

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**Localización de plantas de tratamiento de  
residuos de construcción y demolición en  
Cantabria**

**(Location of construction and demolition  
waste treatment facilities in Cantabria)**

**Para acceder al Título de**

***Graduado/a en Ingeniería Química***

**Autor: Nora Campuzano Fuente**

# ÍNDICE

---

**RESUMEN**

<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b>	<b>5</b>
<b>1.1 Residuos de Construcción y Demolición</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Antecedentes y motivación</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Infraestructuras para la gestión de RCDs y productos</b>	<b>9</b>
<b>1.4 Situación de los RCDs y plantas en Cantabria</b>	<b>10</b>
<b>1.5 Modelado con variables binarias</b>	<b>12</b>
<b>1.6 Optimización</b>	<b>12</b>
<b>2 <u>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MODELO DE LOCALIZACIÓN</u></b>	<b>14</b>
<b>2.1 Criterios económicos, sociales y medioambientales considerados en este trabajo</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Ecuaciones que describen el modelo</b>	<b>16</b>
<b>3 <u>RESULTADOS</u></b>	<b>23</b>
<b>3.1 Criterios económicos</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1 Según punto de vista de los productores</b>	<b>24</b>
<b>3.1.2 Según punto de vista de los recicladores</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3 Costes totales</b>	<b>27</b>
<b>3.1.4 Combinaciones</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Criterios sociales</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1 Según punto de vista de los recicladores</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2 Según punto de vista de la sociedad</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3 Criterios sociales totales</b>	<b>32</b>
<b>3.2.4 Combinaciones</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Criterios medioambientales</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Combinaciones de todos los criterios</b>	<b>35</b>
<b>4 <u>CONCLUSIONES</u></b>	<b>39</b>
<b>5 <u>BIBLIOGRAFIA</u></b>	<b>43</b>

## **LISTA DE TABLAS Y FIGURAS:**

Figura 1. Composición de RCDs

Figura 2. Esquema de una planta de tratamiento de RCDs de primera generación fija

Figura 3. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los productores Caso A

Figura 4. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los productores Caso B

Figura 5. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los recicladores Caso A

Figura 6. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los recicladores Caso B

Figura 7. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios económicos Caso A

Figura 8. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios económicos Caso B

Figura 9. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios sociales de los recicladores Caso A

Figura 10. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios sociales de los recicladores Caso B

Figura 11. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios sociales desde el punto de vista de la sociedad Caso A

Figura 12. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios sociales desde el punto de vista de la sociedad Caso B

Figura 13. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios sociales Caso A

Figura 14. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios sociales Caso B

Figura 15. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios medioambientales Caso A

Figura 16. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios medioambientales Caso B

Figura 17. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 3 Caso A

Figura 18. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 3 Caso B

Figura 19. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 4 Caso A

Figura 20. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 4 Caso B

Figura 21. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 5 Caso A

Figura 22. Mapa del flujo de RCDs según el estudio de la combinación 5 Caso B

Tabla 1. Bloque de criterios

Tabla 2. Criterios económicos de los recicladores

Tabla 3. Criterios económicos de los productores

Tabla 4. Costes totales

Tabla 5. Combinaciones de los criterios económicos

Tabla 6. Criterios sociales de los recicladores

Tabla 7. Criterios sociales según el punto de vista de la sociedad

Tabla 8. Criterios sociales totales

Tabla 9. Combinaciones de los criterios sociales

Tabla 10. Criterios medioambientales

Tabla 11. Combinaciones de los tres bloques de criterios

# RESUMEN

---

TÍTULO	<b>Localización de plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición en Cantabria</b>		
AUTOR	<b>Nora Campuzano Fuente</b>		
DIRECTOR/CODIRECTOR	<b>Berta Galán Corta</b>		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	<i>16-09-2014</i>

## **PLABRAS CLAVE/KEYWORDS**

RCDs, planta de transferencia, planta de tratamiento, optimización, función objetivo, GAMS, costes, medioambiente, criterios sociales.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA/SCOPE**

La gestión de los RCDs (Residuos de Construcción y Demolición: constituidos principalmente por tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, ladrillos...) conlleva costes económicos significativos y un impacto ambiental a largo plazo. La ubicación de las instalaciones de gestión de estos residuos, bien sean plantas de tratamiento o plantas de transferencia, es muy importante, ya que afecta al entorno social y al impacto medioambiental (derivado principalmente del transporte de los residuos a la planta).

En este trabajo, el objetivo es encontrar las mejores localizaciones para instalaciones de gestión de RCDs en la Comunidad Autónoma de Cantabria, conociéndose sus 102 municipios, la cantidad de RCDs que genera cada municipio, la distancia entre todos ellos y la ubicación del vertedero final. También identifica la capacidad de las mismas y la red de distribución entre la instalación y los municipios atendiendo a tres funciones objetivo diferentes. Para ello se ha elaborado un modelo lineal de mezcla entera con el software GAMS, formado por 33.997 variables simples y 612 variables binarias que indican la presencia o no de una planta. Se lleva a cabo el estudio considerando dos casos distintos:

- Caso A: Cantabria como una única zona
- Caso B: Cantabria dividida en cinco áreas geográficas donde debe haber obligatoriamente una planta en cada área.

Las funciones objetivo son: la minimización de los costes totales (desde el punto de vista del reciclador y del productor), la maximización de los criterios sociales (desde el punto de vista del reciclador y de la sociedad), la minimización de los criterios medioambientales (toneladas de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte) y combinaciones entre los tres criterios dando un peso distinto a cada uno para ver su influencia.

## **RESULTADOS /RESULTS**

Al minimizar la función objetivo de los costes, en el Caso A se localizan tres plantas de tratamiento y una planta de transferencia, mientras que en el Caso B se localizan cuatro plantas de tratamiento y una de transferencia. El primer caso es el que menos costes implica.

Si se maximiza la función objetivo que suma todos los criterios sociales considerados, se encuentran cinco posibles soluciones de localización en ambos casos: pudiéndose localizar de una a cinco plantas de tratamiento y siendo el Caso A el más aceptado socialmente.

Al minimizar la función objetivo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se localizan cinco plantas en cada caso, siendo el Caso A el que menos impacto medioambiental implica.

En las combinaciones de las tres funciones objetivo, se ha dado en la primera el mismo valor a las tres, en el segundo un mayor peso al medioambiente y en la tercera a los criterios sociales. Los resultados que ofrecen mejores soluciones para los tres bloques de criterios se obtienen con el Caso A, donde se colocan cuatro plantas de tratamiento y una de transferencia en las dos primeras combinaciones y cinco plantas de tratamiento en la última.

### **CONCLUSIONES / CONCLUSIONS**

Si se atiende sólo a la minimización de los costes, se localizan tres plantas de tratamiento: Santander, Torrelavega y Colindres y una de transferencia en Cabezón de la Sal.

Si la función objetivo es maximizar los criterios sociales, se localizan de una a cinco plantas de tratamiento, enumeradas según mayor aceptación social: Torrelavega, Camargo, Piélagos, Polanco y Cartes.

Si se minimiza el criterio medioambiental, las localizaciones serían cinco plantas de tratamiento: Santander, Torrelavega, Camargo, Reinosa y Colindres.

En las combinaciones se ha elegido como resultado final la combinación que da el mismo peso a las tres funciones objetivo, obteniéndose las localizaciones idóneas con cuatro plantas de tratamiento: Santander, Torrelavega, Castro Urdiales y Camargo y una planta de transferencia en Bárcena de Cicero.

En el Caso A se obtienen generalmente mejores resultados porque se buscan las localizaciones sin ninguna restricción, pudiéndose llevar los costes de transporte al mínimo, y por tanto también las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **BIBLIOGRAFÍA/REFERENCES**

Galán, B., Dosal, E., Andrés, A. y Viguri, J.R. .2013. Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria. Waste and Biomass Valorization. pp. 797-808.

