

## MODELO EMPÍRICO PARA EL CÁLCULO DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN OBRAS DE EDIFICACIÓN RESIDENCIAL

**<sup>1\*</sup> Villoria Sáez, Paola; <sup>1</sup>Del Río Merino, Mercedes; <sup>1</sup> Porras Amores, César; <sup>1</sup>San-Antonio González, Alicia**

**<sup>1</sup> Escuela Técnica Superior de Edificación (UPM)**

**Avenida Juan de Herrera, 6 28040 Madrid**

**e-mail: \*paola.villoria@upm.es**

### RESUMEN

Existen numerosos estudios que analizan distintos modelos de cuantificación de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación. Actualmente, es esencial conocer la cantidad de residuo generado en una obra para optimizar su gestión. Por lo tanto, cualquier herramienta que permita estimar los RCD generados en una edificación debe considerarse como una estrategia que ofrece soluciones reales en el ámbito de la sostenibilidad.

Sin embargo, los modelos desarrollados hasta ahora, sólo tienen en cuenta la superficie total construida del proyecto. En general, este parámetro ha sido ampliamente utilizado para la estimación de RCD, en zonas urbanas de alta densidad, como China o Hong Kong, donde las viviendas se venden por metros cuadrados. Sin embargo, otras regiones, como Europa, Estados Unidos o Australia, deben considerar otros parámetros, como el número de viviendas ya que generalmente las viviendas se venden por unidades. Por otro lado, diversas investigaciones previas destacan que la albañilería es la actividad que más residuo genera en una obra. Teniendo en cuenta esta cuestión, la cantidad de residuo de albañilería generado en dos obras diferentes con igual superficie, pero una diseñada con grandes viviendas y la otra con pequeños estudios, diferirá pues la ejecutada con pequeños estudios generará más residuo al tener más particiones interiores.

En consecuencia, el objetivo principal de esta comunicación es establecer un modelo para estimar los residuos generados, tanto en peso como en volumen, considerando la superficie total y el número de viviendas del proyecto. Para ello, se han analizado varias obras construidas en la Comunidad de Madrid. Los resultados obtenidos ofrecen dos fórmulas para estimar la cantidad, tanto en peso como volumen del RCD total generado en obras de nueva construcción.

En resumen, la metodología desarrollada en esta comunicación puede ayudar a optimizar y sistematizar la gestión de los RCD generados en obras residenciales, ayudando a los agentes de la construcción en el desarrollo de los Planes y Estudios de gestión de RCD de acuerdo con la legislación vigente.

**Keywords:** residuos de construcción y demolición; cuantificación; modelo de estimación; edificio residencial

## 1.- Introducción

España generó en 2012 alrededor de 26 millones de toneladas de RCD [1]. Aunque ahora la actividad de la construcción ha entrado en una fase de declive, debido a la crisis económica, la cantidad de RCD generado ha disminuido pero su gestión ha empeorado considerablemente, pues el vertido ilegal ha aumentado alrededor de un 20% [2].

Consciente de esta situación, los países europeos están poniendo en práctica políticas nacionales, así como diferentes medidas para prevenir los residuos que pueden ser evitables y promover medidas para aumentar el reciclaje y la recuperación [3]. En particular, el Real Decreto 105/2008 regula la producción y gestión de los RCD en España. El presente Real Decreto obliga a elaborar un Estudio de gestión de RCD (fase de diseño) y un Plan de gestión de RCD (fase de construcción) para cada proyecto. El Plan de gestión de RCD es específico para cada obra y se basa en Estudio de gestión de RCD. Debe incluir la siguiente información:

- Una estimación de la cantidad, en toneladas y en volumen, de los residuos generados durante las obras.
- Las operaciones de reutilización, valorización o eliminación final de los residuos.
- La localización en los planos de obra de todas aquellas instalaciones para el almacenamiento de residuos, su manipulación o cualquier otra actividad de gestión.
- El pliego de condiciones técnicas del proyecto de diseño, con respecto al almacenamiento, manipulación o cualquier otra operación de la gestión de los RCD.
- Una evaluación del coste previsto para la correcta gestión de RCD.
- Los RCD deben segregarse en fracciones cuando se genera un cierto volumen de residuo. Si se alcanza o supera este volumen y la segregación in situ no es posible debido a la falta de espacio físico, se debe contratar a un gestor externo autorizado para que certifique esa segregación.

