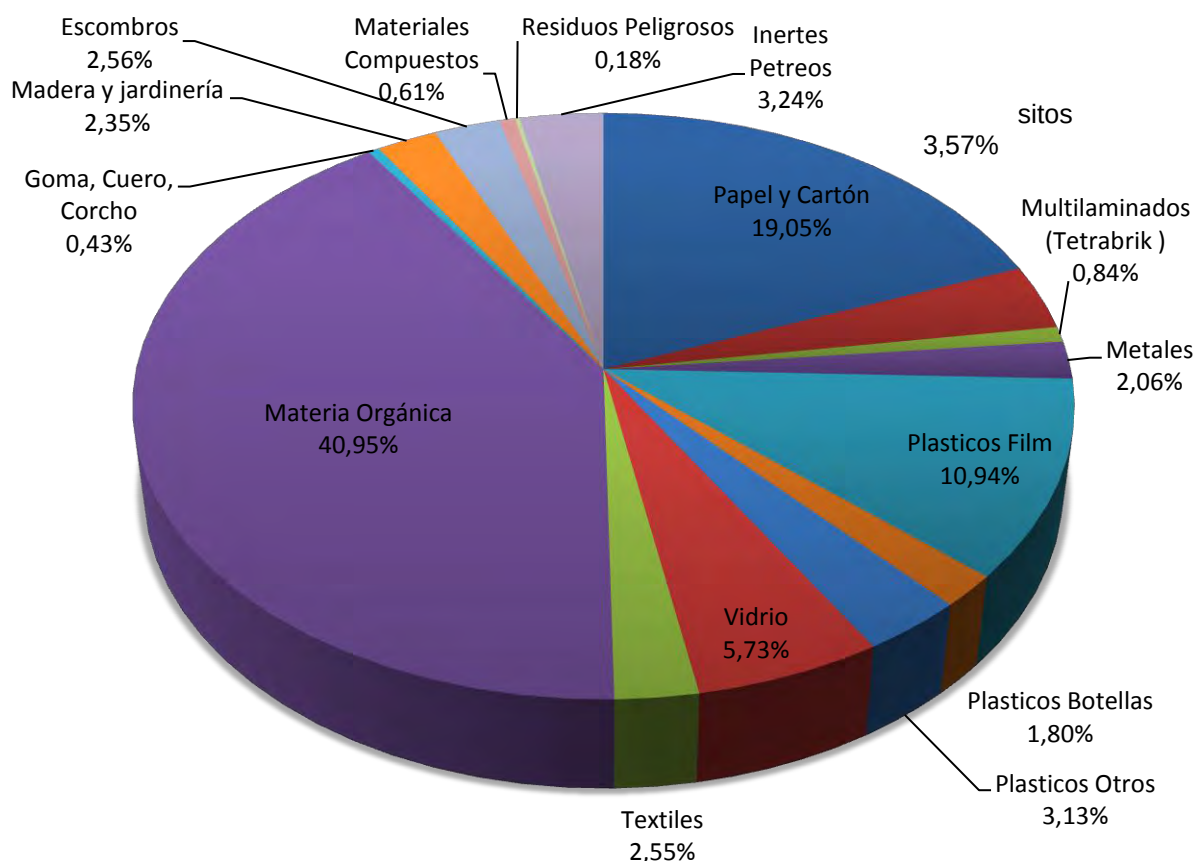
Material	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11	FC12	FC14	FC15	FC16	FC17	FC18	FC19
Papel y Cartón	24%	32%	11%	17%	19%	8%	7%	34%	19%	9%	35%	3%	18%	13%	21%	16%	29%	23%
	1%	5%	2%	4%	2%	7%	0%	2%	4%	4%	6%	6%	3%	2%	3%	1%	6%	5%
Multi-Laminados (Tetrabrik)	0%	1%	0%	0%	2%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Metales	2%	0%	5%	2%	12%	1%	0%	3%	2%	2%	1%	3%	2%	3%	3%	3%	1%	1%
Plásticos Film	10%	8%	10%	9%	8%	13%	11%	11%	14%	11%	12%	12%	9%	11%	19%	15%	10%	8%
Plásticos Botellas	2%	3%	3%	3%	2%	2%	0%	3%	0%	1%	1%	1%	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Plásticos Otros	3%	2%	3%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	4%	4%	3%
Vidrio	12%	10%	10%	8%	7%	2%	2%	6%	3%	3%	6%	7%	6%	4%	6%	5%	5%	5%
Textiles	6%	1%	2%	1%	1%	7%	5%	1%	3%	2%	3%	1%	4%	4%	2%	5%	0%	2%
Materia Orgánica	24%	9%	41%	48%	38%	45%	50%	28%	45%	52%	26%	53%	41%	47%	34%	37%	38%	36%
Goma, Cuero, Corcho	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	0%
Madera y jardinería	1%	24%	1%	2%	3%	7%	5%	0%	2%	4%	1%	2%	1%	1%	1%	2%	0%	6%
Escombros	3%	0%	8%	1%	2%	2%	10%	0%	1%	2%	0%	1%	7%	3%	0%	6%	0%	6%
Mat. Comps	0%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	3%	1%	4%	0%	2%	0%	0%	0%	1%	1%	0%
Residuos Peligrosos	7%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Inertes pétreos	4%	3%	3%	2%	2%	2%	4%	5%	2%	3%	4%	4%	4%	4%	3%	3%	1%	4%