Coronado, M., Dosal, E., Coz, A., Viguri, J.R. y Andrés, A.: Estimation of construction and demolition waste (C&DW) generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain. Waste and Biomass Valorization. 2, 209-225 (2011).

TÍTULO	<b>Location of construction and demolition waste treatment facilities in Cantabria</b>		
AUTOR	<b>Nora Campuzano Fuente</b>		
DIRECTOR/CODIRECTOR	<b>Berta Galán Corta</b>		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	<i>16-09-2014</i>

**PLABRAS CLAVE/KEYWORDS**

CD&W, transfer station, treatment plant, optimization, objective function, GAMS, costs, environment, social criteria.

**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA/SCOPE**

The management of CD&W (Construction and Demolition Waste: consisting mainly of land and mixed aggregates, rocks, concrete debris, remains of asphalt pavement, brick...) has significant economic costs and environmental impact in the long term. The location of management facilities of this waste, whether treatment plants or transfer plants is very important as it affects the social aspects and the environmental impact (mainly derived from the transportation of waste to the plant).

In this work, the goal is to find the best locations for facilities management CD&W in Cantabria, knowing its 102 municipalities, the amount of CD&W generated by each municipality, the distance between them and the location of the final landfill. It also identifies the same capacity and distribution network between the plant and the municipalities in response to three different objective functions. To solve it a linear model of the entire mixture have been developed with GAMS software. The model consisting of 33.997 single variables and 612 discrete variables indicating the presence or not of a facility. The study is carried out considering two different cases:

- Case A: Cantabria as a single zone
- Case B: Cantabria divided into five geographic areas. At each area there a facility must be located.

The objective functions are: minimization of total costs (from the point of view of the recycler and producer), maximization of social criteria (from the point of view of the recycler and society), minimization of environmental criteria (tonnes of CO<sub>2</sub> generated by the transport) and combinations of the three criteria giving a different weight to each one to see their influence.

**RESULTADOS /RESULTS**

By minimizing the objective cost function, in Case A three treatment plants and a transfer station are located, while in Case B four treatment plants and one transfer station are located. The first case is which implies less costs.

If the objective function is sum all considered social criteria function is maximized, there are five possible localization solutions in both cases: being able to locate one to five treatment plants and Case A being the most socially acceptable.

By minimizing the objective function of CO<sub>2</sub> emissions, five plants are located in each case, with Case A to be the one which involves less environmental impact.

In the combinations of the three objective functions, in the first case the same value has been given to the three, in the second the greatest weight to the environment and in the third to social criteria. The results that offer better solutions to the three sets of criteria are obtained in Case A, where four treatment plants and a transfer station are located in the first two combinations and five treatment plants in last.

### **CONCLUSIONES / CONCLUSIONS**

If only cost minimization is considered, three treatment plants are located: Santander, Torrelavega and Colindres and one transfer station in Cabezón de la Sal.

If the objective is to maximize social criteria, one to five treatment plants are located listed by greater social acceptance: Torrelavega, Camargo, Piélagos, Polanco and Cartes.

If the environmental criterion is minimized, the locations would be five treatment plants: Santander, Torrelavega, Camargo, Reinoso and Colindres.

In the combinations as the final result chosen was the combination that gives equal weight to the three objective functions, obtaining the ideal locations with four treatment plants: Santander, Torrelavega, Castro Urdiales and Camargo and transfer plant in Bárcena de Cicero.

In Case A best results are generally obtained because the locations are searched without restrictions, being able to keep the costs of transport to a minimum, and therefore also CO<sub>2</sub> emissions.

### **BIBLIOGRAFÍA/REFERENCES**

Galán,B., Dosal, E., Andrés, A. y Viguri, J.R .2013. Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria. Waste and Biomass Valorization. pp. 797-808.

Coronado, M., Dosal, E., Coz, A., Viguri, J.R. y Andrés, A.: Estimation of construction and demolition waste (C&DW) generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain. Waste and Biomass Valorization. 2, 209-225 (2011).

# INTRODUCCIÓN

---

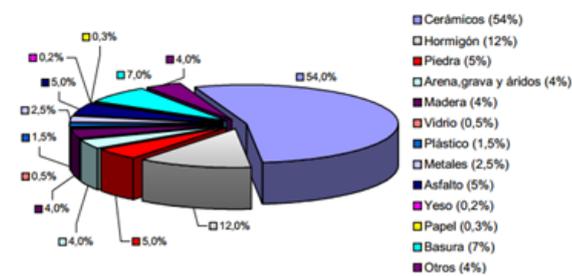
### **1.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCDs).**

Los RCDs se definen en el artículo 2 del Real Decreto 105/2008 [11] como todos aquellos residuos procedentes tanto de la construcción de infraestructuras y edificaciones de nueva planta como de la demolición de inmuebles antiguos, sin olvidar los derivados de pequeñas obras de reforma de viviendas y locales. En su mayor parte son inertes, constituidos principalmente por tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, maderas... La catalogación de los residuos que se pueden valorizar y reciclar en las instalaciones de gestión es la siguiente, de acuerdo con el Catálogo Europeo de Residuos (CER) [12]:

**Grupo 17:** Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra contaminada de zonas excavadas):

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- 17 01 01 Hormigón
- 17 01 02 Ladrillos
- 17 01 03 Tejas y materiales cerámicos
- 17 01 07 Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas a las especificadas en código 17 01 06 (Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas)
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
- 17 03 02 Mezclas bituminosas distintas de las especificadas con el código 17 03 01 (mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla)
- 17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje)
- 17 05 04 Tierras y piedras distintas de las especificadas en el código
- 17 05 03 (tierra y piedras que contienen sustancias peligrosas)

- 17 05 08 Balasto de vías férreas distinto del especificado en el código
- 17 05 05 (lodos de drenaje que contienen sustancias peligrosas)
- 17 08 Materiales de construcción a base de yeso
- 17 08 02 Materiales de construcción a base de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01 (materiales de construcción a base de yeso contaminados con sustancias peligrosas)
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición
- 17 09 04 Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03.



**Figura 1:** Composición de RCDs

La clasificación que se hará en la planta de tratamiento de los materiales recibidos será la siguiente [13]:

- RCDs limpios seleccionados:** Aquellos procedentes de demoliciones y derribos. Se caracterizan por su alto porcentaje de materiales homogéneos. Generalmente constituidos por grandes trozos de estructura, con una baja proporción de finos, lo que les capacita con las mejores aptitudes y posibilidades para el reciclado.
- RCDs heterogéneos seleccionados:** Proceden de derribos y obra nueva. Compuestos por hormigón y piedra mezclados con materiales cerámicos y asfálticos.
- RCDs mezclados con otros residuos:** Proceden de reformas y obra nueva. Suelen mostrar un notable grado de mezcla con otros residuos no inertes, por lo que tienen una menor homogeneidad y un mayor contenido en finos. Pueden contener metales, plástico o cartón.

- d) **RCDs muy mezclados:** Normalmente proceden de reformas y suelen mostrar un grado medio-bajo de contenido en fracción pétreo valorizable y cantidades significativas de materiales no pétreos valorizables (plásticos, cartón o metales). Tienen una enorme heterogeneidad y un mayor contenido en finos.

### **1.2 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.**

Numerosos estudios evalúan diferentes escenarios de gestión de RCDs, como el desarrollado por Yuan [6], que aplicó la teoría de Energy, que no se limita a un balance de costes y beneficios, si no que incluye efectos económicos, sociales, ambientales y sostenibles, para analizar diferentes opciones de reciclaje para RCDs. Kartam et al [7] investigaron alternativas para gestionar y controlar los RCDs de forma económicamente eficiente y de manera segura para el medio ambiente. Coronado et al [8] desarrollaron una metodología para la cuantificación de la generación de RCDs en la Comunidad Autónoma de Cantabria y la evaluación de las diferentes alternativas de gestión de residuos. Esta metodología consiste en la aplicación de cuatro métodos de Análisis Multicriterio (AMC) considerando que Cantabria está dividida en cinco áreas geográficas donde debe colocarse una instalación en cada una de ellas.