Así, los nuevos Planes y Estudios de gestión de residuos promueven la minimización de residuos y su reciclaje, favoreciendo así la reducción del impacto ambiental de la construcción [4]. A pesar del alto potencial de valoración de los RCD, y de la existencia de diferentes modelos de gestión, a día de hoy, los profesionales siguen priorizando la eliminación definitiva en lugar del reciclaje o la reutilización [5]. De acuerdo con el segundo Plan Nacional de RCD 2007-2015 (II PNRCD), el porcentaje de RCD reciclado en España no llegó, incluso en el mejor de los casos, al 18% del total de residuos producidos [6].

Esta situación se debe principalmente al sistema de recogida de residuos utilizado en la construcción de edificios, habitualmente descentralizado y realizado por cada empresa subcontratada [7]. Esto significa que el principio de la reducción de residuos no se aplica en la práctica, ya que no se considera como una actividad en la planificación de la obra. Existe, por tanto, una importante falta de planificación e implementación de medidas que minimicen los residuos y fomentan su reciclaje [8, 9].

Sin embargo, las principales empresas de construcción están lentamente considerando cuestiones ambientales en su actividad, mediante la implementación de Sistemas de Gestión Ambiental (SGA) [10]. Dichos sistemas no se limitan a la legislación vigente, y buscan la aplicación de buenas prácticas medioambientales en sus obras. Aunque este hecho es una realidad para las grandes empresas de la construcción, todavía la gran mayoría de las empresas de la construcción (pequeñas y medianas empresas) tienen que adoptar esta tendencia [11]. Por lo tanto, los SGA

utilizados habitualmente deben dar un paso más e incluir no sólo procedimientos para la gestión de los RCD, sino también herramientas para su estimación, lo que ayudará a planificar una gestión adecuada de los RCD generados con el fin de lograr una construcción de obras con generación de residuos cero.

En este sentido, la preocupación por establecer indicadores que describan la cantidad de residuos generados --tanto en obras de nueva construcción como de demolición -- ha aumentado en los últimos años [12-15]. En general, la gran mayoría de estos análisis estiman la cantidad de residuos generados teniendo en cuenta la superficie total construida del proyecto [16]. Sin embargo, el número de viviendas del proyecto también debe ser un factor a tener en cuenta cuando se estima la generación de RCD. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es establecer una fórmula para estimar, tanto en peso como en volumen, la generación de RCD considerando dos variables: la superficie total construida del proyecto y el número de viviendas. Los resultados obtenidos en esta investigación ayudarán a desarrollar los documentos Plan y Estudio de gestión de RCD.

## 2.- Materiales y métodos

El estudio se centró en la cuantificación total de residuos generados en siete obras de nueva construcción llevadas a cabo por una empresa constructora española (tabla 1). Todos los proyectos tienen características constructivas similares siguiendo el tipo de construcción mediterránea tradicional: cimentación profunda con pilotes de hormigón, forjados unidireccionales, fachadas de ladrillo con espuma de poliuretano y particiones interiores de ladrillo o paneles de yeso laminado [17]. Las obras se nombraron con la letra "O" seguida del número de viviendas de la obra. Esto es, "O32" a la obra de menor tamaño (32 viviendas) y O226 a la de mayor (226 viviendas). Los proyectos con el mismo número de viviendas se han distinguido añadiendo al final una letra "A" o "B" (Tabla 1).

Obra	Nº viv	m <sup>2</sup> por viv	Superficie total construida (m <sup>2</sup> )	Tabiquería interior
O226	226	67	23569,00	Ladrillo cerámico
O192	192	89	17617,00	Panel del yeso laminado
O156	156	119	30759,68	Panel del yeso laminado
O105	105	105	20435,24	Ladrillo cerámico
O59	59	59	11045,30	Panel del yeso laminado
O32A	32	111	5983,46	Ladrillo cerámico
O32B	32	111	5983,46	Ladrillo cerámico

Tabla 1 "Características de las obras analizadas".

En definitiva, cuatro proyectos se construyeron usando particiones tradicionales de ladrillo cerámico y tres con placas de yeso laminado. Todas las obras tienen de 32 a 226 viviendas, de cinco a ocho plantas sobre rasante y dos o tres niveles subterráneos. Por otra parte, la relación entre la superficie total construida y el número de viviendas osciló entre 104,29 y 197,18 m<sup>2</sup>/vivienda, en todos los proyectos analizados.

En las obras seleccionadas se realizó una recogida de datos experimental utilizando los albaranes correspondientes a la salida del contenedor de la obra (albarán de servicio), así como el albarán emitido por el gestor de residuos una vez que el contenedor es pesado en la planta de reciclaje (albarán de admisión). Este método permitió identificar, a través de los datos reales sobre el terreno, el volumen y el peso del total de residuos generados diariamente en cada obra. En total, se

recogieron más de 8.000 datos de generación RCD, los cuales han sido procesados estadísticamente.

