

Estudio de Caracterización y Propuestas de Revalorización de Residuos de Construcción y Demolición en la Ciudad de Cochabamba

Characterization Study and Proposals Revaluation of Construction and Demolition Waste in the City of Cochabamba

Rodrigo Vargas Meneses, Marcos Luján Pérez

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica
Boliviana Av. General Galindo s/n, Cochabamba, Bolivia

vargasmn_rod@hotmail.com

Resumen: El presente estudio se centra en la evaluación de las oportunidades de revalorización de los residuos de construcción y demolición generados en la ciudad de Cochabamba, como elemento fundamental para la propuesta del sistema de gestión de dichos residuos. Para el propósito de la caracterización, se realizó una estimación a través del análisis de los residuos sólidos que generaría una "Vivienda tipo". Se obtuvo una tasa de generación de 0,1924 Mg/m² y una composición volumétrica de tierra de excavación en un 68%, arena y grava 21 % y el restante 11% de otros. En el caso de los residuos de demolición se obtuvo una tasa de generación de 0,929 Mg/m², presentan una composición volumétrica de: hormigón en un 53%, ladrillos-tejas y otros cerámicos en un 31%, y el restante 16% de otros; los residuos de demolición de una vivienda con muros de adobe tienen una tasa de generación de 1,354 Mg/m² presenta una composición volumétrica de adobe en un 65% y arena en un 18% y el restante 17% en otros. Una vez conocida la composición característica de dichos residuos, se realizó una proyección de generación de los mismos para un periodo de quince (15) años, habiéndose calculado la cantidad de residuos desviados para su reaprovechamiento la cifra alcanza un valor de 7.304.137,3 m³ a ser gestionados y requiere de una superficie de unas 4,87 ha para el vertido.

Palabras clave: Revalorización, caracterización, gestión, residuos de construcción y demolición.

Abstract: This study focuses on the evaluation of growth opportunities of construction and demolition waste generated in the city of Cochabamba, as fundamental to the proposed management system element such waste. For purposes of characterization, an estimate was made through the analysis of solid waste that would generate a "type Housing". a rate of generation of 0.1924 Mg/m² and a bulk composition of soil excavation by 68%, 21% sand and gravel and other remaining 11% was obtained. In the case of demolition waste a rate of generation of 0.929 Mg/m² was obtained, present a volumetric composition: concrete by 53%, bricks-tiles and other ceramic 31%, and the remaining 16%

other; waste demolition of a house with adobe walls have a generation rate of 1.354 Mg/m² has a volumetric composition of adobe 65% sand and 18% and the remaining 17% in others. Once known the characteristic composition of the waste, generating a projection thereof for a period of fifteen (15) years was made, having calculated the amount of waste diverted for reuse the figure reaches a value of 7,304,137.3 m³ to be managed and requires an area of about 4.87 ha for landfilling.

Keywords: Revaluation, characterization, management, construction and demolition waste.

1 Introducción

La ciudad de Cochabamba se ve muy afectada por la contaminación medioambiental, siendo uno de los mayores inconvenientes la gestión de los Residuos Sólidos, y en este caso específicamente los Residuos de Construcción y Demolición, pues el municipio del Cercado de Cochabamba no tiene nada definido para su gestión. La situación es similar en muchos municipios de Bolivia. Esto lleva a que estos residuos no tengan una gestión adecuada, en la mayoría de los casos los constructores contratan los comúnmente llamados “volqueteros” que se ocupan de evacuar estos residuos y los disponen en diversos sitios de la ciudad donde no existen controles que lo impidan, lo que lleva a generar serios impactos ambientales. En la mayoría de los casos estos residuos se disponen al borde de los ríos, en la vereda de los caminos o en terrenos baldíos en guisa de relleno.

Las zonas identificadas en las que existe la disposición indebida de residuos de construcción y demolición son las mostradas en la Figura 1.



Figura 1. Zonas con disposición de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba.

En la actualidad, existe una gran tendencia por el reciclaje y revalorización de algunos Residuos Sólidos Urbanos, tales como: papel, plásticos, etc. Sin embargo, no se tiene conocimiento de la posibilidad de revalorización de los desechos de construcción y demolición en nuestro medio.

Es evidente, que existe la falta de conocimiento y/o estudio para la correcta gestión de los Residuos Sólidos considerados “Especiales” (Estado Plurinacional de Bolivia, Reglamento de la Ley N° 1333, 1992), como lo son los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba.

El objetivo del presente estudio es elaborar una propuesta de revalorización de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba, basados en su composición característica. El alcance de este estudio estará enfocado en dos aspectos importantes:

- Servirá como base para la realización de un Sistema de Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición, en la ciudad de Cochabamba.
- Establecerá la composición característica de los Residuos de Construcción y Demolición en la ciudad de Cochabamba, para el estudio de su posterior aprovechamiento a través de un proceso de transformación.

El estudio servirá como propuesta para diseñar un sistema de gestión de los residuos de demolición y construcción y contribuirá a reducir los impactos ambientales, económicos y estéticos que actualmente provocan en varias ciudades de Bolivia; finalmente permitirá mejorar la calidad de vida de la ciudadanía Cochabambina.

2 Marco Teórico

2.1 Residuos de Construcción y Demolición

Los residuos de construcción y demolición, tal y como lo denota su nombre, son los residuos generados en el sector de la construcción y/o como consecuencia de la demolición de cualquier tipo de edificación e infraestructura que hayan quedado obsoletas, dando paso a la construcción de nuevas edificaciones. Descritos como residuos especiales porque, son residuos de características muy diversas que se generan en el medio urbano y cuyas formas de recolección y tratamiento varían sustancialmente. (Estado Plurinacional de Bolivia, Reglamento de la Ley N° 1333, 1992).

De los diferentes destinos incorrectos de los residuos de construcción y demolición, dos son los que se pudieron evidenciar:

- Descarga en pendientes u otros terrenos inseguros, donde se generan depósitos inestables, que pueden provocar deslizamientos.



Figura 2. Residuos de Construcción y Demolición en pendiente Carretera a Santivañez.

- Descarga en tierras bajas, junto a drenajes, o inclusive directamente en el lecho de ríos, donde se puede provocar obstrucción del cauce e inundaciones.



Figura 3. Residuos de Construcción y Demolición en laderas del Rio Rocha camino a Sacaba.

Es importante recalcar que en Bolivia aún no se cuenta con sistemas de gestión de residuos sólidos especiales salvo en el caso de residuos hospitalarios. A la fecha

no existen instrumentos normativos y de orientación, así como equipamiento y tecnología adecuada para su tratamiento y disposición final. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011-2015).

2.1.1 Tasa de generación específica

Se entiende por tasa de generación específica para cierto tipo de residuos a la relación que existe entre la cantidad generada de residuos y la unidad de generación específica.

Para la generación de los residuos de construcción y demolición, se ve por conveniente el siguiente indicador de tasa de generación específica:

$$\textit{Tasa de generación específica} = \frac{\textit{Toneladas o m}^3}{\textit{m}^2 \textit{de construcción}} \quad (1)$$

Para la valoración de la cantidad de los residuos generados se utilizará tanto la masa, expresada en toneladas, como el volumen, expresado en m³. Estas dos unidades de medición de la cantidad generada se las puede relacionar a través del *volumen específico aparente*, expresado en m³/Mg (TCHOBANOGLIOUS, 1998). La unidad de generación específica será representada por los metros cuadrados [m²] de la obra que vaya a ser construida o demolida.