También se ha estudiado la evaluación de las implicaciones energéticas y/o medioambientales de la cadena de reciclaje de RCDs. Mercante et al [4] y Hemreck y Chong [5] demostraron que los impactos ambientales negativos significativos se pueden asignar a las actividades indirectas como el transporte, lo que hace necesaria una ubicación adecuada de las infraestructuras de gestión de RCDs. Chong [5] llegó a la conclusión de que la capacidad de reciclaje de residuos de construcción y la energía necesaria para el transporte de los residuos se ven afectados por las variables regionales (distancias entre regiones) y variables sociales. Por tanto deben estudiarse los costes económicos, los requisitos medioambientales y los sociales para obtener una buena ubicación de la planta.

El trabajo se ve motivado también por las legislaciones actuales:

- La Directiva 2008/98/CE [2], que subraya la necesidad de alcanzar como objetivo un porcentaje de reutilización, reciclado y recuperación de RCDs del 70% para el año 2020 en la Unión Europea.
- El II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015 [9], que pretende aumentar la reutilización, reciclaje y valorización de los RCDs
- El Decreto 15/2010 [10], que hace referencia a la necesidad de disminuir el vertido incontrolado de RCDs al vertedero de Cantabria.

Por todo lo dicho anteriormente, en este trabajo se ha querido buscar en Cantabria una localización adecuada de infraestructuras de RCDs, el número ideal de las mismas y la capacidad que pueden tratar acorde con las toneladas al año que se producen. Se ha querido alcanzar este objetivo atendiendo a aspectos económicos, sociales y medioambientales para que la solución sea la más completa posible.

### **1.3 INFRAESTRUCTURAS PARA LA GESTIÓN DE RCDs.**

Los tipos de infraestructuras para la gestión de estos residuos son las siguientes [9]:

- Plantas de Transferencia (almacenes): Instalaciones para el depósito temporal de RCDs que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas a grandes distancias. A veces es posible realizar la separación y clasificación de las fracciones de los residuos con lo que se mejora su gestión posterior.
- Plantas de valorización: Instalaciones de tratamiento de los residuos de construcción y demolición en las que se depositan, seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones que contienen estos residuos, con el objetivo de tener productos finales aptos para su utilización.

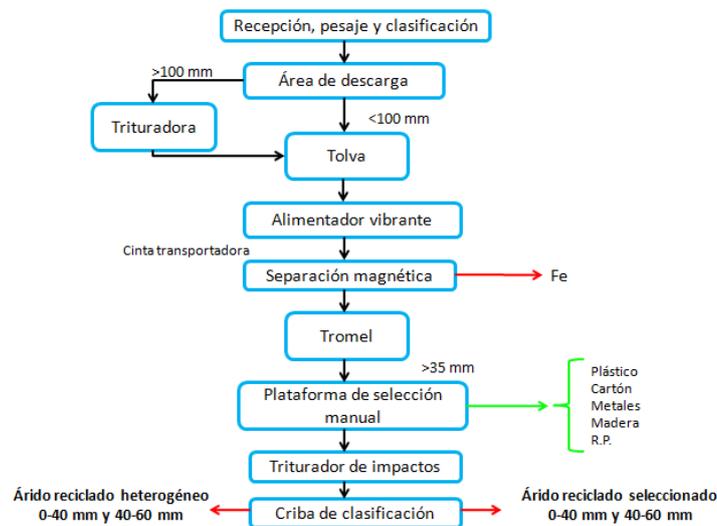
Las plantas se pueden clasificar según el equipo del que dispongan en:

- Primera generación: carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero.
- Segunda generación: Poseen sistemas mecánicos manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, y elementos de limpieza y clasificación del producto machacado.
- Tercera generación: Dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios.

Y según sean fijas, semimóviles o móviles:

- Móviles: Se desplazan a las obras para reciclar en origen.
- Semimóviles: Más pesadas que las móviles.
- Fijas: Están ubicadas en un emplazamiento fijo.

En este proyecto, las plantas de valorización elegidas son de primera generación y fijas. Se puede observar un esquema de la misma a continuación:



**Figura 2:** Esquema de una planta de tratamiento de RCDs de primera generación fija

### 1.4 SITUACIÓN DE LOS RCDs EN CANTABRIA.

Cantabria es una región española situada en el norte de la Península Ibérica con una superficie de 5.321 km<sup>2</sup> y una población en 2011 de 593.000 habitantes. Se divide en 102 municipios agrupados en 10 condados: Ason-Aguera, Besaya, Campoo, Costa Occidental, Costa Oriental, Liébana, Saja-Nansa, Santander,

Trasmiera y Pas-Miera-Pisueña. Aproximadamente, el 85% de la población total vive en cinco condados de la costa: el 45% de la población vive en el condado de Santander; Besaya representa alrededor del 15,5%, la Costa Trasmiera Oriental representa alrededor del 10% de la población total y la Costa Occidental alrededor de 3,5 %. Los otros cinco condados representan entre 2,5% - 5% de la población, excepto el condado montañoso Liébana, donde la población es muy baja (1%) dedicada principalmente al sector primario y en la actualidad también al sector turístico.

Se desarrollaron regulaciones regionales sobre residuos de construcción y demolición en 2010 para promover una adecuada gestión de estos residuos (Plan Sectorial de los RCD de Cantabria y la gestión Decreto regional [10]). Por otra parte, en Cantabria desde 2010 los RCDs deben estar separados en el lugar donde se generan y aproximadamente el 75 % de ellos (29,3 % son de cemento y mortero y un 44,6% son de cerámica) son adecuados para ser reciclados.

Es complicado saber la cantidad de RCDs generados en Cantabria debido a que las empresas de construcción y demolición no se han visto obligadas a registrar y reportar las características cualitativas y cuantitativas de los residuos hasta el año 2010. Teniendo en cuenta que el 75% del total de residuos se pueden reciclar, la cantidad total de RCDs reciclables considerados en este trabajo es de 265.000 ton /año.

Actualmente Cantabria cuenta con un vertedero de residuos inertes localizado en Castañeda, en la zona norte de la comarca de Pas-Miera-Pisueña, hacia donde se transporta la parte no reciclable de los RCDs y con tres plantas de tratamiento y una planta móvil [14]:

- Arruti Santander S.A.: Planta móvil donde se lleva a cabo valorización de RCDs.
- Reciclajes Camargo S.L.: Localizado en Revilla de Camargo, se lleva a cabo reciclaje de RCDs.
- Grupo Empresarial Sadisa S.L (Meruelo): Valorización de RCDs.

- Parque Verde Cantabria S.L.: En Cacicedo de Camargo, donde se produce valorización de RCDs.

## **1.5 OPTIMIZACIÓN EN GAMS.**

El General Algebraic Modeling System (GAMS) [15] es un software de alto nivel diseñado para modelar y resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta. El sistema está diseñado para aplicaciones de modelado a gran escala complejas.

Los problemas de optimización se componen generalmente de funciones objetivo, variables y restricciones. Resolverlos consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones. El método de optimización utilizado en este trabajo es la programación lineal entera mixta (MIP), que busca y garantiza un óptimo local. Se utiliza una mezcla de variables enteras o binarias y continuas:

$$\begin{aligned} \min c^T + d^T y \quad & Ax + By = b \\ x, y \geq 0 \quad & x \in \mathbb{Z}, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l \\ & A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

Para llevar a cabo un modelo de optimización escrito en GAMS se deben declarar primero los índices y parámetros, definirse las variables (según sean positivas, libres, binarias...), declarar las ecuaciones del modelo y acotar e iniciar las variables.

## **1.6 MODELADO CON VARIABLES BINARIAS.**

Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad compleja, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Los modelos de optimización son aquellos donde existe un conjunto de variables de decisión que deben maximizar/minimizar una función objetivo sometidas a un conjunto de restricciones. [15]

Existen decisiones que no pueden ser representadas de forma adecuada mediante variables continuas, por ello se utilizan variables discretas o binarias.