Nota: Los valores marcados en gris no fueron tenidos en cuenta para el cálculo de la media ya que se encuentran fuera del intervalo de confianza.

Tabla 7-4. Medias y desviaciones estándar de los componentes estudiados.

Material	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza	
Papel y Cartón	19,05%	9,30%	0,46%	37,64%
	3,57%	1,91%	0,00%	7,39%
Multilaminados (Tetrabrik)	0,84%	0,50%	0,00%	1,83%
Metales	2,06%	1,24%	0,00%	4,55%
Plasticos Film	10,94%	2,07%	6,79%	15,09%
Plasticos Botellas	1,80%	0,93%	0,00%	3,67%
Plasticos Otros	3,13%	0,56%	2,00%	4,26%
Vidrio	5,73%	2,28%	1,16%	10,30%
Textiles	2,55%	1,55%	0,00%	5,64%
Materia Orgánica	40,95%	8,55%	23,85%	58,06%
Goma, Cuero, Corcho	0,43%	0,62%	0,00%	1,66%
Madera y jardinería	2,35%	1,90%	0,00%	6,15%
Escombros	2,56%	2,47%	0,00%	7,51%
Materiales Compuestos	0,61%	0,85%	0,00%	2,31%
Residuos Peligrosos	0,18%	0,48%	0,00%	1,14%
Inertes pétreos	3,24%	0,93%	1,37%	5,11%

Ilustración 7-4. Composición física de los RSD de las muestras tomadas.



7.7 Densidad Aparente (kg/m³)

En campo se determinaron las densidades aparentes de cada una de las unidades muestrales, en la Tabla 7-5 se presentan los resultados de la densidad aparente de cada una de las muestras así como la media de las mismas.

Tabla 7-5. Densidad aparente de las muestras.

Muestra	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11	FC12	FC14	FC15	FC16	FC17	FC18	FC19	Media
Densidad Aparente (kg/m ³)	261	147	343	202	175	218	165	142	167	137	272	136	173	112	103	183,5

7.8 Contenido de Humedad

Los valores de humedad obtenidos por la técnica de desecación a 70 °C en estufa en el Laboratorio de Recycomb en Argentina de las diferentes muestras se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7-6. Humedad de las muestras representativas tomadas.

Muestra Representativa	Humedad %
MR1	44,6 ± 1
MR2	51,9 ± 1
MR3	50,2 ± 1
MR4	46,8 ± 1
MR5	43,2 ± 1
MR6	49,9 ± 1
MR7	26,2 ± 1
MR8	39,6 ± 1
MR9	42,7 ± 1
MR10	36,7 ± 1
MR11	29,3 ± 1
MR12	49,9 ± 1
MR13	47 ± 1
MR14	46,1 ± 1
MR15	32,8 ± 1
MR16	45,1 ± 1
MR17	51 ± 1
MR18	47,4 ± 1
MR19	47,1 ± 1
MR20	40,2 ± 1
MR21	34,8 ± 1
Promedio	43,0

Tabla 7-7. Humedad de las muestras modificadas tomadas.