3 Metodología

La caracterización de la generación de residuos de la construcción como tal consistió en la determinación de varios parámetros a partir de un modelo de cálculo. Se consideraron tres escenarios posibles: la generación de residuos durante la construcción de una obra nueva; la generación de residuos debido a la demolición de una obra en base a ladrillo y hormigón y; la demolición de una obra, generalmente antigua, construida en base a adobe.

En el caso de la construcción de una obra nueva, se tomó como modelo de cálculo la construcción de una casa tipo de dos plantas con techo de teja. Este es el modelo más común de casa que se construye en la ciudad de Cochabamba. A partir de este modelo, que tiene una superficie construida de 217 m², se cuantificó la cantidad de materiales que se utilizan en la construcción de la casa tipo y se estimaron los residuos que se generan a partir del análisis de excedentes que se calculan como pérdidas de materiales e insumos de la construcción. Para realizar la cuantificación y posterior caracterización de la composición de los residuos de la construcción se utilizaron las hojas de rendimiento de la Cámara de Construcción de Cochabamba nominados “ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS” (CADECO, 2015-2016), en los cuales se describen los materiales a ser utilizados

para la construcción de diferentes estructuras y las pérdidas usuales por cada tipo de material.



Figura 4. “Vivienda tipo” de 217 m² utilizada para la estimación de residuos generados en la construcción y demolición.

Una vez estimados los residuos de construcción y demolición a ser generados en la ciudad de Cochabamba, se procedió a determinar el volumen específico aparente, expresado en m³/kg, de acuerdo al procedimiento de la Norma Boliviana 743 Residuos sólidos- Determinación de parámetros de diseño sobre residuos sólidos municipales (IBNORCA, 1996), que consiste en:

- Verificación de las condiciones físicas del cilindro a ser utilizado para el experimento.



Figura 5. Cilindro para el ensayo de acuerdo a la NB 743.

- Verificación del nivel de la balanza.



Figura 6. Balanza para el ensayo de acuerdo a la NB 743.

- Pesado del recipiente vacío, tomándolo como peso de la tara.
- Llenado del recipiente con el material a ser analizado.
- Dejar caer el recipiente tres veces de una altura de 10 cm.
- Medir la altura final que han alcanzado los residuos en el recipiente.
- Proceder al cálculo del Volumen Específico Aparente, que será la relación entre el volumen y el peso de los residuos.



Figura 7. Materiales utilizados en el ensayo de acuerdo a la NB 743.

Una vez realizadas las estimaciones y ensayos se procedió a la caracterización tanto de residuos de construcción como de demolición, de la siguiente manera.

- **Residuos generados en la actividad de la construcción**, esta consistirá en el llenado de una tabla clasificando los materiales de la siguiente manera:

Tierra excavación, Arena, Grava, Ladrillos 6H, Cemento, Yeso, Teja Cerámica, Cerámica 32x32, Clavos, Alambre

Una vez conocidas todas las materias primas utilizadas dentro de una construcción, se procederá a realizar la determinación de la cantidad porcentual de desechos que esta construcción generaría.

Normalmente la actividad constructora generará residuos debido a los errores ya sea en el transporte, imprevistos, etc. de todas las materias primas que se utilizaron en el proceso, estos significarán una fracción del total de las materias primas que depende del tipo de material que se usa.

- **Residuos generados en la actividad de la demolición**, esta caracterización se identificarán los siguientes tipos de materiales: Adobe, Arena, Teja Cerámica, Madera, Yeso y Otros

Esta etapa consistirá en la identificación de todos los materiales que forman parte de los residuos que hayan sido generados en el proceso de la demolición de alguna estructura que se haya realizado efectivamente.

4 Resultados y discusión

4.1 Caracterización de residuos de construcción

En la Tabla 2: se muestra el resumen de los resultados de la caracterización de los desechos provenientes de la construcción, expresados en masa y volumen.

Tabla 1: Caracterización de desechos de construcción % en masa y % en volumen, en la Ciudad de Cochabamba, 2016.

Materia Prima	Total Residuo kg	Composición (% Masa)	Total Residuo m ³	Composición (% Volumen)
Tierra excavación	30.360,00	72,71	13,80	68,35
Arena	6.818,57	16,33	2,53	12,53
Grava	1.571,60	3,76	0,60	2,97
Ladrillos 6H	1.243,90	2,98	1,67	8,27
Cemento	606,77	1,45	0,20	0,99
Yeso	604,51	1,45	0,45	2,23
Teja Cerámica	423,90	1,02	0,78	3,86
Cerámica 32x32	107,05	0,26	0,15	0,74
Clavos	16,70	0,04	0,01	0,05
Alambre	3,13	0,01	N.d.	N.d.
TOTAL	41.756,13	100,00	20,19	100,00

Una vez realizados los cálculos para obtener los desperdicios totales en unidad de masa (kg) y unidad de volumen (m³) se procedió a realizar la gráfica de distribución de los materiales que componen los residuos.

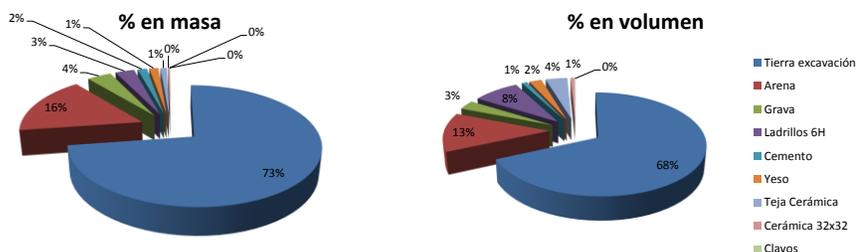


Figura 8. Caracterización de desechos de construcción % en masa y % en volumen.

4.2 Caracterización de residuos de demolición

4.2.1 Caracterización de residuos de demolición: Caso muros de ladrillo

En la Tabla 2: se muestra el resumen de los resultados de la caracterización de los desechos provenientes de la demolición de una estructura con muros de ladrillo cerámico, expresados en masa y volumen.

Tabla 2: Caracterización de desechos de demolición (muros de ladrillo) % en masa y % en volumen, en la Ciudad de Cochabamba, 2016.

Material	Residuo generado kg	Composición % en masa	Residuo generado m ³	Composición % en volumen
Hormigón	154.902,20	76,82	97,59	52,98
Ladrillos, tejas, cerámicos	35.484,48	17,60	57,84	31,40
Yeso	6.380,86	3,16	9,82	5,33
Madera	4.420,66	2,19	8,40	4,56
Otros	448,01	0,22	10,56	5,73
Totales	201.636,21	100,00	184,21	100,00

Estos mismos reflejados en la siguiente figura:

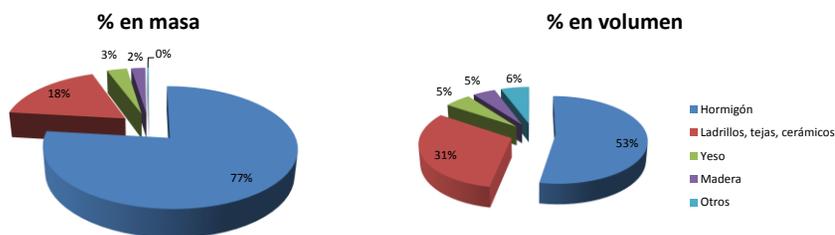


Figura 9. Caracterización de desechos de demolición (muros de ladrillo) % en masa y % en volumen.