$Y = \text{variable binaria } 0,1$

$x = \text{variable continua}$

Las variables binarias (0/1) son variables enteras que permiten modelar condiciones de asignación o condiciones lógicas. Toda variable entera  $x$  se puede expresar como suma de variables binarias  $Y$ .

En el capítulo 2 se puede observar la aplicación correcta de estas variables en el caso de estudio.

# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

---

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

En este trabajo cada municipio envía sus propios residuos o bien a una planta de tratamiento o a una estación de transferencia. Cada planta de tratamiento genera dos corrientes de salida: una corriente de materiales no reciclables que se envía a un vertedero de residuos inertes y otra de áridos reciclados que se envían al mercado para ser vendidos. En las estaciones de transferencia también hay una corriente de materiales no reciclables cuyo destino es el vertedero y otra corriente de residuos que va a la planta.

El objetivo del modelo matemático desarrollado es encontrar las mejores localizaciones para instalaciones de gestión de RCDs en la Comunidad Autónoma de Cantabria, conociéndose sus 102 municipios, la cantidad de RCDs que genera cada municipio, la distancia entre todos ellos y la ubicación del vertedero [16]. También identifica la capacidad de las mismas y la red de distribución entre la instalación y los municipios atendiendo a tres funciones objetivo diferentes. Las instalaciones pueden estar en cualquiera de los municipios de la comunidad.

Se realizará el problema de dos maneras distintas:

- Caso A: Considerando a Cantabria como una sola zona.
- Caso B: Dividiendo a Cantabria en las 5 áreas en las que lo divide el Plan Sectorial de RCDs de Cantabria [10]. Deberá haber una infraestructura de gestión en cada una para minimizar los costes de transporte y que cada área gestione sus propios residuos.

Después se dará un peso a cada función objetivo, con el propósito de obtener distintos resultados y elegir la opción más adecuada. Para dar solución al problema planteado, se elabora un modelo lineal de mezcla entera con el software GAMS (General Algebraic Modeling System), formado por 33.997 variables simples y 612 variables binarias que indican la presencia o no de una planta.

## **2.1 CRITERIOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES CONSIDERADOS EN ESTE TRABAJO.**

Los criterios considerados en el desarrollo del modelo se han agrupado en tres bloques. Los datos de los criterios sociales se han obtenido de la EIEL [17] y de ICANE [18].

- Económicos: Agrupados a su vez en criterios de interés para los recicladores o para los productores.
- Sociales: Agrupados a su vez en criterios de interés para los recicladores o para la sociedad.
- Medioambientales

<b>Bloque</b>	<b>Grupos</b>	<b>Aspectos</b>	<b>Criterio</b>
Económicos	Productores	Costes de gestión	Costes de transporte (€/año)
			Coste recepción (€/año)
	Recicladores	Rentabilidad nuevas instalaciones	Coste (€/año)
Sociales	Recicladores	Competitividad de la instalación	Cantidad RCDs (ton)
			Distancia al vertedero de cola (km)
		Accesibilidad	Estado de la carretera
		Disponibilidad de tierras	Tierra desocupada (%)
	Sociedad	Aceptabilidad social	Ratio de industrialización
			Paro (%)
		Aceptación local de los municipios	Población afectada (habitantes/km <sup>2</sup> )
			Turismo (nº de plazas/km <sup>2</sup> )
Perturbación	Tierra protegida (%)		
Medioambiente	Gobierno regional	Emisiones del transporte	Emisiones de CO <sub>2</sub> (ton/año)

**Tabla 1:** Bloque de criterios

## **2.2 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL MODELO.**

### **MUNICIPIOS (s):**

$$rcdm_s = \sum_p rmp_{s,p} + \sum_a rma_{s,a} \quad \forall s \in MU \quad \text{eq.1}$$

Donde  $rmp$  son los residuos que van del municipio a la planta (ton/año),  $rma$  son los residuos que van del municipio a la estación de transferencia (ton/año) y  $rcdm$  son la suma de ambos, es decir, la cantidad de residuos totales que generan todos los municipios (ton/año).

### **ESTACIONES DE TRANSFERENCIA (a):**

$$ra\_in_a = \sum_a rma_{s,a} \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.2}$$

$$ra\_out_a = ra\_in_a * dscs \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.3}$$

$$ra\_out_a = \sum_p rap_{a,p} \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.4}$$

$$ravc_a = ra\_in_a * (1 - dscs) \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.5}$$

$$cpp_a = ra\_in_a * dcseg \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.6}$$

Donde  $ra\_in$  son todos los RCDs que entran a cada estación de transferencia (ton/año),  $ra\_out$  son los RCDs que las abandonan para ser transportados a las plantas de tratamiento (ton/año), por lo que son iguales a  $rap$  (residuos que van de la estación de transferencia a la planta de tratamiento),  $ravc$  son los RCDs que salen de la estación de transferencia para ir al vertedero de cola y  $cpp_a$  es la capacidad de la estación de transferencia (ton/año).

Los parámetros  $dscs$  y  $dcseg$ : El primero es el coeficiente de segregación de la estación de transferencia, que recibe un valor de 0.88, mientras que el segundo es el coeficiente de seguridad de la capacidad de la estación, con un valor de 1.5.

### **PLANTAS DE TRATAMIENTO:**

$$rp_p = \sum_s rmp_{s,p} + \sum_a rap_{a,p} \quad \forall p \in MU \quad \text{eq.7}$$

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

$$rpvc_p = \sum_s rmp_{s,p} * dpvc + \sum_a rap_{a,p} * dpac \quad \forall p \in MU \quad \text{eq.8}$$

$$cpp_p = rp_p * dcseg \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.9}$$

Donde  $rp$  es la cantidad de RCDs que se tratan en la planta de tratamiento (ton/año),  $rpvc$  son los RCDs que salen de ella y van al vertedero de cola (ton/año) y  $cpp$  es su capacidad (ton/año).

Los parámetros  $dpvc$ ,  $dpac$  y  $dcseg$ : El primero es el porcentaje de RCDs que llegan a la planta de tratamiento procedentes de los municipios y cuyo destino va a ser el vertedero porque no son reciclables, su valor es de 0.2. El segundo es lo mismo que el anterior pero los RCDs son aquellos que van desde la estación a la planta de tratamiento, con un valor de 0.08. Ambos valores son distintos porque los residuos procedentes de la estación de transferencia ya se han clasificado. Y el tercero es el coeficiente de seguridad de la capacidad de la planta de tratamiento, con un valor de 1.5.

### VERTEDERO DE COLA

$$rvc = \sum_p rpvc_p + \sum_a ravc_a \quad \text{eq.10}$$

$$cvc = rvc * dland \quad \text{eq.11}$$

Donde  $rvc$  es la cantidad total de RCDs que llegan al vertedero de cola, procedentes de las plantas de transferencia y de las plantas de tratamiento (ton/año). Por último  $cvc$  son los gastos que suponen el vertedero de cola (€) y  $dland$  es el coste (€/ton) de llevar los RCDs.

### COSTES

*Costes de transporte si se utiliza un camión pequeño (2 ejes): (€/año)*

$$cstrp = \sum_{s,a} dcstrp * dissu_{s,a} * rma_{s,a} + \sum_{s,p} dcstrp * dissu_{s,p} * rmp_{s,p} \quad \text{eq.12}$$

Donde  $dcstrp$  es el coste del transporte de los RCDs de un camión de dos ejes (€/km·ton), cuyo valor en este caso es de 0.112 (€/km·ton). El parámetro  $dissu_{s,a}$  es la distancia entre el centro del municipio y la estación de transferencia, mientras que  $dissu_{s,p}$  indica la distancia entre el centro del municipio y la planta de tratamiento.