En primer lugar, se realizó un análisis preliminar de los datos de generación de RCD obtenidos y se comparó con cada variable estudiada: número de viviendas y superficie total (individualmente). Los resultados se muestran en cuatro gráficos XY relacionando tales cantidades con cada variable.

## 2.1.- Desarrollo de la fórmula para la estimación de RCD considerando dos variables

Para que ambas variables puedan ser comparadas en una misma escala de valores, se recurre a la ponderación de variables [18]. Para ello, es necesario obtener, para cada obra analizada, los factores ponderados para ambas variables: número de viviendas (*a*) y superficie total construida (*b*). El factor de ponderación se determina utilizando la ecuación 1.

$$VP_{x_n} = \frac{V_{x_n}}{\sum V_{x_n}} \quad (1)$$

Donde,

*x* es la variable analizada (número de viviendas “*a*” o superficie total construida “*b*”).

*n* es la obra analizada (*n* = 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7).

*V<sub>x<sub>n</sub></sub>*

 es el valor de la variable *x* para la obra analizada “*n*”.

*VP<sub>x<sub>n</sub></sub>*

 es el valor ponderado de cada variable *x* para la obra analizada “*n*”.

Utilizando la ecuación 1 se calculan siete factores de ponderación para cada variable objeto de estudio. En total se obtienen 14 factores de ponderación. Finalmente se calcula la relación entre los valores ponderados y la cantidad de RCD generado (en peso y volumen).

Posteriormente, es necesario establecer el valor de importancia de cada variable tendrá al final de la fórmula. Para ello, se realiza un análisis de regresión múltiple con los datos obtenidos de las siete obras de edificación seleccionadas, considerando como únicas variables independientes: el número de viviendas ponderado (*VP<sub>a<sub>i</sub></sub>*) y la superficie total construida ponderada (*VP<sub>b<sub>i</sub></sub>*).

Con el análisis de regresión se obtienen los valores de coeficientes de determinación (*R<sup>2</sup>*) que muestra la correlación entre los datos y el modelo propuesto. En este sentido, dada una serie aleatoria de la población de datos, correspondiente a los siete obras de construcción probados, las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión lineal resultante se describen con la ecuación 2:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + e_i \quad (2)$$

- *y<sub>i</sub>* es la cantidad de RCD estimado para la obra particular “*i*”.
- Los  $\beta$  representan los parámetros del modelo que indican como influyen en la variable dependiente “*y*” los cambios en cada una de las variables independientes “*x*” (*VP<sub>a<sub>i</sub></sub>* y *VP<sub>b<sub>i</sub></sub>*).
- *e<sub>i</sub>* es el error residual, siendo la diferencia entre los valores observados (*y<sub>i</sub>*) y los estimados por el modelo de la variable dependiente ( $\hat{y}_i$ ) (Ecuación 3).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3)$$

El valor de los coeficientes no estandarizados de la ecuación 2 ( $\beta$ ) no puede utilizarse para determinar la influencia relativa de cada variable sobre la cantidad de

RCD, ya que están medidos en escalas diferentes. Sin embargo, es posible utilizar los coeficientes estandarizados, los cuales sí permiten establecer la importancia relativa de las variables de entrada (número de viviendas y superficie total construida). Por lo tanto, el resultado obtenido en el análisis de regresión permite la determinación de las variables estadísticamente las que influyen en la estimación de del RCD generado en la construcción de edificios residenciales, la cuantificación de la influencia de cada variable independiente en la fórmula final para la estimación de residuos y la obtención de los factores ponderados corregidos ( $FP_C$ ).

Por último, se realizó una regresión polinomial para analizar la relación entre el factor de corrección ponderada ( $FP_C$ ) y la generación RCD, mediante el programa estadístico SPSS. Se obtiene la ecuación de la curva más cercana a los datos utilizados. La eficiencia de la curva de ajuste propuesto ha sido probado con un nivel de confianza del 95% ( $p < 0,05$ ). Esta ecuación permite estimar la cantidad de RCD generada una vez que se conoce el factor ponderado corregido de la obra. Asimismo, se comprobó la desviación existente entre los valores obtenidos con el modelo y los obtenidos en otros estudios o proyectos con el fin de probar la validez del modelo y mostrar su utilidad en contraste con otros estudios. Los resultados no se comparan con los datos de otros países debido a que las características de construcción varían de una región a otra.

### 3.- Resultados y discusión

Las cantidades de RCD obtenidas con el análisis experimental se muestran en la figura 1. En general, hay una disminución en el total de RCD generado, tanto en peso como en volumen, a medida que disminuye el número de viviendas.