4.2.2 Caracterización de residuos de demolición: Caso muros de adobe

En la Tabla 3: se muestra el resumen de los resultados de la caracterización de los desechos provenientes de la demolición de una estructura con muros de adobe, expresados en masa y en volumen.

Tabla 3: Caracterización de desechos de demolición (muros de adobe) % en masa y % en volumen, en la Ciudad de Cochabamba, 2016.

Material	Total Residuo kg	Composición % en masa	Total Residuo m ³	Composición % en volumen
Adobe	186.767,36	63,59	116,73	64,58
Arena	89.100,00	30,33	32,97	18,24
Teja Cerámica	8.461,58	2,88	15,48	8,57
Madera	5.111,67	1,74	9,71	5,37
Yeso	3.899,00	1,33	5,85	3,24
Otros	383,66	0,13	N.d.	N.d.
TOTAL	293.723,75	100,00	180,74	100,00

Estos mismos reflejados en la siguiente figura:

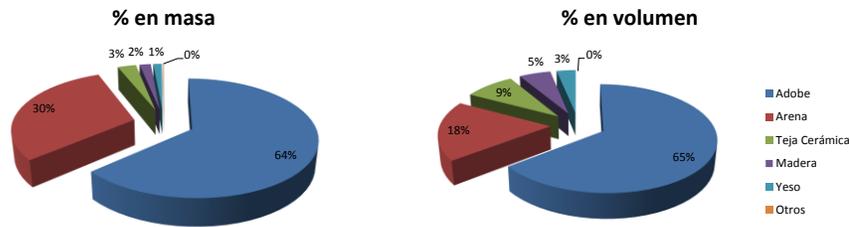


Figura 10. Caracterización de desechos de demolición (muros de adobe) % en masa y % en volumen.

4.3 Tasa de generación específica

Una vez obtenidos los resultados del total de residuos generados en la actividad de la construcción y demolición, tanto en porcentaje de masa (kg), y porcentaje volumétrico (m³), se procede al cálculo de la tasa de generación específica descrita a continuación:

$$Tasa\ de\ generación\ específica = \frac{Toneladas\ ó\ m^3}{superficie\ en\ m^2} \tag{1}$$

Para este motivo se utilizará los datos obtenidos de:

- Total residuos de la construcción equivalentes a 41,756 Mg y 20,19 m³.
- Total residuos de la demolición (muros de ladrillo) equivalentes a 201,64 Mg y 184,2 m³.
- Total residuos de la demolición equivalentes a 293,72 Mg y 180,7 m³.
- Área de construcción en m², que corresponde a 216,98 m².

A partir de estos datos se calcularos las tasas de generación específicas para las diferentes fuentes de residuos de construcción y demolición consideradas (ver Tabla 4).

Tabla 4: Tasa de generación específica en unidad de masa y volumen, desechos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba.

Unidad de Medida	Tasa de generación específica		
	Construcción	Demolición (Muros de ladrillo)	Demolición (Muros de adobe)
Masa [Mg/m ²]	0,192	0,929	1,354
Volumen [m ³ /m ²]	0,093	0,849	0,833

4.4 Proyección de generación de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba 2016 - 2030

4.4.1 Proyección de generación de residuos de construcción

Los residuos generados en la actividad de construcción fueron proyectados de acuerdo al consumo de cemento en Cochabamba expresado en toneladas (Mg), una vez recopilados los datos correspondientes a los años 2004 al 2014 (Instituto Nacional de Estadística) se procedió a calcular el porcentaje de crecimiento anual.

Una vez obtenido el porcentaje de crecimiento se procedió a realizar la estimación de los metros cuadrados (m²) a ser construidos del año 2005 al 2014, se tomó una relación directamente proporcional siendo que en la medida en la que el consumo del cemento incrementa también lo harán las solicitudes de construcciones la ciudad, todos estos cálculos evidenciados en la Tabla 5.

Para la realización de la proyección de metros cuadrados (m²) a ser construidos entre los años 2016 al 2030, se obtuvo la Figura 15, que nos muestra la relación de los metros cuadrados a ser construidos entre los periodos del 2004 al 2014, esta misma nos da una fórmula de regresión lineal que es:

$$y = 50.041,72x - 99.904.154,51$$

A través de esta ecuación se realizó la estimación de los metros cuadrados a ser construidos del 2016 al 2030, tales evidenciados en las Tabla 6.

Tabla 5: Metros cuadrados aprobados en la ciudad de Cochabamba, 2004 - 2014.
Fuente (Instituto Nacional de Estadística)

Año	Consumo de cemento en Cochabamba Mg/año	Crecimiento %	Superficie Construida m ²
2004	268.410*		390.478,00*
2005	291.976*	8,78	424.761,39
2006	324.792*	11,24	472.501,51
2007	360.838*	11,10	524.940,58
2008	399.740*	10,78	581.534,50
2009	444.706*	11,25	646.950,22
2010	457.067*	2,78	664.932,78
2011	516.316*	12,96	751.127,15
2012	503.794*	(-2,43)	732.910,37
2013	578.445*	14,82	841.511,30
2014	614.935*	6,31	894.596,29

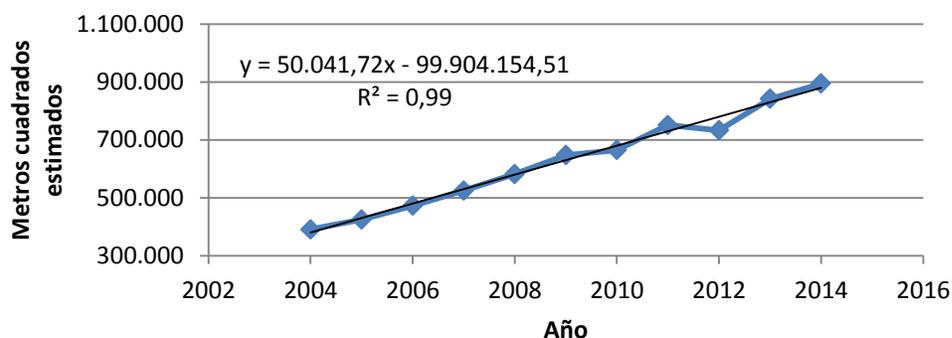


Figura 11. Regresión lineal, metros cuadrados construidos 2004 - 2014

Tabla 6: Proyección de residuos de construcción a 15 años en la ciudad de Cochabamba [Mg/año] y [m³/m²]