*Costes de transporte si se utiliza un camión grande (3 ejes): (€/año)*

$$cstrg = \sum_{a,p} dcstrg * dissu_{a,p} * rap_{a,p} + \sum_p dcstrg * dvc_p * rpvc_p + \sum_a dcstrg * dvc_a + ravg_a \quad \text{eq.13}$$

Donde  $dvc_p$  es un parámetro que indica la distancia en kilómetros entre la planta de tratamiento y el vertedero de cola, situado en Castañeda. El parámetro  $dvc_a$  indica la distancia en kilómetros entre la estación de transferencia y el vertedero de cola. Y por último,  $dcstrg$  es el coste del transporte de los RCDs de un camión de tres ejes (€/km·ton), que en este caso recibe un valor de 0.073 (€/km·ton).

*Costes de transporte:*

$$csttr = cstrp + cstrg \quad \text{eq.14}$$

Donde  $csttr$  es el coste total del transporte de RCDs (€/año).

*Costes de tratamiento:*

$$csge = \sum_a rma_{s,a} * dcsa + \sum_p rmp_{s,p} * dcsp \quad \text{eq.15}$$

Donde  $csge$  son los costes de tratar los RDC (€/año), y los parámetros  $dcsa$  y  $dcsp$  son los gastos de gestión por tonelada de RCDs tratados en una estación o en una planta, respectivamente (€/ton). En este caso los valores asignados para ambos parámetros es de 5 (€/ton).

*Costes de instalación:*

$$cstp_p = dipf * yp + dipv * cpp_p \quad \forall p \in MU \quad \text{eq.16}$$

$$csta_a = diaf * ya + diav * cpa_a \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.17}$$

Donde  $cstp_p$  es el coste de instalar la planta de tratamiento (€) y  $csta_a$  es el coste de la instalación de la estación de transferencia (€). Las variables binarias  $yp$  y  $ya$  utilizadas en las ecuaciones representan la presencia o no de una planta o una estación en el municipio, respectivamente. Por último,  $dipf$  y  $diaf$  son los costos fijos de instalación (€) de la planta y de la estación de transferencia

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

respectivamente,  $dip_v$  y  $diav$  son el coste variable de instalación de la planta y la estación de transferencia respectivamente (€/t).

$$csanp_p = cstp_p * ancoef \quad \forall p \in MU \quad \text{eq.18}$$

$$csana_a = csta_a * ancoef \quad \forall a \in MU \quad \text{eq.19}$$

Donde  $csanp_p$  y  $csana_a$  son los costes de instalación anual de la planta de tratamiento y de la estación de transferencia (€/año) y  $ancoef$  es el coeficiente anual, que en este caso recibe un valor de 0.244.

### **FUNCIONES OBJETIVO:**

#### Criterios económicos:

##### **Costes totales**

$$cstot = csttr + csge + \sum_p csanp_p + \sum_a csana_a + cvc \quad \text{eq.20}$$

Donde  $cstot$  son los costes totales de la gestión de los RCDs (€/año).

##### **Costes totales sólo para el productor:**

$$coste = csge + \sum_p csanp_p + \sum_a csana_a + cvc \quad \text{eq.21}$$

**Costes de transporte** (ya definidos anteriormente en ecuación 14).

##### **Costes de gestión y costes de transporte:**

$$typin = csttr + csge \quad \text{eq.22}$$

Donde  $typin$  son los costes totales del productor de RCDs (€/año).

#### Criterios sociales:

##### **Criterios sociales desde el punto de vista de los recicladores:**

$$crit_{reci} = \sum_s crit_{recycler_s} * yt_s + cpp_s / 1.5 / 131000 \quad \text{eq.23}$$

Donde  $crit_{reci}$  representa la suma de todos los criterios desde el punto de vista de los recicladores como se puede observar en la tabla 1 (adimensional). La variable

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

crit\_recycler es el sumatorio de los criterios fijos. Se multiplica por la variable binaria yt, que es la suma de las variables binarias yp y ya. Se suma cpp para así sumar a los criterios fijos el único criterio variable, la distancia al vertedero de cola.

Todos los criterios han sido divididos por su máximo valor, para que la suma sea adimensional. Por eso cpp es dividida por 131000 que es su máximo valor. El valor de 1.5 es el coeficiente de seguridad.

### ***Criterios desde el punto de vista de la sociedad:***

$$crit_{soc\ y} = \sum_s crit\_society_s * yt_s \quad eq.24$$

Donde crit<sub>socy</sub> representa la suma de todos los criterios desde el punto de vista de la sociedad como se puede ver en la tabla 1 (adimensional). La variable crit\_society representa la suma de todos los criterios sociales fijos y se multiplica por la variable binaria yt para que solo se sumen los criterios correspondientes a las plantas que el programa vaya a seleccionar, es decir, donde tenga un valor de 1 y no de 0.

### ***Criterios sociales totales:***

$$crit_{tot} = \sum_s crit\_m_s \quad \forall s \in MU \quad eq.25$$

Donde crit<sub>tot</sub> representa todos los criterios del bloque social (adimensional). La variable crit\_m es la suma de crit<sub>reci</sub> y crit<sub>socy</sub>.

### **Criterios medioambientales:**

$$medio = kmp * CO2p + kmg * CO2g \quad eq.26$$

Donde medio es la cantidad total de CO<sub>2</sub> que provoca la gestión de los RCDs debido al transporte (ton/año). En cuanto a kmp y kmg, son variables que siguen las siguientes ecuaciones, según el camión sea pequeño en el primer caso o grande en el segundo:

$$kmp = \sum_{s,a} dissu_{s,a} * rma_{s,a} + \sum_{s,p} dissu_{s,p} * rmp_{s,p} \quad eq.27$$

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU MODELO

$$kmg = \sum_{a,p} dissu_{a,p} * rap_{a,p} + \sum_p dvc_p * rpvc_p + \sum_a dvc_a + ravc_a \quad eq.28$$

### Combinaciones:

#### **-Económicas:**

Se les ha otorgado a los criterios desde el punto de vista de los productores un valor del 0.5, igual que a los criterios de los recicladores. Se ha dividido a las variables entre su valor más grande para obtener un valor adimensional.

$$combinacion1 = 0.5 * \frac{(csttp+csgc)}{valor\ máximo} + 0.5 * \frac{coste}{valor\ máximo} \quad eq.29$$

Siendo combinacion1 la representación de los pesos de ambas partes en el bloque económico (adimensional).

#### **-Sociales:**

Igual que en la combinación anterior, se ha otorgado un peso del 0.5 ha cada grupo de criterios, a los del productor y a los de la sociedad. No se han dividido entre sus valores máximos porque estos ya eran adimensionales.

$$combinacion2 = 0.5 * crit_{reci} + 0.5 * crit_{soc} \quad eq.30$$

#### **-Globales:**

En estas combinaciones se ha ido asignando un peso distinto a las funciones objetivo para observar su peso en la decisión final de la ubicación de la planta:

$$combinacion3 = -0.33 * cstot - 0.33 * medio + 0.33 * crit_{tot} \quad eq.31$$

$$combinacion4 = -0.25 * cstot - 0.5 * medio + 0.25 * crit_{tot} \quad eq.32$$

$$combinacion5 = -0.25 * cstot - 0.25 * medio + 0.5 * crit_{tot} \quad eq.33$$

Donde todas las combinaciones son adimensionales ya que se ha dividido a cada función objetivo entre su valor máximo.

# RESULTADOS

---

Las tablas que recogen los resultados contienen las siguientes abreviaturas:

- Cpp es la capacidad de la planta
- Cpa es la capacidad del almacén
- F.O. es la función objetivo
- Cst\_inst son los costes de instalación
- Csttr son los costes de transporte
- Csge son los costes de gestión
- Cvc son los costes del vertedero de cola
- Cstot son los costes totales
- Medio son las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por el transporte
- Crit\_tot son todos los criterios sociales
- En las localizaciones, P indica planta de tratamiento y A indica planta de transferencia.