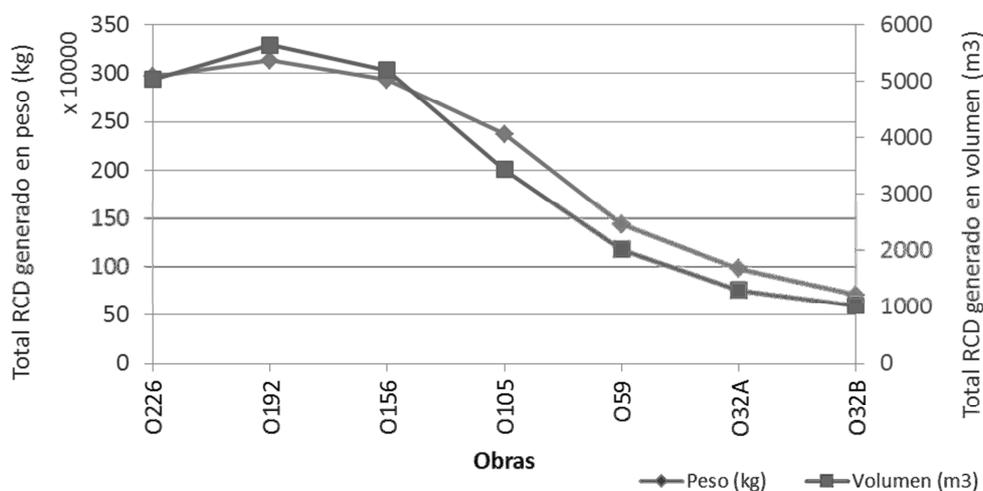


Fig. 3 “Cantidad en peso y volumen de RCD total generado en cada una de las obras analizadas”

No obstante, existe una pequeña desviación entre las obras O32A y O32B, las cuales tienen exactamente las mismas características pero fueron construidas por equipos de obra diferentes. En este sentido, se puede alcanzar, en función de la gestión llevada a cabo por el equipo de obra, una desviación de alrededor del 21% en peso. Este factor también puede explicar la otra pequeña desviación encontrada (alrededor del 11%) al comparar la generación de RCD en las obras O226 y O192.

Como puede verse a partir de los resultados de la Fig 2, ya que el número de viviendas y la superficie total de los aumentos de los proyectos, mayores cantidades de residuos que se generan. La figura 2 muestra una tendencia irregular en la generación de RCD. En concreto, las obras O226 y O156 generan menos residuo a

pesar de tener el mayor número de viviendas y superficie total construida, respectivamente. Esta irregularidad puede deberse al ratio superficie total construida/número de viviendas. Pues la obra O226 tiene la relación más baja de entre todos los proyectos analizados ( $104,29 \text{ m}^2/\text{viv}$ ) y la obra O156 la máxima ( $197,18 \text{ m}^2/\text{viv}$ ). Por lo tanto, el modelo propuesto se limita a: proyectos de hasta 226 viviendas,  $30759,68 \text{ m}^2$  de superficie total y una relación superficie total construida/número de viviendas entre  $104,29 \text{ m}^2/\text{viv}$  y  $197,18 \text{ m}^2/\text{viv}$ .