AÑO	Superficie construida estimada m²	RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN GENERADOS (Mg/año)	RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN GENERADOS m³/año
2016	979.953,01	188.542,96	91.233,63
2017	1.029.994,73	198.170,99	95.892,51
2018	1.020.036,45	207.799,01	100.551,39
2019	1.130.078,17	217.427,04	105.210,28
2020	1.180.119,89	227.055,07	109.869,16
2021	1.230.161,61	236.683,09	114.528,05
2022	1.280.203,33	246.311,12	119.186,93
2023	1.330.245,05	255.939,15	123.845,81
2024	1.380.286,77	265.567,17	128.504,70
2025	1.430.328,49	275.195,20	133.163,58
2026	1.480.370,21	284.823,23	137.822,47
2027	1.530.411,93	294.451,26	142.481,35
2028	1.580.453,65	304.079,28	147.140,23
2029	1.630.495,37	313.707,31	151.799,12
2030	1.680.537,09	323.335,34	156.458,00
TOTAL	19.953.675,75	3.839.087,21	1.857.687,21

4.4.2 Proyección de generación de residuos de demolición

Los residuos generados en la actividad de demolición fueron proyectados de acuerdo a los m² demolidos, se dedujo que la relación de los m² demolidos con los m² a ser construidos es la siguiente:

De 10 permisos de construcción aprobados, para los cuales se necesitó realizar una demolición, 5 duplicarían su tamaño, 4 lo triplicarían y simplemente 1 cuadruplicaría o en mayor magnitud la estructura (Cavero, 2016); es de esta manera que se puede deducir que el tamaño promedio de crecimiento es de 2,6 veces, esto obtenido de la siguiente manera:

De esta manera, se procedió estimar los m² que serán demolidos, que a la vez se dividirán en dos grupos: Metros cuadrados demolidos (ladrillo) que corresponden un 30% de las demoliciones, por tanto el 70% restante corresponderá a los metros cuadrados demolidos (adobe) (Cavero, 2016).

Tabla 7: Proyección de residuos de demolición a 15 años en la ciudad de Cochabamba [Mg/año]

AÑO	Superficie Total Demolida m ²	Construcción de Ladrillo			Construcción de adobe		
		Superficie demolida m ²	Residuos generados Mg/año	Residuos Generados m ³ /año	Superficie demolida m ²	Residuos generados Mg/año	Residuos Generados m ³ /año
2016	376.905,00	113.071,50	105.043,42	95.997,70	263.833,50	357.230,56	219.773,31
2017	396.151,82	118.845,55	110.407,51	100.899,87	277.306,27	375.472,69	230.996,13
2018	415.398,63	124.619,59	115.771,60	105.802,03	290.779,04	393.714,83	242.218,94
2019	434.645,45	130.393,64	121.135,69	110.704,20	304.251,82	411.956,96	253.441,76
2020	453.892,27	136.167,68	126.499,77	115.606,36	317.724,59	430.199,09	264.664,58
2021	473.139,08	141.941,72	131.863,86	120.508,52	331.197,36	448.441,22	275.887,40
2022	492.385,90	147.715,77	137.227,95	125.410,69	344.670,13	466.683,35	287.110,22
2023	511.632,71	153.489,81	142.592,04	130.312,85	358.142,90	484.925,48	298.333,03
2024	530.879,53	159.263,86	147.956,12	135.215,02	371.615,67	503.167,62	309.555,85
2025	550.126,34	165.037,90	153.320,21	140.117,18	385.088,44	521.409,75	320.778,67
2026	569.373,16	170.811,95	158.684,30	145.019,34	398.561,21	539.651,88	332.001,49
2027	588.619,97	176.585,99	164.048,39	149.921,51	412.033,98	557.894,01	343.224,31
2028	607.866,79	182.360,04	169.412,47	154.823,67	425.506,75	576.136,14	354.447,12
2029	627.113,60	188.134,08	174.776,56	159.725,83	438.979,52	594.378,27	365.669,94
2030	646.360,42	193.908,13	180.140,65	164.628,00	452.452,29	612.620,41	376.892,76
TOTAL	7.674.490,67	2.302.347,2	2.138.880,6	1.954.692,8	5.372.143,5	7.273.882,3	4.474.995,5

4.5 Propuesta del Sistema de Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición

En esta sección se tiene como objetivo la propuesta de un “Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición”, dando especial énfasis y detallando las propuestas de revalorización.

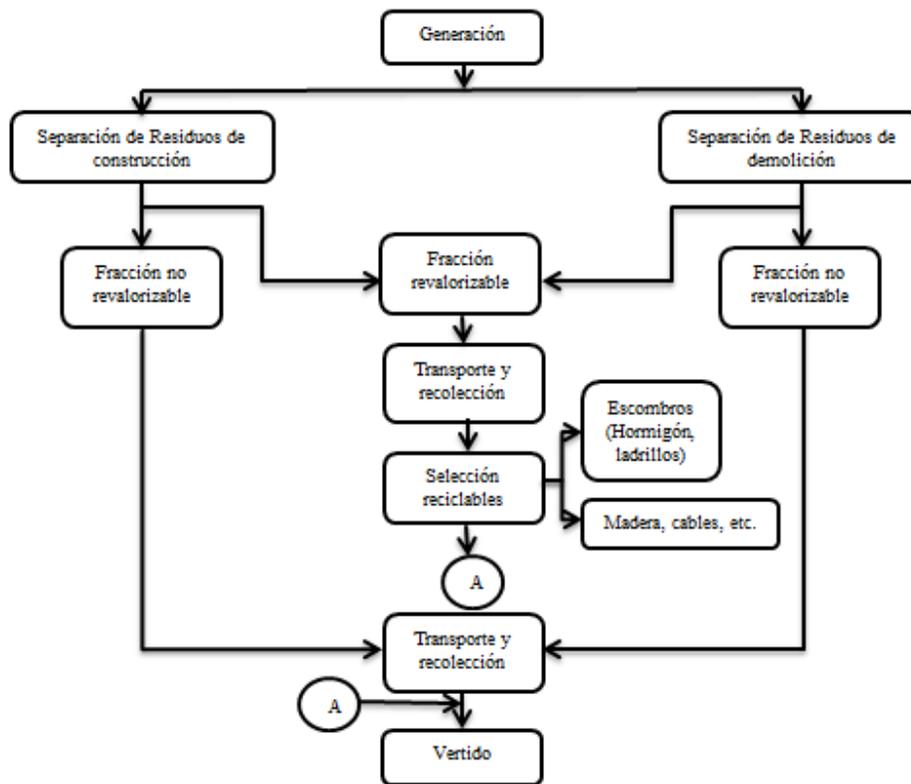


Figura 12. Esquema general del Sistema de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición propuesto para la ciudad de Cochabamba.

4.5.1 Propuesta para la reducción de la generación de residuos de construcción y demolición

Una vez estimados los valores de generación de residuos de construcción y demolición, se ve necesaria la propuesta que permita minimizar dichos residuos.

Para la minimización de los residuos generados en la construcción, se propone realizar un control y seguimiento de todos los materiales a ser utilizados durante toda la etapa de la construcción, para esto la persona u organización encargada de la

actividad deberá ser consciente de los materiales que podrán ser reusados, reciclados y/o aprovechados.