Muestra Modificada	Humedad %
MM1	62,2±1
MM2	62,2±1
MM3	63,2±1
MM4	51,2±1
MM5	54,5±1
MM6	51,6±1
MM7	61,8±1
MM8	60,3±1
Promedio	58,4

Se observa que los valores calculados de Humedad en las Muestras Representativas (MR) oscilan entre 51,9% y 26,2%. Siendo su valor promedio de 42,97%.

Para las Muestras Modificadas (MM), oscilan entre 63,2% y 51,2%. Siendo su valor promedio de 58,37%. Este valor se debe a la alta concentración de materia orgánica en las muestras.

7.9 Poder Calorífico (kCal/kg)

Los parámetros que inciden en el Poder Calorífico son la humedad, la cantidad de fracciones combustibles y la cantidad de fracciones no combustibles.

Los valores obtenidos en laboratorio del Poder Calorífico Inferior (PCI) de los RSD de Montevideo son los mostrados en la Tabla 7-7, cuyo valor promedio se sitúa en 2.180 kCal/kg.

Tabla 7-8. Poder calorífico de las muestras representativas tomadas.

Muestra Representativa	Poder calorífico inferior (Cal/g)
MR1	2752±92
MR2	1481±92
MR3	1287±92
MR4	2283±92
MR5	3287±92
MR6	1816±92
MR7	2942±92
MR8	2345±92
MR9	1404±92
MR10	2175±92
MR11	2270±92
MR12	2963±92
MR13	2678±92
MR14	1260±92
MR15	1536±92
MR16	2094±92
MR17	2020±92
MR18	3210±92
MR19	2389±92
MR20	1862±92
MR21	1726±92
Promedio	2180

Las Muestras Modificadas, se obtuvieron al eliminar de los residuos las fracciones no combustibles y reciclables. Por tanto, básicamente estaban compuestas por materia orgánica (desechos alimenticios y residuos de jardinería), pañales y apósitos, textiles, cuero y gomas, y una fracción de papeles y plásticos de pequeño tamaño. El valor promedio del Poder Calorífico Inferior (PCI) fue de 1.490 kCal/kg.

Tabla 7-9. Poder calorífico de las muestras modificadas tomadas.

Muestra Modificada	Poder calorífico inferior (Cal/g)
MM1	1169±92
MM2	954±92
MM3	1305±92
MM4	1753±92
MM5	1834±92
MM6	1561±92
MM7	1911±92
MM8	1436±92
Promedio	1490

7.10 Validación del número de Unidades Muestrales (Camión)

Con los valores obtenidos de la composición física, efectuamos la validación del número de muestras. Esto es, debemos de comprobar si el número de muestras obtenido es suficiente para extrapolar los resultados a la población con un determinado margen de error. Para ello, volvemos a determinar el número mínimo de muestras necesarias para conseguir la representatividad, pero esta vez utilizando los valores promedio y de desviación típica obtenidos en nuestro muestreo.

Por tanto, aplicando de nuevo la fórmula para la determinación de número de muestras propuesta por la ASTM D5231-92, se obtienen datos presentados en la Tabla 7-10.

De los resultados se desprende que para la materia orgánica y el plástico se requerían como mínimo 4 unidades muestrales para asegurar la representatividad y en el caso del papel 18 unidades, lo que confirma la cantidad de camiones a muestrear.

Tabla 7-10. Cálculo del número mínimo de muestras tomando los datos obtenidos en el muestreo.

Nº muestras Mat. Orgánica	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,0855	0,2	0,4095	3
2º tanteo	2,3534	0,0855	0,2	0,4095	6
3º tanteo	1,9432	0,0855	0,2	0,4095	4
4º tanteo	2,1318	0,0855	0,2	0,4095	5
5º tanteo	2,015	0,0855	0,2	0,4095	4

Nº muestras Papel	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,093	0,2	0,1905	16
2º tanteo	1,7459	0,093	0,2	0,1905	18
3º tanteo	1,7341	0,093	0,2	0,1905	18

Nº muestras Plástico Film	niv. conf. Student 90% t*	S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	0,0207	0,2	0,1094	2
2º tanteo	2,92	0,0207	0,2	0,1094	8
3º tanteo	1,8595	0,0207	0,2	0,1094	3
4º tanteo	2,3534	0,0207	0,2	0,1094	5
5º tanteo	2,015	0,0207	0,2	0,1094	4
6º tanteo	2,1318	0,0207	0,2	0,1094	4

7.11 Validación del número de muestras de laboratorio

A petición de ALUR y la Dirección Nacional de la Energía, se comprueba que las 21 muestras representativas y las 8 muestras modificadas que se solicitaron para realizar los ensayos de los Poderes Caloríficos Inferiores (PCI) y de los valores de Humedad (H), son suficientes para garantizar la representatividad de la población de Montevideo.