### **3.1 CRITERIOS ECONÓMICOS.**

#### **3.1.1 SEGÚN EL PUNTO DE VISTA DE LOS PRODUCTORES.**

Hay dos funciones objetivo a minimizar:

- Costes de transporte (eq.14)
- Costes de transporte más costes de gestión (eq.22)

## RESULTADOS

				COSTES (mill €/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales	
Casos	F.O. (€/año)	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	cst_inst	csttr	csge	cvc	cstot	medio	crit_tot	
A	370.000	P: Santander	99.653	2,07	0,37	1,32	0,82	4,59	230.670	8,23	
		P: Torrelav.	83.319								
B	390.000	P: Camargo	58.847	2,01	0,39	1,32	0,82	4,54	234.360	6,59	
		P: Reinosa	11.794								
		P: Colindres	50.863								
		P: San Vic.	11.824								
A	1.700.000	P: Santander	99.653	2,07	0,37	1,32	0,82	4,59	230.670	8,23	
		P: Torrelav.	83.319								
B	1.710.000	P: Camargo	58.847	2,01	0,39	1,32	0,82	4,54	234.360	6,59	
		P: Reinosa	11.794								
		P: Colindres	50.863								
		P: San Vic.	11.824								

**Tabla 2:** Criterios económicos de los productores

Al añadir los costes de gestión sólo se modifica el valor de la función objetivo. Cuando consideramos a Cantabria como una sola zona (Caso A), los costes de instalación son mayores que en el caso de las 5 zonas (Caso B), sin embargo como el programa no está sujeto a restricciones geográficas coloca las plantas en el lugar óptimo para minimizar todo lo posible los costes de transporte. Si los costes de transporte son menores, las emisiones de CO<sub>2</sub> lógicamente también lo son. Los mapas siguientes representan el flujo de RCDs en ambos casos:



**Figura 3:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los productores Caso A

Los residuos tienden a gestionarse en las plantas más cercanas, para así minimizar los costes de transporte de los mismos. Predomina el flujo hacia la planta de Torrelavega.



**Figura 4:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los productores Caso B

Sigue predominando el flujo hacia Torrelavega. No todos los residuos van a la planta de su zona geográfica porque no se han impuesto restricciones para ello.

### 3.1.2 SEGÚN EL PUNTO DE VISTA DE LOS RECICLADORES.

Sólo hay una función objetivo a minimizar:

- El resultado de la suma de los costes de gestión, de instalación y del transporte hasta el vertedero de cola (eq.21).

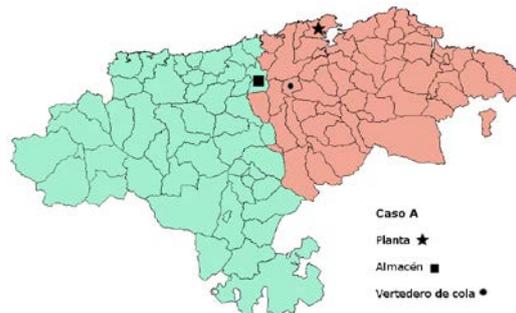
La tabla que recoge ambos puntos es la siguiente:

Casos	F.O. €/año)	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales
				cst_inst	csstr	csge	cvc	cstot	medio	crit_tot
A	3.137.000	P: Santander	29.4450	1,00	0,78	1,32	0,81	3,92	493.160	5,79
		A: Torrelav.	83.562							
B	3.269.000	P: Santander	291.530	1,14	0,72	1,32	0,81	3,99	393.890	7,89
		A: Torrelav.	70.153							
		A: Castro U.	15.451							
		A: San Vic.	8.807							
		A: Molledo	13.439							

**Tabla 3:** Criterios económicos de los recicladores

En el Caso A los costes totales son inferiores a los del Caso B, debido a que los costes de instalación son inferiores porque no hay restricciones geográficas y el programa puede colocar el número mínimo de infraestructuras. La mejor opción por tanto sería el Caso A, con una planta en Santander y un almacén en Torrelavega.

Los mapas del flujo de RCDs correspondientes a estos resultados son:



**Figura 5:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los recicladores Caso A

En este caso los residuos de la mitad de Cantabria se almacenan en la estación de transferencia ubicada en Torrelavega, para luego ser enviados a la planta de Santander junto con el resto de residuos de la otra mitad de la comunidad.



**Figura 6:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios económicos de los recicladores Caso B

En este caso los residuos son recogidos por las estaciones de transferencia y enviados a la planta de Santander.

### 3.1.3 COSTES TOTALES.

En este caso se minimiza la función objetivo que es el resultado de la suma de todos los costes (eq.20).

Los resultados son exactamente iguales al caso de los costes de los productores (incluidos los mapas), salvo el valor de la función objetivo:

Casos	F.O.(€/año)	Localización
A	3.920.000	P: Santander A: Torrelav.
B	3.990.000	P: Santander A: Torrelav. A: Castro U. A: San Vic. A: Molledo

**Tabla 4:** Costes totales

### 3.1.4 COMBINACIONES.

Minimizamos la función objetivo resultado de darle un peso del 0.5 a los criterios de los recicladores y el mismo al de los productores (eq.29):

Casos	F.O.	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales
				cst_inst	csstr	csge	cvc	cstot	medio	crit_tot
A	1,63	P: Santander P: Torrelav. P: Colindres A: Cabezón de	151.320 100.000 50.863 19.077	1,61	0,45	1,32	0,82	4,21	279.400	7,29
B	1,59	P: Santander P: Torrelav. P: Reinosa P: Colindres A: San Vic.	142.960 97.804 11.794 50.863 8.807	1,83	0,40	1,32	0,82	4,38	243.090	6,58

**Tabla 5:** Combinaciones de los criterios económicos

La mejor opción es el caso B, ya que tiene el valor de la función objetivo más pequeño. Los costes de instalación son mayores, pero los de transporte, y por tanto las emisiones de CO<sub>2</sub>, menores.



**Figura 7:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios económicos Caso A

La mayoría de los RCDs van a la planta de Torrelavega, incluidos los que se almacenan en Cabezón de la Sal.



**Figura 8:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios económicos Caso B

Los RCDs almacenados en la estación de transferencia de San Vicente se tratan en la planta de Torrelavega.

### **3.2 CRITERIOS SOCIALES.**

En estos resultados, se debe puntualizar que las cinco localizaciones en cada caso no son la única solución. Es decir, la solución sería desde una localización hasta cinco, empezando a elegir por la que mayor valor tenga. En los mapas sólo se muestra la ubicación de las plantas, ya que el flujo de los RCDs dependería del número de plantas que se elija como solución final.

#### **3.2.1 SEGÚN EL PUNTO DE VISTA DE LOS RECICLADORES.**

Se maximiza la función objetivo resultado de la suma de todos los criterios recicladores que aparecen en la tabla del capítulo anterior (eq.23).

## RESULTADOS

Casos	F.O.	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales	
				cst_inst	csttr	csge	cvc	cstot	medio	crit_tot	
A	8,05	P: Santander	1,61	81.692							
		P: Torrelav.	2,04	100.000							
		P: Camargo	1,54	62.779	2,07	0,91	1,32	0,82	5,12	637.110	10,78
		P: Piélagos	1,65	24.807							
		P: Corvera de Tor.	1,21	35.199							
B	7,25	P: Piélagos	2,15	81.692							
		P: Torrelav.	1,91	100.000							
		P: Bárcena de C.	1,16	62.779	2,07	1,39	1,32	0,82	5,60	973.110	9,23
		P: Hermandad C.	1,11	35.199							
		P: Valdáliga	0,91	24.807							

**Tabla 6:** Criterios sociales de los recicladores

Las localizaciones tanto para un punto de vista como para el otro, son plantas. Pero por ejemplo, en los recicladores en el Caso A, la solución válida podría ser una sola planta localizada en Torrelavega (por tener el mayor valor), dos plantas situadas en Torrelavega y Piélagos (por ser las de mayor valor)... etc. Así hasta llegar a las 5 localizaciones. Por tanto hay 5 soluciones posibles, lo mismo ocurre con todos los demás casos. La función objetivo tiene un mayor valor en el caso A, un coste menor y menores emisiones de CO<sub>2</sub>, por tanto sería la solución más acertada.