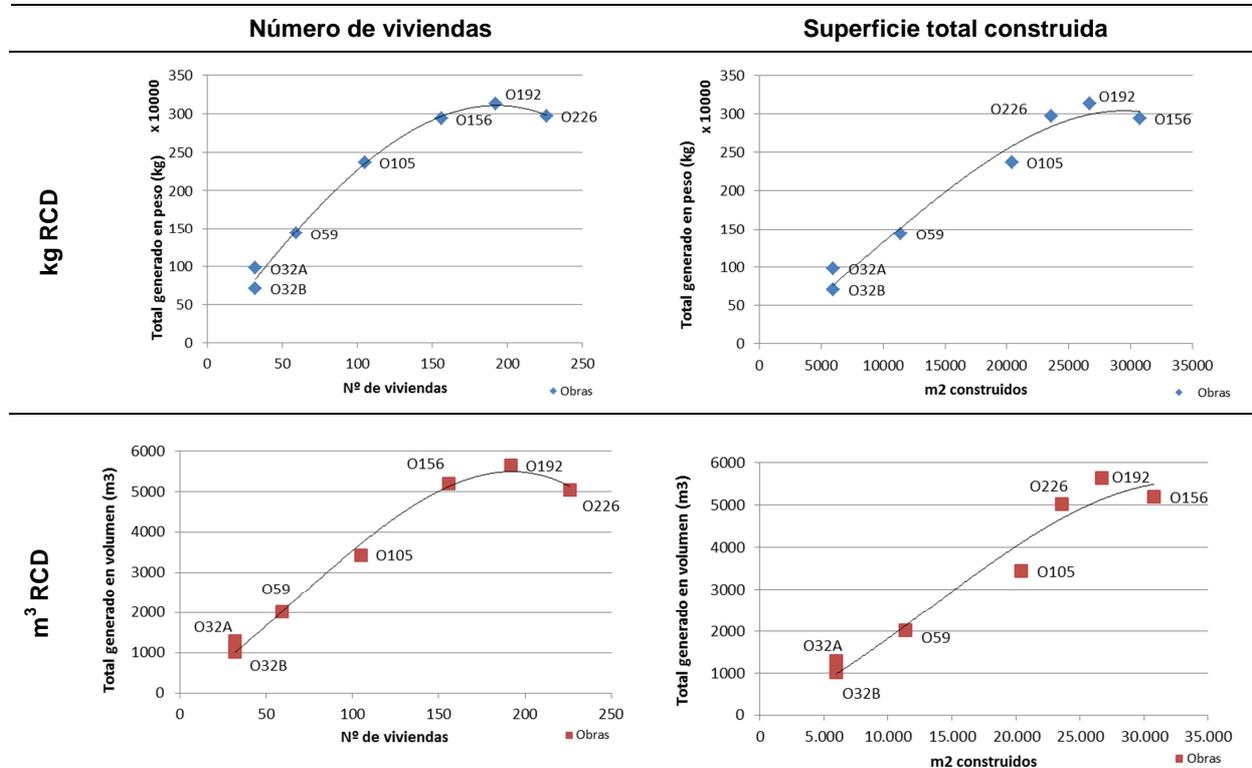


Fig. 4 “Relación entre la cantidad de RCD generado y cada variable independiente analizada”.

### 3.1. Desarrollo de la fórmula para el cálculo del RCD generado

La Tabla 2 muestra los valores de las dos variables independientes de las siete obras analizadas ( $V_{a_n}$  y  $V_{b_n}$ ), así como sus respectivos valores ponderados calculados con la ecuación 1. Estos factores ponderados permiten comparar ambas variables independientes en una misma escala de valores.

Obra (n)	$V_{a_n}$ [und]	$V_{b_n}$ [m <sup>2</sup> ]	Factor ponderado ( $VP_n$ )		Factor ponderado corregido ( $FP_c$ )	
			$VP_{a_n}$	$VP_{b_n}$	Peso	Volumen
O226	226	23569,01	0,282	0,189	0,176	0,182
O192	192	26691,63	0,239	0,214	0,181	0,183
O156	156	30759,68	0,195	0,246	0,188	0,185
O105	105	20435,24	0,131	0,164	0,133	0,131
O59	59	11395,71	0,074	0,091	0,079	0,078
O32	32	5983,46	0,040	0,048	0,044	0,043
O32	32	5983,46	0,040	0,048	0,044	0,043
Total $V_{x_i}$	802	124818,19				

Tabla 2 “Factores de ponderación y factores de ponderación corregidos para cada obra analizada”.

A partir de los resultados de la tabla 2 se establece una ecuación que permite calcular el valor ponderado de cada variable en una obra cualquiera ( $i$ ), una vez conocido el número de viviendas (ecuación 4) y la superficie total construida (ecuación 5).

$$VP_{a_i} = \frac{Va_i}{\sum Va_n + Va_i} = \frac{Va_i}{802 + Va_i} \quad (4)$$

$$VP_{b_i} = \frac{Vb_i}{\sum Vb_n + Vb_i} = \frac{Vb_i}{124818.19 + Vb_i} \quad (5)$$

Siendo,

$Va_i$  el n<sup>o</sup> de viviendas de la obra  $i$ .

$Vb_i$  la superficie construida en m<sup>2</sup> de la obra  $i$ .

$VP_{a_i}$  el factor de ponderación correspondiente al n<sup>o</sup> de viviendas.

$VP_{b_i}$  el factor de ponderación correspondiente a la superficie construida.

### 3.1.1. Factores ponderado corregido (FP<sub>c</sub>)

Los resultados del modelo de regresión lineal múltiple realizado con los datos de las siete obras estudiadas muestran una fuerte relación entre las cantidades de RCD y los valores ponderados de las variables independientes, debido a que los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obtenidos son: 0,990 para la estimación en peso y de 0,997 para el volumen. Por otro lado, los p-valores obtenidos para la estimación en peso y volumen, son menores de 0,05. Esto confirma que, con un nivel de confianza del 95%, la variación explicada por el modelo no se debe al azar. En última instancia, estos valores son lo suficientemente altos como para considerar probada la influencia de ambas variables en la estimación de RCD.