Dado que las muestras tomadas para analizar en el laboratorio fueron totalmente aleatorias, su número finito y suponiendo los datos distribuidos de forma normal, entonces es posible aplicar el Test de Student para comprobar si los datos de PCI y de Humedad (H) obtenidos con las 21 muestras representativas y las 8 muestras modificadas son extrapolables a la población.

$$n = \left[\frac{t * s}{e * \bar{x}} \right]^2$$

Siendo:

n = número de muestras, en este caso el número de muestras de laboratorio.

e = nivel de precisión deseado (20%).

S = desviación estándar correspondiente al componente estudiado.

t = Valor estadístico referente al nivel de confianza planteado para el muestreo (90%).

1.- Muestras Representativas

Tabla 7-11. Datos de la Muestra Representativa

Muestras Representativas	Media	Desviación	Intervalo de Confianza	
PCI (kCal/kg)	2.180	608	964	3.396
HUMEDAD (%)	43	7,2	28,7	57,3

Tabla 7-12. Cálculo del número mínimo de muestras tomando los datos obtenidos en el muestreo de las 21 muestras representativas.

Nº muestras PCI	niv. conf. Student 90% t*	Desv. estándar S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	608,21	0,15	2180	9
2º tanteo	1,8125	608,21	0,15	2180	11
3º tanteo	1,7959	608,21	0,15	2180	11

Nº muestras Humedad	niv. conf. Student 90% t*	Desv. estándar S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	7,15	0,15	42,98	3
2º tanteo	2,3534	7,15	0,15	42,98	7
3º tanteo	1,8946	7,15	0,15	42,98	4
4º tanteo	2,1318	7,15	0,15	42,98	6
5º tanteo	1,9432	7,15	0,15	42,98	5
6º tanteo	2,015	7,15	0,15	42,98	5

Aplicando el método t de Student en el caso del PCI, se obtiene que con 11 muestras se obtiene la representatividad de la población con una precisión del 15% y para el caso de la Humedad, se precisan como mínimo 5 muestras.

2.- Muestras Modificadas

Tabla 7-13. Datos de la Muestra Modificada

Muestras Modificadas	Media	Desviación	Intervalo de Confianza	
PCI (kCal/kg)	1.490	316	859	2.122
HUMEDAD (%)	58,4	4,7	48,9	67,9

Tabla 7-14. Cálculo del número mínimo de muestras tomando los datos obtenidos en el muestreo de las 8 muestras modificadas.

Nº muestras PCI	niv. conf. Student 90% t*	Desv. estándar S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	315,64	0,15	1490	5
2º tanteo	2,015	315,64	0,15	1490	8
3º tanteo	1,8595	315,64	0,15	1490	7
4º tanteo	1,8946	315,64	0,15	1490	7

Nº muestras Humedad	niv. conf. Student 90% t*	Desv. estándar S	Precisión e	Valor medio X	n
1º tanteo	1,645	4,75	0,15	58,38	1
2º tanteo	6,3137	4,75	0,15	58,38	12
3º tanteo	1,7823	4,75	0,15	58,38	1

Aplicando el método t de Student en el caso del PCI, se obtiene que con 7 muestras, como mínimo, se alcanza la representatividad de la población con una precisión o error de muestreo admitido del 15%.

Para el caso de la Humedad, no converge con e=15%, pero los valores de las Muestras Modificadas se encuentran dentro de los rangos de los valores reales de Humedad para una muestra con un gran contenido de Materia Orgánica.