Los mapas correspondientes:



**Figura 9:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de los criterios sociales de los recicladores Caso A

Torrelavega en el Caso A es la planta que mejor atiende a los criterios de los recicladores.



**Figura 10:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de los criterios sociales de los recicladores Caso B

En este caso la planta ubicada en Piélagos sería la mejor.

### 3.2.2 SEGÚN EL PUNTO DE VISTA DE LA SOCIEDAD:

Se maximiza la función objetivo que en este caso es el resultado de la suma de los criterios sociales que aparecen en la tabla del capítulo anterior (eq.24).

Casos	F.O.	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales	
				cst_insta	csttr	csge	cvc	cstot	medio	crit_tot	
A	4,9	P: Torrelav.	0,90	81.692							
		P: Astillero	1,06	100.000							
		P: Cartes	0,95	62.779	2,07	1,13	1,32	0,82	5,34	792.850	9,92
		P: Ampuero	0,90	24.807							
		P: Molledo	1,05	35.199							
B	4,6	P: Astillero	1,06	81.692							
		P: Cartes	0,95	100.000							
		P: Ampuero	0,90	62.779	2,07	1,41	1,32	0,82	5,63	988.050	8,68
		P: Molledo	1,05	24.807							
		P: Herrerías	0,68	35.199							

**Tabla 7:** Criterios sociales según el punto de vista de la sociedad

La mejor solución para atender a estos criterios es el caso A, ya que es el que mayor valor de la función objetivo alcanza, menores costes supone y menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Los mapas correspondientes a estos resultados son:



**Figura 11:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de los criterios sociales según el punto de vista de la sociedad Caso A



**Figura 12:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de los criterios sociales según el punto de vista de la sociedad Caso B

Astillero y Molledo en ambos casos son las mejores plantas para estos criterios.

### 3.2.3 CRITERIOS SOCIALES TOTALES.

La función objetivo a maximizar es el resultado de la suma de los criterios de los recicladores y de los criterios de la sociedad (eq.25).

Casos	F.O.	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales
				cst_inst	csttr	csge	cvc	cstot	medioam	crit_tot
A	11,63	P: Torrelav. 2,81	81.692	2,07	0,92	1,32	0,82	5,14	653.670	11,632
		P: Camargo 2,67	100.000							
		P: Piélagos 2,40	62.779							
		P: Cartes 1,83	24.807							
		P: Polanco 1,91	35.199							
B	9,93	P: Camargo 2,04	5.668	1,81	2,07	1,32	0,82	6,03	1.443.700	9,926
		P: Torrelav. 2,30	5.000							
		P: Hazas de C. 1,41	5.455							
		P: Pesquera 3,09	283.350							
		P: Valdáliga 1,08	5.000							

**Tabla 8:** Criterios sociales totales

Teniendo en cuenta todos los criterios, y que hay cinco soluciones posibles, como era de esperar dados los resultados anteriores la mejor opción es el Caso A.



**Figura 13:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios sociales Caso A

Torrelavega nuevamente es la planta que mayor valor de la función objetivo obtiene, y por tanto la más adecuada.



**Figura 14:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de todos los criterios sociales Caso B

La planta de Pesquera es la que tiene un valor superior al resto.

### **3.2.4 COMBINACIONES.**

Maximizamos la función objetivo resultado de darle un peso del 0.5 a los criterios de los recicladores y el mismo a los de la sociedad (eq.30). Los resultados y los mapas son iguales a los del caso anterior, exceptuando el valor de la función objetivo.

Casos	F.O.	Localización
A	5,82	P: Torrelav. 2,81
		P: Camargo 2,67
		P: Piélagos 2,40
		P: Cartes 1,83
		P: Polanco 1,91
B	4,96	P: Camargo 2,04
		P: Torrelav. 2,30
		P: Hazas de C. 1,41
		P: Pesquera 3,09
		P: Valdáliga 1,08

**Tabla 9:** Combinaciones de los criterios sociales

### 3.3 CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES.

Se minimiza la función objetivo que representa las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por el transporte de RCDs (eq.26).

Casos	F.O. (ton/año)	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales
				cst_inst	csttr	csge	cvc	cstot	medioam	crit_tot
A	230.640	P: Santander	99.653	2,07	0,37	1,32	0,82	4,59	230.640	8,23
		P: Torrelav.	83.014							
		P: Camargo	58.847							
		P: Reinosa	12.099							
		P: Colindres	50.863							
B	240.030	P: Santander	130.390	1,98	0,39	1,32	0,82	4,52	240.030	6,59
		P: Torrelav.	100.000							
		P: Reinosa	11.794							
		P: Colindres	50.863							
		P: San Vic.	11.428							

**Tabla 10:** Criterios medioambientales

La mejor opción es el Caso A con 5 plantas (Santander, Torrelavega, Camargo, Reinosa y Colindres), porque al no estar sujeto a restricciones geográficas, el programa sitúa las plantas en el lugar más idóneo para minimizar el transporte y, por tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub>. Como se puede apreciar, las localizaciones son iguales que en el caso de minimizar la función objetivo de los costes de transporte. Además tiene un mayor valor en los criterios sociales, debido a que es más respetuoso con los mismos.



**Figura 15:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios medioambientales Caso A

Los RCDs van del municipio a la planta más cercana. Torrelavega es la que más recibe.



**Figura 16:** Mapa del flujo de RCDs según el estudio de criterios medioambientales Caso B

En este caso ocurre lo mismo. Los municipios no están obligados a enviar sus residuos a la planta de su zona geográfica.

### **3.4 COMBINACIONES DE TODOS LOS CRITERIOS:**

En este se maximizan funciones objetivo que dan un peso distinto a cada uno de los bloques, para observar la influencia que cada uno de ellos tiene en los resultados finales y elegir la opción más eficiente.

## RESULTADOS

				COSTES (mill€/año)					Emisiones CO2 (ton/año)	Criterios sociales	
Casos	F.O.	Localización	Cpp ó Cpa (ton/año)	cst_inst	csttr	csge	cvc	cstot	medioamb	crit_tot	
Combinación 3	A	-0,42	P: Santander P: Torrelav. P: Castro U. P: Camargo A: Bárcena Ci.	100.000 95.112 17.066 88.278 33.492	1,87	0,62	1,32	0,82	4,46	264.910	9,76
	B	-0,49	P: Santander P: Torrelav. P: Bárcena Ci. A: Molledo A: Valdálga	200.000 51.143 48.638 21.144 17.980	1,56	0,80	1,32	0,82	4,26	315.040	8,76
Combinación 4	A	-0,51	P: Santander P: Torrelav. P: Castro U. P: Camargo A: Bárcena Ci.	99.653 95.112 17.066 88.625 33.492	1,90	0,45	1,32	0,82	4,49	264.880	9,76
	B	-0,59	P: Santander P: Torrelav. P: Colindres P: Campoo E. A: Val de San.	142.960 97.342 50.863 12.099 10.118	1,83	0,41	1,32	0,82	4,39	246.450	7,94
Combinación 5	A	-0,09	P: Santander P: Torrelav. P: Camargo P: Piélagos P: Bárcena Ci.	99.653 93.010 45.103 10.636 56.074	2,07	0,42	1,32	0,82	4,64	271.460	10,55
	B	-0,11	P: Santander P: Torrelav. P: Bárcena Ci. P: Pesquera A: Valdálga	140.670 95.234 53.148 14.049 11.428	1,83	0,43	1,32	0,82	4,41	263.470	8,80

**Tabla 11:** Combinaciones de los tres bloques de criterios

- La combinación número 3 consiste en dar un valor de 0.33 a la función objetivo de los costes, otro 0.33 a la función objetivo de los criterios y 0.33 a la función objetivo del medioambiente.
- La combinación número 4 consiste en dar un peso de 0.25 a la función objetivo de los costes, un 0.25 a la función objetivo de los criterios y un 0.5 a la función objetivo del medioambiente.