Para la minimización de los residuos generados en la demolición existen varias opciones, esto dependerá esencialmente del generador, una buena opción es separar los materiales para generar material de relleno de calidad con los restos de adobe y arena, los otros materiales pueden ser dispuestos en un vertedero para residuos de construcción o ser utilizados como materia prima para fabricar otros productos que serán descritos más adelante.

4.5.2 Propuesta del sistema de almacenamiento y manipulación en origen, de los residuos de construcción y demolición

La separación y posterior almacenamiento de residuos de construcción y demolición es una etapa muy importante para el sistema de gestión de dichos residuos, ya que tiene como fin el facilitar el aprovechamiento de estos residuos, es por tal motivo que se propone:

En la **construcción**, la implementación de contenedores provisorios dentro de la obra para los residuos que esta actividad produzca, una vez conocida la composición de los residuos de construcción, se propone que dichos contenedores provisorios estén divididos en los siguientes grupos:

- Agregados (Arena y Grava).
- Materiales cerámicos (Ladrillos, tejas, etc.)
- Cemento.
- Yeso y otros.

Cabe recalcar que de estos residuos se deja de lado a la tierra de excavación siendo que esta podrá o no, formar parte del relleno para la misma construcción.

El *dimensionamiento* de los contenedores será muy variable de acuerdo al área de la construcción y a la cantidad de residuos que vaya a ser reutilizada por la parte generadora, pero en un caso general se recomienda la implementación de contenedores de 200 l, como se ven en la Figura 13, para los residuos de menor volumen y de mayor valor como restos de metal, cables de cobre, vidrios, madera y otros. El material del contenedor puede ser de plástico y además debe contar con ruedas para facilitar su movimiento y traslado, se recomienda que estos contenedores estén situados en un lugar de fácil acceso y que la vía de acceso este despejada.

En el caso que los residuos sean de gran magnitud se sugiere un contenedor como se observa en la Figura 14. Se pueden instalar varios de estos contenedores para separar diversos tipos de residuo voluminoso como arena, piedra, tierra, restos

de ladrillo, etc. Conviene que estos residuos sean separados en el origen pues esto permite reutilizarlos con más facilidad. En caso de no contar con contenedores, se puede simplemente armar pilas con estos residuos que estén separados en un lugar accesible de la zona de construcción/demolición.

Será de total responsabilidad de la persona u organización encargada de la construcción, el correcto funcionamiento y aprovechamiento de este sistema, ya que dependerá de la velocidad con la que se avance con la construcción de la estructura, para determinar la frecuencia con la que se deberá contratar a un servicio de recolección de dichos residuos.



Figura 13. Contenedor propuesto de residuos de construcción para la ciudad de Cochabamba.

En la **demolición**, la implementación de contenedores móviles será de total responsabilidad del generador encargado de la demolición, para solicitar el servicio de préstamo dichos contenedores; se propone la adopción de esta modalidad de contenedores por parte de EMSA (Empresa Municipal de Servicios de Aseo), siendo que la cantidad de residuos generados en esta actividad son de gran magnitud se sugiere el *dimensionamiento* de estos contenedores en un rango de 4 a 12 m³, siguiendo el modelo de la Figura 14.



Figura 14. Contenedor propuesto de residuos de demolición para la ciudad de Cochabamba.

4.5.3 Propuesta del sistema de recolección y transporte, de los residuos de construcción y demolición

La fase de recolección y transporte estará constituida de tres sistemas básicos: Sistema de recolección, vehículo de transporte, e itinerarios de recolección, tales que son desarrollados a continuación.

En la **construcción**, al haber sido propuesta la utilización de contenedores provisorios de 200l, se propone como sistema de recolección la “Colecta selectiva de material reciclable”, ya que dichos contenedores estarían separados de acuerdo al tipo de residuos que contengan, este método facilita la recuperación de materiales además del reciclaje, como lado negativo podríamos mencionar el elevado costo de recolección y transporte. (Luján, 2011)

La selección del vehículo es dificultosa ya que la cantidad de residuos generados variará de una construcción a otra, se sugiere un camión liviano con capacidad máxima de 4.200 kg, como se observa en la Figura 15; y vehículos tipo volqueta de 6 a 8 m³ de capacidad para las fracciones más voluminosas y pesadas. Al estar separados de acuerdo a grupos previamente establecidos será necesario realizar algunas modificaciones en el vehículo para poder tener compartimentos que se adecuen a nuestras necesidades.



Figura 15. Vehículo propuesto para la recolección de residuos de construcción en la ciudad de Cochabamba

Los itinerarios de recolección serán variables y dependerán de la parte generadora, siendo que esta deberá recurrir a los servicios de una persona u organización que le brinde el servicio de transporte, se propone a EMSA (Empresa Municipal de Servicio de Aseo) como la encargada de realizar este servicio.

En la **demolición**, al haber sido propuesta la utilización de contenedores móviles en un rango de 4 a 12 m³, se propone como sistema de recolección la “Recolección de contenedores móviles” ya que dichos contenedores estarían ubicados a proximidades de la estructura que haya sido demolida.

El vehículo seleccionado deberá tener como principal característica el poseer un sistema de levantamiento para cargar los contenedores sobre el mismo

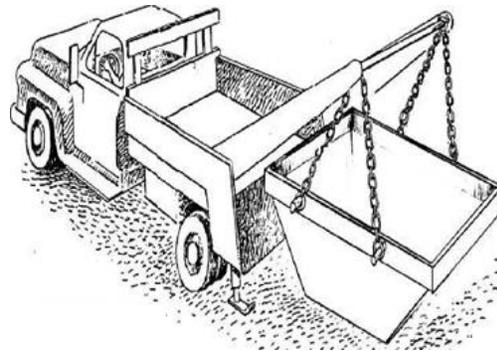


Figura 16. Vehículo propuesto para la recolección de residuos de construcción en la ciudad de Cochabamba con contenedor móvil.

Los itinerarios de recolección serán variables y dependerán de la parte generadora, siendo que esta deberá recurrir a los servicios de una persona u organización que le brinde el servicio de transporte, se propone a EMSA (Empresa Municipal de Servicio de Aseo Cochabamba) como la encargada de realizar este servicio.

4.5.4 Propuesta del sistema de procesamiento y transformación, de los residuos de construcción y demolición

En la literatura se pueden encontrar algunas opciones para el reaprovechamiento y reciclaje de algunos de los materiales que se generan en los residuos sólidos de la construcción, sin embargo no se tienen experiencias concretas en nuestro país del reaprovechamiento de estos residuos. Dos alternativas promisorias de reaprovechamiento son la utilización de hormigón de desecho para generar agregados o material de relleno para las capas subbase de carreteras. Otra alternativa es utilizar los residuos de ladrillo como aditivo para la fabricación de nuevos ladrillos o, si se lo muele a la granulometría adecuada, se lo puede utilizar como agregado de relleno o para cubrir superficies como chanchas de tenis.

Cabe especificar que para todas las opciones de revalorización propuestas requieren de una molienda previa de los materiales, por lo cual se vio de primordial importancia la implementación de un “Molino de bolas” como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Molino de bolas necesario para la propuesta de revalorización de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba.

A continuación se especifica las opciones de revalorización con las que se trabajó.