8 Discusión de los resultados

Composición Física de los residuos: Si se comparan los datos promedio obtenidos con la Composición Física de los RSU en varios lugares de América del Sur, obtenemos:

Tabla 8-1. Comparativa de composición de residuos en diferentes ciudades

Material	Muestreo actual 2012	Fichtner-LKSur 2004 ⁷	Buenos Aires 2009 ⁸	Santiago Chile 2006 ⁹	Salvador Bahía 2010 ¹⁰
Papel y Cartón	19,05%	10,50%	18,43%	13,51%	12,18%
	3,57%	5,20%	4,27%	4,95%	6,70%
Multilaminados (Tetrabrik)	0,84%		0,76%	0,70%	1,54%
Metales	2,06%	1,50%	1,56%	1,80%	2,63%
Plásticos Film	10,94%	9,90%	12,06%	10,07%	17,26%
Plásticos Botellas	1,80%	2,00%	2,07%		
Plásticos Otros	3,13%	2,00%	5,56%		4,86%
Vidrio	5,73%	3,40%	3,47%	3,94%	2,22%
Textiles	2,55%	2,10%	3,40%	1,97%	4,74%
Materia Orgánica	40,95%	58,00%	40,10%	49,20%	42,14%
Goma, Cuero, Corcho	0,43%	0,60%	0,72%	0,18%	0,22%
Madera y jardinería	2,35%	0,60%	3,65%	5,79%	0,28%
Escombros	2,56%		2,20%		
Materiales Compuestos	0,61%	1,00%			
Residuos Peligrosos	0,18%	0,30%	0,72		
Inertes pétreos	3,24%		1,16%		

Los desechos alimenticios es el primer componente con el 40,95% en peso. Que junto con la Madera y jardinería (2,35%), obtendremos la fracción putrescible en un 43,30%. Este valor está dentro de los valores normales que suelen darse en otras ciudades de Uruguay y Argentina.

El segundo componente en abundancia son los papeles y cartón (19,05%). Se detecta una subida importante con respecto al valor obtenido en el 2004, esto

⁷ FICHTNER-LKSUR Asociados. "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Estudios Básicos. Anexo Residuos Sólidos Urbanos". Noviembre 2004. Pág. 97.

⁸ Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. "Calidad y Gestión de los Residuos Sólidos. Ciudad de Buenos Aires". Octubre 2002. Pág. 5.

⁹ ORCCOSUPA, Javier. "Relación entre la producción per cápita de residuos sólidos domésticos y factores socioeconómicos. Provincia de Santiago de Chile". 2002.

¹⁰ Prefectura Municipal de Salvador de Bahía. "Caracterización física de residuos sólidos urbanos, municipio de Salvador de Bahía". Septiembre 2010. Pág. 29.

puede ser debido al aumento de la actividad comercial en la ciudad respecto a ese año (año que todavía estaba muy afectado por la crisis del 2002 en Uruguay), y también a que la actividad de los clasificadores en esos años de crisis fue muy activa.

Los residuos plásticos es el tercer componente más numeroso, con el 15,87%. También porcentaje muy similar a los encontrados en otras ciudades de latino América. Su porcentaje no ha variado mucho respecto al 2004, porque posiblemente, el aumento de su uso en el país, es contrarrestado por su retirada antes de llegar al sitio por parte de los clasificadores, puesto que es uno de los materiales valorados por ellos (sobre todo el PET de las botellas). Pese a todo, si comparamos con valores de países europeos desarrollados (7% - 10%), comprobamos que este porcentaje es alto, debido sobre todo al enorme contenido en bolsas de plástico.

Comentar que en todos los casos, se ha detectado cantidades relativamente altas (3,24%) de tierras. Los residuos muestreados presentaban cantidades de hojas de jardinería procedentes de macetas y tierra. Así como bastante hierba mate.

El porcentaje en pañales y apósitos es del 3,57%. Este componente no es tan abundante como en otras ciudades. Su contenido está muy relacionado con el nivel de natalidad de la zona estudiada.

Densidad Aparente:

Los valores de densidad son totalmente esperables a lo que correspondería una muestra de RSD sin compactar. Estos oscilan entre 103 kg/m³ – 261 kg/m³, con un promedio de 183 kg/m³.

Valores promedio en algunas ciudades son: Buenos Aires 184,51 kg/m³¹¹, Santiago de Chile 231,20 kg/m³¹², Salvador de Bahía 228,11 kg/m³¹³.

Humedad:

Los valores de humedad (26,2% y 51,2%) entran dentro de los valores normales obtenidos en otras ciudades. Estos valores, en general, suelen oscilar entre el 30% y el 60%. El valor promedio obtenido es de 42,97%, muy similar al valor del PDRS que era del 41%¹⁴. Como ejemplo comparativo, en Santiago de Chile se obtuvieron densidades del 50,6%¹⁵, y en Buenos Aires del 54%¹⁶.