Al mismo tiempo, la tabla 3 muestra los coeficientes estandarizados y los resultados de los test de significación para comprobar la validez del modelo de regresión lineal múltiple. En todos los casos, como se puede observar en la tabla 3, con el fin de estimar la cantidad de RCD generado, la variable  $b$  "superficie total construida" presenta mayor influencia que la variable  $a$  "número de viviendas" (mayores coeficientes estandarizados).

Modelo		Estimación de RCD (kg)		Estimación de RCD (m <sup>3</sup> )	
		Núm. viv	m <sup>2</sup> construidos	Núm. viv	m <sup>2</sup> construidos
Coef. standarizado	$\beta$	0,289	0,711	0,375	0,625
	p-valor	0,090	0,008	0,009	0,001

Tabla 3 "Coeficientes estandarizados y p-valores de los modelos de regresión lineal múltiple".

La influencia de la variable  $b$  es mucho mayor cuando se estima el peso de residuo, ya que se obtiene un coeficiente estandarizado igual a 0,711, frente al obtenido para la variable número de viviendas (0,289). En el caso de la estimación en volumen (m<sup>3</sup>), el número de viviendas obtiene una importancia mayor que la obtenida para la estimación en peso. No obstante, la superficie construida se mantiene como la variable más influyente, obteniendo un coeficiente estandarizado igual a 0,625. Además, los resultados del test "t" muestran que todas las variables son significativas a un nivel de confianza del 90% (p valor < 0,10) y no pueden ser eliminadas del modelo.

Los resultados anteriores validan el modelo de regresión propuesto y, por tanto, los coeficientes estandarizados serán utilizados para calcular los factores ponderados corregidos, los cuales asignan una importancia a cada variable en la fórmula final de la estimación de residuos (ecuaciones 6 y 7). En resumen, el factor de ponderación corregido de una obra se puede calcular con los valores ponderados, una vez conocida la superficie total construida y el número de viviendas en el proyecto.

Volumen:

$$FP_c = (VP_{a_i} * 0,375) + (VP_{b_i} * 0,625) \quad (6)$$

Peso:

$$FP_c = (VP_{a_i} * 0,289) + (VP_{b_i} * 0,711) \quad (7)$$

Donde,

$FP_c$  es el factor ponderado corregido.

### 3.1.2. Desarrollo de la fórmula para la estimación de RCD

Las ecuaciones 8 y 9 son el resultado del modelo obtenido tras el análisis de regresión realizado entre el factor ponderado corregido y las cantidades de RCD generadas ( $Q_{RCD}$ ).

Volumen:

$$Q_{CDW} = 628657,10FP_c^3 - 130041,95FP_c^2 + 32460,93FP_c \quad R^2=0,998 \quad (8)$$

Peso:

$$Q_{CDW} = -175190710,21FP_c^3 + 24517298,88FP_c^2 + 17863852,57FP_c \quad R^2=0,998 \quad (9)$$

Las ecuaciones obtenidas están diseñadas para proyectos que tengan características similares a las analizadas aquí (tabla 1), es decir, siguiendo el estilo de construcción Mediterráneo convencional y con  $FP_c$  inferiores a 0,188 (tabla 2). Si se incorporan otros factores en el modelo, como por ejemplo: el tipo de materiales utilizados, el uso de sistemas prefabricados, la calidad de la construcción, etc., la eficiencia del modelo para la estimación de RCD mejoraría. Sin embargo, la metodología presentada sin duda puede ayudar a obtener nuevos modelos de cuantificación de RCD para otros países o incluso en proyectos con características diferentes a las analizadas aquí.

Por último, la desviación entre las cantidades de RCD obtenidas con el modelo propuesto y las alcanzadas en otros estudios y proyectos anteriores se muestran en la tabla 4. A pesar de la falta de estudios que especifiquen la información necesaria para utilizar el modelo propuesto, se seleccionaron un total de nueve obras para validar el modelo: dos de ellas de investigadores españoles anteriores y las otras siete de los datos proporcionados por una empresa de construcción diferente.