4.5.4.1 Propuesta de Revalorización N°1: Utilización de escombros como agregado para obtención de hormigón

Los resultados de caracterización de los residuos de demolición en la ciudad de Cochabamba muestran que el 77% en masa de dichos residuos corresponderán al hormigón.

Se propone recuperar y transformar la fracción de este tipo de residuos, utilizándolos como agregado para la obtención de hormigón. Una vez definidos los parámetros y realizados los ensayos se pudo llegar a los siguiente resultados.

- Consistencia

El primer análisis que se llevó a cabo fue el de consistencia a través del cono de Abrams, el ensayo puede ser observado en la Figura 18, y los resultados se observan en la Tabla 8.



Figura 18. Ensayo de “Cono de Abrams”

Tabla 8: Resultados del ensayo de Cono de Abrams

Tipo de Hormigón	Desplazamiento cm	Observaciones
H 18	7,2	Ninguna
H 21	7,0	Ninguna
H 18 (50-50 Arena- Escombro)	6,5	Para que se cumpla con el requisito de desplazamiento se aumentó aprox. 450 ml de agua.
H 18 (0-100, Arena- Escombro)	6,1	Para que se cumpla con el requisito de desplazamiento se aumentó aprox. 980 ml de agua.

En los ensayos realizados con el hormigón que contenía al escombro molido sustituyendo a la arena podemos observar que se tuvo contratiempos y que se tuvo que incrementar la cantidad de agua.

Cada litro de agua de amasado añadido demás a un hormigón equivale a una disminución de dos kg de cemento (Jiménez Montoya, 2000), siendo que estos incrementos de agua afectarán a la resistencia final.

- Resistencia

Este ensayo realizado en base a la normativa ISO 4012 Concrete - Determination of compressive strength of test specimens (ISO, 1978) .

Mediante la cual se pudo obtener los resultados de resistencia a la compresión, mostrados en la Tabla 9.



Figura 19. Prensa utilizada en el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 9: Resultados del ensayo a la compresión.

Nº de Ensayo	Tipo de Ho.	Especificación	Resistencia obtenida a 7 días (kg/cm ²)	Resistencia final (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
1	H18	Mezcla normal	131,05	181,92	185,23 + - 4,12
2	H18	Mezcla normal	132,50	183,93	
3	H18	Mezcla normal	136,76	189,84	
1	H21	Mezcla normal	143,97	199,85	207,64 + - 7,47
2	H21	Mezcla normal	150,07	208,33	
3	H21	Mezcla normal	154,70	214,75	
1	H18	100% reciclado en lugar de arena	55,94	77,66	79,94 + - 4,66
2	H18	100% reciclado en lugar de arena	61,45	85,30	
3	H18	100% reciclado en lugar de arena	55,36	76,85	
1	H18	50% reciclado en lugar de arena	81,69	113,40	110,69 + - 3,78
2	H18	50% reciclado en lugar de arena	80,90	112,30	
3	H18	50% reciclado en lugar de arena	76,63	106,37	

Como se puede observar en ambos ensayos que contenían al escombros molido se obtuvo resistencias por debajo de la dosificación con la que habían sido calculados.

Por tanto, se puede afirmar que la alternativa de reemplazar a la arena como material agregado en la dosificación del hormigón, no es una alternativa viable.

4.5.5 Propuesta de Revalorización N°2: Utilización de escombros en el proceso de fabricación de ladrillos

Los resultados de caracterización de los residuos de demolición en la ciudad de Cochabamba muestran que el 18% en masa de dichos residuos corresponderán al material cerámico (ladrillos, tejas, cerámica, etc.)

Se propone recuperar y transformar la fracción de este tipo de residuos, utilizándolos como materia prima para el proceso de fabricación de ladrillos.

Los ensayos realizados para verificar la viabilidad del uso de estos residuos dentro de la cadena productiva fueron de acuerdo a la NB 1211002 Ladrillos cerámicos – Métodos de ensayo (IBNORCA, 2013):

- Resistencia a la compresión.
- Absorción de agua.

Resistencia a la compresión

Para este ensayo se procedió a realizar muestras con intervalos de 1% en peso de composición del escombro reciclado (0% - 10%), y para cada una de las combinaciones se produjo 3 muestras, es decir, un total de 33 muestras.

Para este ensayo se usó una prensa mecánica, que se observa en la Figura 20 y los resultados mostrados en la Tabla 10, para este procedimiento las muestras se ensayaron centrándolas con respecto a la rótula y de manera que la carga se aplicó normalmente a las caras mayores. (IBNORCA, 2013)

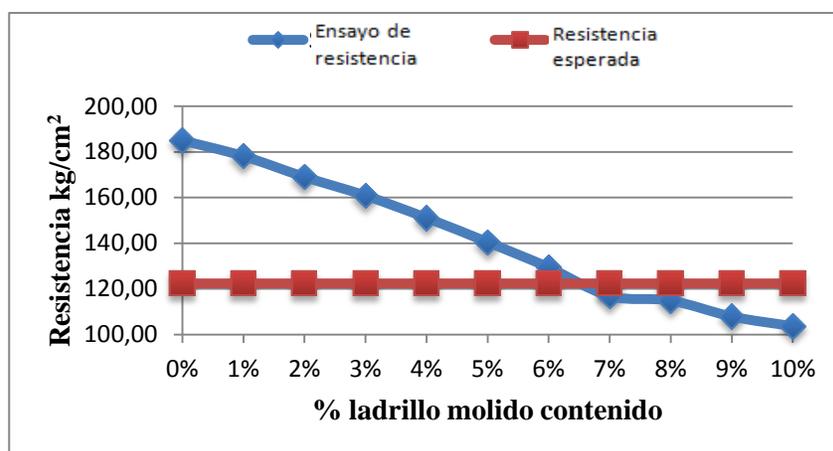


Figura 20. Prensa mecánica utilizada en el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 10: Resultados ensayo resistencia a la compresión.

% ladrillo molido	Resistencia a la Compresión (Rc) kg/cm ²			Promedio
	N° de Ensayo			
	1	2	3	
0%	185,23	182,34	187,50	185,02
1%	177,25	176,04	181,19	178,16
2%	167,08	171,93	168,12	169,04
3%	159,05	160,18	163,31	160,85
4%	151,16	150,1	152,03	151,10
5%	141,15	178,61	181,86	167,21
6%	130,26	128,62	129,33	129,40
7%	118,23	115,56	116,78	116,86
8%	118,06	116,29	110,36	114,90
9%	109,94	106,02	107,69	107,88
10%	103,08	105,6	102,26	103,65

Se puede observar que la cantidad de ladrillo molido empleado afecta directamente a la resistencia a la compresión de los ladrillos finales, se puso como límite inferior el que los ladrillos alcancen una clasificación de “Clase B” que corresponde a 122,4 kg/cm², es por tal motivo que se verificó que el ladrillo que cumple con estas expectativas es el que contiene un 6% de ladrillo molido en su composición como lo muestra la Figura 21, dato a ser corroborado con el siguiente ensayo.

**Figura 21.** Ensayo de resistencia a la compresión.

Absorción de Agua

Para este ensayo se procedió a realizar muestras con intervalos de 1% en peso de composición del escombro reciclado (0% - 10%), y para cada una de las combinaciones se produjo 3 muestras es decir un total de 33 muestras.