- La combinación número 5 consiste en dar un peso de 0.25 a la función objetivo de los costes, un 0.5 a la función objetivo de los criterios y un 0.25 a la función objetivo del medioambiente.

En el Caso A siempre se obtienen mejores resultados porque no hay restricciones. Se ha decidido seleccionar la combinación 3 como resultado final, ya que se le da el mismo peso a todos los criterios.

**COMBINACIÓN 3**



**Figura 17:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 3 Caso A

Los municipios envían sus RCDs sobre todo a la planta de Torrelavega.



**Figura 18:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 3 Caso B

Torrelavega recibe los RCDs de los almacenes de Valdáliga y Molledo.

**COMBINACIÓN 4**



**Figura 19:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 4 Caso A

La planta de Torrelavega es a la que más municipios envían sus RCDs.



**Figura 20:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 4 Caso B

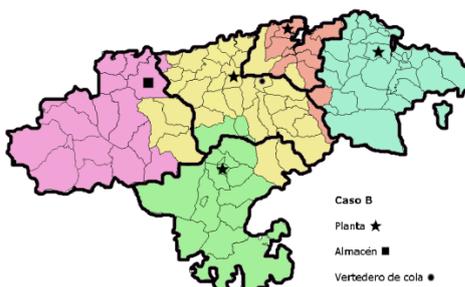
El almacén de Val de San Vicente envía sus residuos a la planta de Torrelavega.

**COMBINACIÓN 5**



**Figura 21:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 5 Caso A

Torrelavega sigue siendo la planta que más RCDs recibe.



**Figura 22:** Mapa del flujo de RCDs según estudio de la combinación 5 Caso B

El almacén de Valdáliga envía sus residuos a la planta de Torrelavega.

## CONCLUSIONES

---

El trabajo lleva a cabo la localización de plantas de tratamiento y plantas de transferencia de residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Las plantas pueden ser localizadas en cualquiera de los 102 municipios de Cantabria. Para la determinación de las mejores localizaciones se ha utilizado un modelo lineal de mezcla entera donde las variables binarias representan la presencia de las plantas en cada municipio o no. Dos casos han sido considerados a lo largo de todo el trabajo: a) Cantabria es considerada como un área en global y b) Cantabria es dividida en 5 áreas geográficas y al menos una planta de tratamiento o de transferencia tiene que ser localizada en cada una de las áreas.

Las funciones objetivos estudiadas han sido funciones económicas, medioambientales y sociales. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. Cuando se considera la función objetivo la minimización de los criterios económicos, se han obtenido estas localizaciones para cada uno de los dos casos:
  - a) Tres plantas de tratamiento (Santander, Torrelavega y Colindres) y una de transferencia (Cabezón de la Sal).
  - b) Cuatro plantas de tratamiento (Santander, Torrelavega, Reinosa y Colindres) y una de transferencia en San Vicente de la Barquera.
  
2. Cuando se considera la función objetivo la minimización de los criterios medioambientales, se han obtenido estas localizaciones para cada uno de los dos casos:
  - a) Cinco plantas de tratamiento localizadas en: Santander, Torrelavega, Camargo, Reinosa y Colindres.
  - b) Cinco plantas de tratamiento localizadas en: Santander, Torrelavega, Reinosa, Colindres y San Vicente de la Barquera.
  
3. Cuando se considera la función objetivo la maximización de los criterios sociales, se han obtenido estas localizaciones para cada uno de los dos casos:
  - a) La solución abarca de una a cinco plantas de tratamiento posibles, enumeradas según el orden de importancia: Torrelavega, Camargo, Piélagos, Polanco y Cartes.

- b) La solución abarca de una a cinco plantas de tratamiento posibles, enumeradas según el orden de importancia: Pesquera, Torrelavega, Camargo, Hazas de Cesto y Valdáliga.
4. Cuando se considera una función objetivo que es una media entre las funciones objetivo anteriores, , se han obtenido estas localizaciones para cada uno de los dos casos:
- a) Cuatro plantas de tratamiento ubicadas en Santander, Torrelavega, Castro Urdiales y Camargo y una planta de transferencia en Bárcena de Cicero.
  - b) Tres plantas de tratamiento ubicadas en Santander, Torrelavega y Bárcena de Cicero y dos almacenes en Molledo y Valdáliga.
5. En el caso a) se obtienen generalmente mejores resultados porque se buscan las localizaciones sin ninguna restricción, pudiéndose llevar los costes de transporte al mínimo, y por tanto también las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Galán, B., Dosal, E., Andrés, A. y Viguri, J.R. .2013. Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria. *Waste and Biomass Valorization*. pp. 797-808.
- [2] European commission: Bio intelligence Service (2010). Service contract on management of construction and demolition waste. Draft Final Report Task 2. [http://ec.europa.eu/environment/waste/prevention/pdf/WPG\\_final\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/prevention/pdf/WPG_final_report.pdf) (2010).
- [3] Directiva CE, (2008). Comisión Europea: Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos.
- [4] Mercante, I.T., Bovea, M.D., Ibañez-Forés, V., Arena, A.P., Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *Int J LCA* 17:232-241. (2012)
- [5] Hermreck, C., Chong, W.K. Embodied energy of CDW recycling and technical metabolism due to regional differences and building designs. *Building a Sustainable Future-Proceedings of the 2009. Constr Res Congr.* 526-536 (2009)
- [6] Yuan, F., Shen, L., Li, Q: Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste. *Waste Manage.* 31, 2503-2511 (2011).
- [7] Kartman, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I., and Al-Humoud, J. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Manage.* 24(10), 1049-1059 (2004).
- [8] Coronado, M., Dosal, E., Coz, A., Viguri, J.R. y Andrés, A.: Estimation of construction and demolition waste (C&DW) generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain. *Waste Biomass Valoriz.* 2, 209-225 (2011).

[9] ESPAÑA. 2009. Resolución de 20 de enero de 2009 por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de febrero de 2009, 49, pp. 19893-20016. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>

[10] CANTABRIA. 2010. Decreto 15/2010, Plan Sectorial de Residuos. *Boletín Oficial de Cantabria*, 8 de abril de 2010, 66, pp. 12005-12197.

[11] ESPAÑA. 2008. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial del Estado*, 13 de febrero de 2008, 38, pp. 7724-7730. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>

[12] Comisión Europea. 1993. Decisión de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993, por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos 94/3/CE. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31994D0003&from=ES>

[13] Santos, C. 2009. *Análisis de viabilidad económico financiera de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición*. RODRÍGUEZ, J.M. Proyecto fin de carrera. Universidad Pontífica Comillas (Madrid).

[14] CANTABRIA. 2011. Gestores de residuos no peligrosos autorizados en la Comunidad Autónoma de Cantabria. *Consejería de Medioambiente*. 5 de julio de 2011, pp.1-24. Disponible en: <http://www.federaciondemunicipios.com/rcd/pdfs/Documentacion/>

[15] GAMS. 2010. *Modelos matemáticos de optimización*. Disponible en: <http://www.gams.com/docs/>

[16] Google MAPS. Disponible en: <https://www.google.es/maps/preview>

[17] MINISTERIO DE ADMINISTRACIONES PÚBLICAS. 2000. Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales. EIEL. Disponible en: [http://www.seap.minhap.gob.es/gl/areas/politica\\_local/coop\\_econom\\_local\\_estado\\_fondos\\_europeos/informacion\\_socioeconomica\\_local/eiel.html](http://www.seap.minhap.gob.es/gl/areas/politica_local/coop_econom_local_estado_fondos_europeos/informacion_socioeconomica_local/eiel.html)

[18] INSTITUTO CÁNTABRO DE ESTADÍSTICA.2010. Cantabria. Disponible en: <http://www.icane.es/>