El valor de la humedad en los residuos de una zona, viene determinado básicamente por el contenido de materia orgánica y por la climatología.

¹¹ Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Op. Cit. Pág. 6.

¹² ORCCOSUPA, Javier. Op. Cit. Pág. 40.

¹³ Prefectura Municipal de Salvador de Bahía. Op Cit. Pág. 32.

¹⁴ FICHTNER-LKSUR Asociados. Op. Cit. Pág. 104.

¹⁵ ORCCOSUPA, Javier. Op. Cit. Pág. 40.

¹⁶ Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Op. Cit. Pág. 6.

Determinación del Poder Calorífico (kCal/kg)

Como fuera mencionado anteriormente, los parámetros que inciden en el Poder Calorífico son la humedad, la cantidad de fracciones combustibles y la cantidad de fracciones no combustibles.

Los valores obtenidos del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las Muestras Representativas (MR) de los RSD de Montevideo son los mostrados en la Tabla 7-7, cuyo valor promedio se sitúa en 2.180 kCal/kg.

El valor promedio de las Muestras Modificadas (MM) es claramente inferior (1.490,25 kCal/kg) debido básicamente al contenido en humedad en la materia orgánica. A modo comparativo, el estudio realizado en el 2001 sobre la calidad de los residuos sólidos de Buenos Aires, determina que el valor del PCI es de 1624 kCal/kg.

A continuación se muestran valores obtenidos en otros países a modo orientativo¹⁷: USA (2.220 kCal/kg), Inglaterra (1.950 kCal/kg), Francia (1.560 kCal/kg) y Suecia (2.390 kCal/kg).

Determinación del Poder Calorífico (kCal/kg) en forma teórica

A su vez se realiza la estimación teórica del contenido energético del RSD de Montevideo, obtenido en este estudio, con el fin de compararlo con el PCI obtenido en laboratorio. Para ello en la tabla siguiente se presentan los poderes caloríficos en base seca de las diferentes fracciones de residuos de diferentes fuentes consultadas.

Tabla 8-2 Poderes caloríficos en base seca de las distintas fracciones de residuos de las fuentes consultadas

Material	Porcentaje en peso humedo	Intervalo ¹⁸ PCI (kJ/kg)	Intervalo ¹⁸ PCI (kcal/kg)	PCI medio ¹⁸ (kCal/kg)	PCI medio ¹⁹ (kCal/kg)
Papel y Cartón	19,05%	11.630 - 18.608	2.780 – 4.448	3.614	3.780
	3,57%	9.811	1.223 – 2.224	1.723	1.223
Multilaminados (Tetrabrik)	0,84%	13.956 - 20.934	3.336 – 5.003	4.170	4.170
Metales	2,06%				
Plásticos Film	10,94%	27.913 – 44.195	6.671 – 10.563	8.617	7.839
Plásticos Botellas	1,80%				
Plásticos Otros	3,13%				
Vidrio	5,73%				
Textiles	2,55%	15.119 – 18.608	3.614 – 4.448	4.031	4.425
Materia Orgánica	40,95%	3.489 – 6.978	834 – 1.668	1.251	999
Goma, Cuero, Corcho	0,43%	15.119 – 19.771	3.614 – 4.725	4.170	5.112
Madera y jardinería	2,35%	2.326 – 18.608	556 – 4.448	2.502	3.691

¹⁷ HARINDRA, Joseph Fernando. "Handbook of Environmental Control", CRC, 2012.

¹⁸ Valores estimados en Handbook of Integrated Waste Management. G. Tchobanoglous. Pág. 13-7.

¹⁹ Valores utilizados en "Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la instalación de capacidad de generación de energía a partir de residuos en Uruguay". Themelis Associates, 2012. Pág.42. Tomados del Handbook of Integrated Waste Management. G. Tchobanoglous.

Material	Porcentaje en peso humedo	Intervalo ¹⁸ PCI (kJ/kg)	Intervalo ¹⁸ PCI (kcal/kg)	PCI medio ¹⁸ (kCal/kg)	PCI medio ¹⁹ (kCal/kg)
Escombros	2,56%				
Materiales Compuestos	0,61%	9.304 – 11.630	2.224 – 2.780	2.502	2.557
Residuos Peligrosos	0,18%				
Inertes pétreos	3,24%				
PCI TOTAL SIN CORREGIR (kCal/kg)			2.136 – 3.583	2.859	2.689
PCI TOTAL SIN CORREGIR (kJ/kg)			8.936 – 14.992	11.964	11.251

Estos valores de los PCI teóricos son considerando Muestra Seca. Por tanto, es necesario corregir este valor restando el calor necesario para evaporar la humedad de la muestra en la combustión, de acuerdo con la formula siguiente, considerando el valor de la humedad media de la muestra ensayada en laboratorio de 42,97 %.