Figura 22. Ensayo de absorción de agua.

Para este procedimiento, una vez conocidos los pesos de las muestras en seco, se procedió a sumergir en agua destilada a temperatura ambiente durante 24 horas, una vez transcurrido el tiempo establecido se retira del agua y se seca con un paño y se prosigue a pesar cada muestra (IBNORCA, 2013). Los resultados obtenidos de dicho ensayo son los descritos a continuación:

Tabla 11: Ensayo de absorción de agua.

% ladrillo molido	Absorción de agua (AA) (%)			
	N° de Ensayo			Promedio
	1	2	3	
0%	13,31	13,23	13,11	13,22
1%	14,69	14,50	14,35	14,51
2%	14,32	14,79	14,65	14,59
3%	14,18	14,62	14,87	14,56
4%	14,44	14,38	14,59	14,47
5%	15,20	15,76	15,83	15,60
6%	13,56	13,78	13,76	13,70
7%	15,27	15,15	15,75	15,39
8%	13,81	13,97	14,02	13,93
9%	13,46	13,67	13,40	13,51

10%	14,96	15,06	15,01	15,01
-----	-------	-------	-------	-------

Como se puede observar, la concentración porcentual en peso del ladrillo molido como materia prima para la fabricación de nuevos ladrillos, no presenta una alteración al parámetro de absorción de agua, que además se encuentra bajo norma. Como se hace evidente el ladrillo que cumplió con todos los requerimientos respecto a los ensayos realizados es el que se componía en un 6% de ladrillo molido, es por tal motivo que representa una buena oportunidad de revalorización, siendo que esta reemplazaría en un porcentaje a las materias primas utilizadas para la fabricación de ladrillos.

4.5.5.1 Otras Propuestas de Revalorización

En este punto se dará a conocer otras propuestas de revalorización de manera conceptual, siendo que para las mismas serán necesarios estudios complementarios.

Utilización de ladrillo molido como base para recubrimiento superficial

Estos son normalmente utilizados en áreas públicas o de esparcimiento, donde el principal objetivo es tener un área en el cual no se genere barro debido a las lluvias.

- El uso de ladrillo molido para el recubrimiento superficial de ciertas áreas es común en el caso de las canchas de tenis
- La utilización de este tipo de residuo también es evidente en parques y áreas de recreación públicas.

Para este fin será necesario estudiar las características del ladrillo molido, que cada una de las alternativas requiera, como ser la granulometría y factores que afecten en el rendimiento del mismo en el proyecto a ser utilizado.

Utilización de residuos de construcción y demolición molidos para relleno

Los residuos previamente tratados y de acuerdo a las exigencias que el proyecto lo requiera, pueden funcionar como material de relleno.

Este puede ser utilizado con varios fines como:

- Relleno de zanjas

Estas oportunidades de revalorización estarán sujetas a estudios, de acuerdo a los casos y el requerimiento que este proyecto tenga.

Esta propuesta va enfocada al hecho, que gran parte de la composición de los residuos de demolición están compuestos por “adobe”, material prácticamente considerado como tierra, además de la tierra proveniente de las excavaciones para

las construcciones, siendo que estos residuos podrían resultar ideales como materiales de relleno.

4.5.6 Propuesta del sistema de disposición final, de los residuos de construcción y demolición

Previamente analizados las opciones de revalorización, y teniendo en cuenta que en la ciudad de Cochabamba son grandes las cantidades de residuos generados por las actividades de construcción y demolición, se debe realizar la propuesta para la disposición final de los residuos que no sean aptos para su revalorización. Se deberá trabajar de manera conjunta con EMSA, para la planificación estratégica y económica de la implementación de un vertedero para este tipo de residuos. Como propuesta que se empleará para la disposición final de los residuos de construcción y demolición, se encuentra la utilización de los mismos como parte de rellenos tipo terraplén (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2010), para este motivo se deberá realizar un tratamiento previo y seleccionar los residuos aptos para su empleo en este tipo de sistema, como se aprecia en la Figura 23.

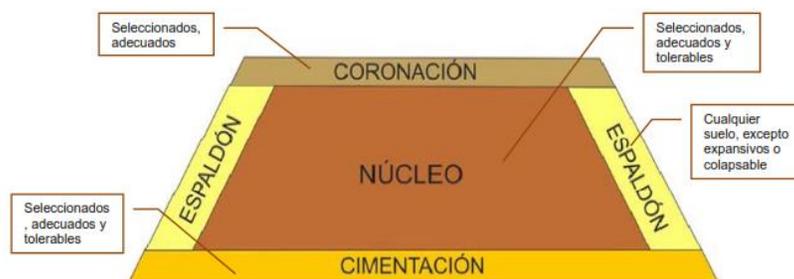


Figura 23. Relleno tipo terraplén propuesto para los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Cochabamba.

Para la implementación de este sistema se deberá tomar en cuenta la cantidad de residuos desviada para su revalorización, para tal motivo se realizó la estimación del porcentaje a ser reutilizado en 15 años, tal como se muestra a continuación.

Tabla 12: Total residuos a ser vertidos en el periodo de 15 años en la ciudad de Cochabamba.

Año	Residuos Generados m ³ /año	Desvío m ³	% desvío	Total residuos vertidos m ³
2016	407.004,64	8.377,01	2,06	398.627,63
2017	427.788,51	17.609,57	4,12	410.178,94
2018	448.572,36	27.697,68	6,17	420.874,68

2019	469.356,24	38.641,35	8,23	430.714,89
2020	490.140,10	50.440,56	10,29	439.699,54
2021	510.923,97	55.771,71	10,92	455.152,26
2022	531.707,84	61.362,57	11,54	470.345,27
2023	552.491,69	67.213,15	12,17	485.278,54
2024	573.275,57	73.323,45	12,79	499.952,12
2025	594.059,43	79.693,47	13,42	514.365,96
2026	614.843,30	86.323,20	14,04	528.520,10
2027	635.627,17	93.212,65	14,66	542.414,52
2028	656.411,02	100.361,81	15,29	556.049,21
2029	677.194,89	107.770,69	15,91	569.424,20
2030	697.978,76	115.439,29	16,54	582.539,47
TOTAL	8.287.375,49	983.238,16		7.304.137,33

Para este motivo se utilizó la lógica que el primer año simplemente se reaprovecharía un 20% de los residuos de ladrillos, tejas y cerámicos, incrementando anualmente en 20% llegando al quinto año a su totalidad; a partir del sexto año se procederá al reaprovechamiento de los residuos procedentes de hormigón en cantidades anuales del 5%, llegando al año quince con una cantidad de reaprovechamiento de 50%. Se hace evidente la disminución de la cantidad de residuos gracias a las opciones de aprovechamiento de los mismos, esto se evidencia en la Figura 24 que nos muestra tanto la cantidad de residuos generada por año como la cantidad de residuos a ser vertidos una vez realizado el aprovechamiento.