Otros estudios	Generación de RCD real		Parámetros		Generación de RCD estimada con el modelo					
	(kg)	(m <sup>3</sup> )	Va <sub>n</sub> [und]	Vb <sub>n</sub> [m <sup>2</sup> ]	kg			m <sup>3</sup>		
					FP <sub>c</sub>	Q <sub>CDW</sub>	Error (%)	FP <sub>c</sub>	Q <sub>CDW</sub>	Error (%)
Obra 1	3388798	6182	177	36477	0,213	3224546,7	-4,85	0,209	7092,1	10,84
Obra 2	Sin datos	3438	139	18433	0,134	2415110,9	-	0,136	3532,9	4,27
Obra 3	1953920	2457	91	14170	0,102	1890184,1	-3,26	0,102	2623,6	6,78
Obra 4	1944274	3856	83	19088	0,121	2216757,3	14,01	0,118	3149,3	-20,78
Obra 5	1786240	2745	72	13406	0,093	1728001,5	-3,26	0,091	2393,7	-13,92
Obra 6	1555850	2463	56	13288	0,087	1629331,8	4,72	0,085	2260,4	-10,82
Obra 7	846420	1429	26	5360	0,038	711217,7	-15,97	0,038	1089,0	-25,28
Llatas [19]	Sin datos	1208	26	2882	0,025	461453,9	-	0,026	743,4	-38,48
Solis Guzmán [14]	Sin datos	492,2	16	1600	0,015	266444,6	-	0,015	449,7	-5,14
Desviación media							-1,43			-10,28

Tabla 4 “Desviación de las cantidades de RCD obtenidas con el modelo propuesto en comparación con lo generado en otros estudios y obras”.

Los resultados obtenidos con el modelo (ecuaciones 8 y 9) muestran una desviación media de alrededor de -0,75% en peso y -10,28% en volumen, en comparación con la cantidad de RCD generada en otras obras. Además, la desviación máxima se encuentra alrededor de -38,48% en volumen y -15,97% en peso. En la obra 1 se obtiene un error de alrededor de 7,50% a pesar de que supera ligeramente el rango de superficie total construida y FP<sub>c</sub> que limita el modelo. Por otra parte, las figuras 3 y 4 muestran gráficamente la desviación existente entre el modelo propuesto y el generado en otros proyectos (tabla 4).

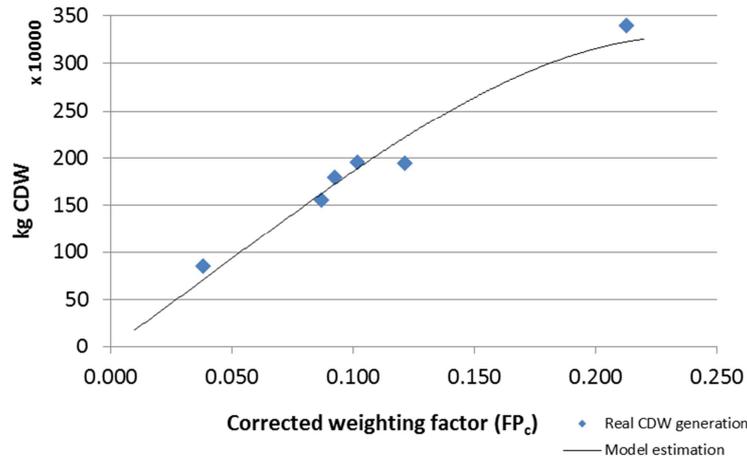


Fig. 3 “Peso de RCD estimado con el modelo propuesto vs lo generado en otros estudios y obras”.

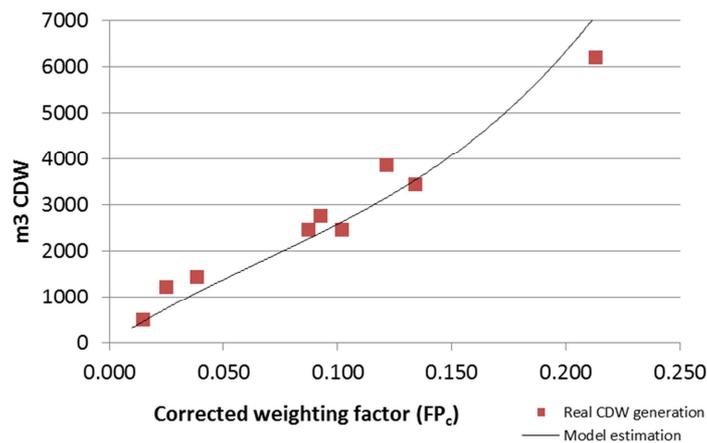


Fig. 4 “Volumen de RCD estimado con el modelo propuesto vs lo generado en otros estudios y obras”.

Las desviaciones encontradas pueden deberse a la gestión realizada por el equipo de obra, lo que demostraría la importancia del tipo de gestión realizada y las buenas prácticas implementadas en obra para minimizar los residuos generados.