Por tanto, se corrigen estos valores mediante:

$$PCI \text{ muestra} = \left[\sum PCI \text{ fracción} * \text{porcentaje en peso humedo} \right] - 539 * \text{porcentaje humedad}$$

Siendo 539 kCal/kg el calor necesario para evaporar la humedad de la muestra en la combustión.

Los valores obtenidos con esta corrección para el Poder Calorífico Inferior de los RSD de Montevideo calculados teóricamente en base a la composición obtenida en campo se presentan en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3. Poder Calorífico Inferior de los RSD de Montevideo calculado teóricamente en base a la composición obtenida en campo.

	Intervalo ¹⁸ PCI (kcal/kg)	PCI medio ¹⁸ (kCal/kg)	PCI medio ¹⁹ (kCal/kg)
PCI TOTAL CORREGIDO (kCal/kg)	1.904 – 3.352	2.628	2.457
PCI TOTAL CORREGIDO (kJ/kg)	7.967 – 14.023	10.995	10.282

Se observa que el valor obtenido en laboratorio, **PCI = 2.180 kcal/kg**, se encuentra dentro del intervalo de los PCI teóricos: 1.904 kCal/kg – 3.352 kCal/kg.

Cabe señalar que el calculo anterior es una aproximación, puesto que realmente el cálculo del PCI de la muestra si contiene humedad debería ser:

$$PCI \text{ muestra} = \left[\sum PCI \text{ fracción} * (\text{porcentaje en peso seco}) \right] - 539 * \text{porcentaje humedad}$$

pero esto obliga a conocer los porcentajes en peso de las fracciones secas. O lo que es lo mismo, conocer los valores medios de humedad de cada una de las fracciones.

A modo de aproximación, y tomando los valores extremos de los intervalos de humedad y los valores extremos de los valores de PCI de cada una de las

fracciones que aparecen en el Handbook of Integrated Waste Management. G. Tchobanoglous, se obtendría que el poder calorífico oscilaría:

- a) su valor mínimo oscilaría entre 1.472,91 kCal/kg y 1.677,41 kCal/kg
- b) su valor máximo oscilaría entre 2.484,47 kCal/kg y 2.895,23 kCal/kg

En el caso de que se tomen los valores extremos de los intervalos de humedad pero fijando los PCI de las fracciones en su valor medio, se obtiene que el poder calorífico teórico de la muestra oscilaría entre 1.979 kCal/kg. y 2.286 kCal/kg.

9 Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones del Plan de Monitoreo realizado en la ciudad de Montevideo:

1. Se obtuvo en campo la Composición Física de los Residuos Domiciliarios (RSD) es comparable a otras ciudades Latino Americanas. A su vez, con los resultados obtenidos se validó el número de muestras, asegurando su representatividad.
2. Se determinaron los parámetros: Densidad aparente, Humedad y Poder Calorífico Inferior (PCI), encontrándose valores dentro de rangos internacionales. Con los resultados obtenidos se validó el número de muestras, asegurando su representatividad.
3. El PCI de la Muestra Modificada resultó menor debido a la alta concentración de materia orgánica, que contiene prácticamente la totalidad del contenido en humedad.
4. Se estimó el PCI de los residuos a partir de la composición de los mismos obteniéndose un rango dentro del cual se encuentra el valor real obtenido en el laboratorio.
5. Se analizó la Base de Datos de la Intendencia en 2012, obteniéndose cantidades promedio de residuos domiciliarios y totales ingresados por día.

10 Fuentes Consultadas

IMM. "Primer Estudio de caracterización y cuantificación de los RSU en la ciudad de Montevideo". 1996.

FICHTNER-LKSUR Asociados. "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana". Documento: "Estudios Básicos. Anexo Residuos Sólidos Urbanos". Noviembre 2004.

FICHTNER-LKSUR Asociados. "Plan Director de RSU de Montevideo y Área Metropolitana". Documento: Plan Director. Diciembre 2005.