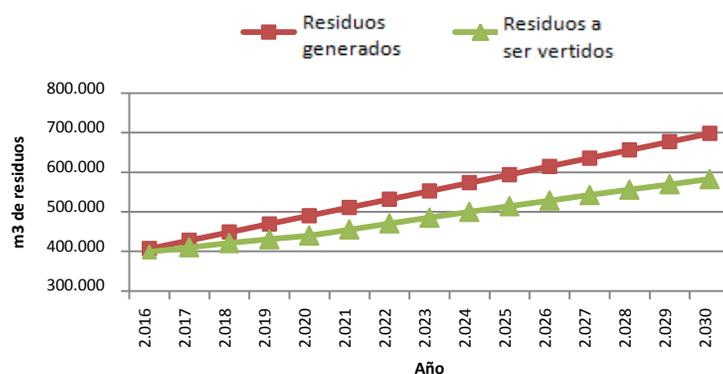


Figura 24. Residuos generados - Residuos a ser vertidos.

Cabe recalcar que este sistema deberá ser analizado a profundidad por las características de los residuos de construcción y demolición, siendo el mayor de los

inconvenientes la gran cantidad de generación de los mismos alcanzando un valor de 7.304.137,33 m³ en un periodo de 15 años, y la no disponibilidad de un vertedero apropiado en la ciudad de Cochabamba, siendo que una vez asumida la altura máxima de un vertedero para estos residuos en 15 m, se requerirá de un área para el vertedero de 486.942 m² (4,87 ha).

5 Conclusiones

La caracterización de los residuos de construcción y demolición fue realizada a través de una “Vivienda tipo” en la cual se pudo caracterizar la cantidad y composición de los residuos generados en la construcción de esta estructura y de manera separada de la demolición de la misma.

Los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos de construcción, evidencia que son en gran parte formados por los residuos de la excavación que alcanza un porcentaje de 72,71%, además existe gran cantidad de residuos a causa del mal manejo de los materiales a ser utilizados, siendo que la arena y grava alcanzan un 20,09% en masa del total de los residuos generados. En un porcentaje volumétrico los residuos de excavación alcanzan un valor de 68,35% y en el caso de la arena un valor de 12,53%, y 8,27% en el caso de los ladrillos.

La caracterización de los residuos de demolición tiene una gran fracción de hormigón y ladrillos alcanzando valores de 76,9% y 17,6% en masa respectivamente. En un porcentaje volumétrico generó valores de 53% en hormigón y 31,4% que corresponde a los ladrillos y demás cerámicos. Para el caso de la demolición de una casa con muros de adobe, el adobe alcanza un valor de 63,6% del total de los residuos, seguido de la arena con un valor de 30,33% en masa. En un porcentaje volumétrico este generó valores de 65% de adobe y 18,2% en arena.

Los datos de la proyección de generación de residuos de construcción, indican un valor de 3,84 10⁶ Mg (1,86 10⁶ m³) para el año 2030; para los residuos generados en la demolición para el año 2030 se tiene los valores de 2,14 10⁶ Mg (1,95 10⁶ m³), para demoliciones con muros de ladrillo, y 7,27 10⁶ Mg (4,47 10⁶ m³) para el caso de muros de adobe.

Como parte del alcance de este proyecto, se elaboró una propuesta de un sistema de gestión de los residuos de construcción y demolición, enfocado en las estrategias de reducción y revalorización de estos residuos.

Se realizó la propuesta para la reducción de generación que consiste en realizar un control y seguimiento en el caso de los residuos de construcción, en cambio en los residuos generados en la demolición dependerá plenamente de la parte generadores. También existen oportunidades de reutilización de los residuos

generados como material de relleno en las mismas construcción o en construcciones vecinas; el material de excavación de algunas zonas de la ciudad es arcilla de calidad adecuada para producir ladrillo artesanal, los productores de ladrillo compran esta arcilla.

La primera opción de revalorización, utilización de escombros como agregado para obtención de hormigón, resultó ser una alternativa inviable, puesto que no cumplió con los requisitos de calidad del producto.

La segunda opción de revalorización, utilización de escombros en el proceso de fabricación de ladrillos, resultó ser una alternativa viable, en el caso del ladrillo con una composición de 6% de ladrillos molidos, cumpliendo con los requisitos establecidos para cada uno de los ensayos realizados.

Además del estudio de las dos alternativas de revalorización, se propusieron otras alternativas alternas que deberán ser estudiadas para su posible implementación, sobre todo en cuanto a costos se refiere pues requieren de procesos de transformación de los materiales como una molienda fina.

Para el sistema de almacenamiento y manipulación, se propone la implementación de contenedores de 200 l en el caso las fracciones de menor masa y volumen de los residuos de construcción, mientras que para los residuos de demolición se deberá contar con el servicio externo de contenedores de 4 a 12 m³;

En cuanto al sistema de recolección y transporte, se proponen vehículos adecuados al sistema de almacenamiento en origen; siendo que para los residuos de construcción se sugiere el uso de un camión liviano para las fracciones ligeras, mientras que para las fracciones más voluminosas y pesadas se proponen camiones volquete de 6 a 8 m³ de capacidad, en algunos casos será necesario un vehículo con sistema de levantamiento de contenedores.

Como propuesta para la disposición final de los residuos de construcción y demolición se trabajó la idea de utilizar los mismos como parte de rellenos tipo terraplén, para el mismo se procedió a hacer el cálculo estimativo de la cantidad volumétrica m³ de los residuos que serían vertidos en el lapso de 15 años, dicho valor alcanzó la cifra de 7.304.137,3 m³, que deberán tener un área para su vertido final de aproximadamente 4,87 ha. Dichos cálculos fueron realizados tomando en cuenta el desvío por revalorización de ciertos residuos que componen a los residuos de construcción y demolición.

Referencias

- [1] CADECO. (2015-2016). Precios unitarios de referencia para la construcción.
- [2] Cavero, A. (2016). (R. Vargas, Entrevistador)

-
- [3] Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (Diciembre de 2010). CEDEX. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/>
- [4] Estado Plurinacional de Bolivia, Reglamento de la Ley N° 1333. (1992). REGLAMENTACIÓN DE LA LEY N° 1333 DEL MEDIO AMBIENTE. REGLAMENTO DE GESTIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS. BOLIVIA.
- [5] IBNORCA. (Noviembre de 1996). Residuos sólidos- Determinación de parámetros de diseño sobre residuos sólidos municipales. Norma Boliviana 743. Bolivia.
- [6] IBNORCA. (10 de Mayo de 2013). NB 1211002 Ladrillos cerámicos - Métodos de ensayo. Bolivia.
- [7] Instituto Nacional de Estadística. (s.f.). Permisos de construcción aprobados. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de <http://webine.ine.gob.bo/ine/content/construcci%C3%B3n>
- [8] ISO. (1978). ISO 4012 Concrete - Determination of compressive strength of test specimens .
- [9] Jiménez Montoya, P. (2000). Hormigón Armado. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- [10] Luján, M. (2011). Sistemas de recolección y transporte de Residuos Solidos. Cochabamba, Bolivia.
- [11] Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2011-2015). Programa Plurinacional de Gestion Integral de Residuos Solidos. La Paz: s.e.
- [12] TCHOBANOGLOUS, T. (1998). Gestion Integral de Residuos Solidos. México: McGraw-Hill.