En resumen, conociendo el número de viviendas y la superficie total construida de un proyecto (con características similares a los estudiados en esta investigación), los agentes intervinientes en la construcción pueden obtener el factor de ponderación de su obra utilizando las ecuaciones 4 o 5. Además, pueden estimar la cantidad de residuos generados utilizando las ecuaciones 6 y 8 (para la estimación en volumen) o las ecuaciones 7 y 9 (para la estimación en peso).

#### 4.- Conclusiones

El trabajo presentado ha desarrollado un modelo de estimación de RCD generado, tanto en volumen como en peso, teniendo en cuenta dos variables: número de viviendas y superficie total construida. La metodología seguida puede servir para obtener modelos de cuantificación en otras áreas o incluso para otro tipo de construcciones. Además, considerando otros factores en la fórmula final sin duda mejorará la eficiencia del modelo presentado.

En general, la estimación del residuo con el modelo propuesto difiere alrededor del 1% al 10% en comparación con otros proyectos o trabajos de investigación publicados (tanto para el peso y volumen). Además, otras variables como la gestión llevada a cabo por el equipo de obra o de las buenas prácticas implementadas para minimizar la generación RCD pueden dar lugar a desviaciones máximas del modelo. En definitiva, el modelo desarrollado en esta comunicación se puede incluir en los Sistemas de Gestión Ambiental de las empresas de construcción, ayudando a los técnicos de la construcción, no sólo en la optimización y sistematización de la gestión de RCD generados en construcciones residenciales, sino también para desarrollar los Planes y Estudios de gestión de RCD de acuerdo con la legislación vigente.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Arpada, en particular el Departamento de Medio Ambiente y Calidad, y el Departamento de Proyectos, por facilitar la información necesaria para este estudio.

## REFERENCIAS

- [1] European Commission. (2014, December). *Eurostat statistics for waste flow generation 2012*. Available: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- [2] GERD, "Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011. (Spanish Report on CDW production, management and control period 2008 - 2011)," Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (Spanish Association of CDW Managers), Madrid 2013.
- [3] J. Silvestre, *et al.*, "Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials—calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 37-45, 2014.
- [4] Gobierno de España, "Real Decreto 105/2008, de 1 de Febrero, por el que se Regula la Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición. "Royal Decree 105/2008, of February 1, on the Production and Management of Construction and Demolition Waste"," ed. Official state bulletin (BOE), 2008, pp. 7724-7730.
- [5] L.-y. Shen, *et al.*, "Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice," *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, pp. 254-259, 2010.
- [6] Gobierno de España, "II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (2008-2015).", ed. Boletín Oficial del Estado (BOE): Ministerio de Medio Ambiente, 2008, pp. 19938-19948.
- [7] M. del Río Merino, *et al.*, "Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered," *Waste Management & Research*, vol. 28, pp. 118-129, 2010.
- [8] A. Coelho and J. de Brito, "Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings," *Waste Management*, vol. 32, pp. 532-541, 2012.
- [9] P. Villoria Saez, *et al.*, "Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 75, pp. 52-62, 2013.
- [10] A. Fuertes, *et al.*, "An environmental impact causal model for improving the environmental performance of construction processes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 425-437, 2013.
- [11] M. del Río Merino, *et al.*, "Los sistemas de gestión de la calidad en la edificación instrumentos para la reducción del impacto medioambiental," in *Actas del I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes.*, Sevilla 2013, pp. 74-84.
- [12] M. Mália, *et al.*, "Construction and demolition waste indicators," *Waste Management & Research*, vol. 31, pp. 241-255 2013.
- [13] H. Yuan and L. Shen, "Trend of the research on construction and demolition waste management," *Waste Management*, vol. 31, pp. 670-679 2011.
- [14] J. Solís-Guzmán, *et al.*, "A Spanish model for quantification and management of construction waste," *Waste Management*, vol. 29, pp. 2542-2548 2009.
- [15] M. P. Mercader-Moyano and A. Ramirez-de-Arellano-Agudo, "Selective classification and quantification model of C&D waste from material resources consumed in residential building construction," *Waste Management & Research*, vol. 31, pp. 458-474, May 2013.
- [16] Z. Wu, *et al.*, "Quantifying construction and demolition waste: An analytical review," *Waste Management*, vol. 34, pp. 1683-1692, 2014.
- [17] N. González Pericot, *et al.*, "Production patterns of packaging waste categories generated at typical Mediterranean residential building worksites," *Waste Management*, 2014.
- [18] A. Katz and H. Baum, "A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites," *Waste Management*, vol. 31, pp. 353-358 2011.
- [19] C. Llatas, "A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list," *Waste Management*, vol. 31, pp. 1261-1276 2011.