N.J.Themelís, M.E. Díaz Barriga. "Estudio de Prefactibilidad Técnica y Económica para la Instalación de Capacidad de Generación de energía a partir de residuos (WTE) en Uruguay". 2012.

CSI Ingenieros. "Información base para el diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos". 2011.

CEISMU. "Índice de Nivel Socioeconómico (INSE)", 2012.

Datos de División de Limpieza, según "Diagnóstico rápido: basuras y desechos de la ciudad de Montevideo-Uruguay" (CIEDUR), 2010.

Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. "Calidad y Gestión de los Residuos Sólidos. Ciudad de Buenos Aires". Octubre 2002.

ORCCOSUPA, Javier. "Relación entre la producción per cápita de residuos sólidos domésticos y factores socioeconómicos. Provincia de Santiago de Chile". 2002.

Prefectura Municipal de Salvador de Bahía. "Caracterización física de residuos sólidos urbanos, municipio de Salvador de Bahía". Setiembre 2010. Pág. 29.

Norma ASTM "Standard Test Method for Determination on the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. D5231-92".

Norma IRAM 29523. "Determinación de la composición de residuos sólidos urbanos sin tratamiento previo".

ANEXO

INFORME DE LABORATORIO

Buenos Aires, 15 de enero de 2013

INFORME SOBRE CARACTERIZACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

Fecha de Emisión 15 de Enero de 2013

Solicitante: LKSur SA
Dirección -----
Teléfono: -----

Identificación de las muestras Realizadas por el cliente
Condiciones de recepción de las muestras Residuos (Bolsas, papel, restos de envases, pelo, hojas, ramitas, etc Húmedos y con olor nauseabundo)

Comentarios

Se realizaron análisis de caracterización de residuos sólidos urbanos.
A pedido del cliente solo se determinó poder calorífico inferior y humedad.

Se analizaron 29 muestras con las siguientes características.
Los residuos sólidos urbanos analizados se componían básicamente de bolsas, papel, restos de envases, pelo, hojas, ramitas, etc Con porcentajes de humedad elevados, con líquidos libres, con olor nauseabundo y en avanzado estado de descomposición.

Resultados

N° Recycomb	Identificación de la muestra Cliente	% Humedad	Incertidumbre (%)	Poder Calorífico inferior (Cal/g)	Incertidumbre (Cal/g)
130012	MR1	44,6	1	2752	92
130013	MR9	42,7	1	1404	92
130014	MR13	47	1	2678	92
130015	MR14	46,1	1	1260	92
130016	MR6	49,9	1	1816	92
130017	MR7	26,2	1	2942	92
130018	MR15	32,8	1	1536	92
130019	MR8	39,6	1	2345	92
130020	MR10	36,7	1	2175	92
130021	MR11	29,3	1	2270	92
130026	MM2	62,2	1	954	92
130027	MM3	63,2	1	1305	92
130028	MR3	50,2	1	1287	92
130029	MR5	43,2	1	3287	92

N° Recycomb	Identificación de la muestra Cliente	% Humedad	Incertidumbre (%)	Poder Calorífico inferior (Cal/g)	Incertidumbre (Cal/g)
130030	MM4	51,2	1	1753	92
130031	MM8	60,3	1	1436	92
130032	MR21	34,8	1	1726	92
130033	MR20	40,2	1	1862	92
130034	MR16	45,1	1	2094	92
130035	MR17	51	1	2020	92
130036	MR18	47,4	1	3210	92
130037	MR4	46,8	1	2283	92
130038	MR2	51,9	1	1481	92
130039	MR19	47,1	1	2389	92
130040	MM7	61,8	1	1911	92
130041	MM1	62,2	1	1169	92
130042	MR12	49,9	1	2963	92
130043	MM5	54,5	1	1834	92
130044	MM6	51,6	1	1561	92

Métodos de ensayo:

Las técnicas seguidas fueron secado en estufa hasta peso constante y la técnica modificada ASTM D240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.

Por RECYCOMB S.A.



Lic. Abel Rivas
Gerente Comercial

Agilidad, Adaptabilidad y Flexibilidad
en soluciones de Ingeniería

LKSur

Bv. Artigas 990
Tel/Fax: 2708 1216
C.P. 11300
Montevideo, Uruguay
www.lksur.com.uy
www.lks.es
lksur@lksur.com.uy