

APPLICATION OF THE ANALYTIC HIERARCHY MODEL (AHP) FOR INDUSTRIAL SOLID WASTE MANAGEMENT

Mesa Fernández, J. M.¹; Morán Palacios, H.²; Martínez Huerta, G.²;
Luiña Fernández, R.²

¹ Universidad de Oviedo. Area de Proyectos de Ingeniería, ² Universidad de Oviedo

When an industrial solid waste is managed, companies have to select the most suitable solution between different treatment processes available and consider multiple factors. The waste characteristics and their ability of utilization condition the process or set of processes that are technically possible. However, it is necessary to take into account other factors such as the availability of infrastructure, energy, water and other supplies, as well as the impacts that can cause the management of waste.

Having identified the different waste management alternatives, it is necessary to establish an assessment method to identify which one is the most efficient alternative in terms of various environmental, economic and social factors. To this end we propose the use of a decision support system. This system allows us to incorporate the assessment of a panel of experts and also break down the decision problem like a hierarchical problem. To this purpose, the analytic hierarchy method (AHP) is used, chose among other features for their adaptability, ease of use, objectivity, and repeatability.

Keywords: *Solid waste; Analytic hierarchy method; Treatment processes*

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) A LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

A la hora de gestionar un residuo sólido industrial, las empresas han de seleccionar la solución más conveniente entre los distintos procesos de tratamiento disponibles y atendiendo a múltiples factores. Las características del residuo y sus posibilidades de aprovechamiento condicionan el proceso o conjunto de procesos posibles técnicamente. Sin embargo también es necesario tener en cuenta otros factores como la disponibilidad de infraestructuras, energía, agua y otras necesidades, así como los impactos que pueden ocasionar la gestión del residuo.

Una vez identificadas las diferentes alternativas de gestión del residuo, es preciso establecer un método de evaluación que permita identificar cuál de ellas es la más eficiente en función de los distintos factores medio ambientales, económicos y sociales considerados. Con este objetivo se propone la utilización de un sistema de ayuda a la decisión. Dicho sistema permite incorporar la valoración de un panel de expertos y además desglosar el problema de decisión de forma jerárquica. Para ello se utilizará el método analítico jerárquico (AHP), escogido entre otras características por su adaptabilidad, fácil manejo, objetividad, y repetitividad.

Finalmente, como caso de aplicación de esta metodología, se presenta la selección de tratamiento de un lodo de acería LD.

Palabras clave: *Residuos sólidos; Método analítico jerárquico; Procesos de tratamiento*

1. Introducción

A lo largo de la historia y a medida que la población ha ido creciendo, las necesidades y el nivel de comodidades disponibles han ido aumentando de forma continuada y cada vez con mayor intensidad. Como consecuencia de estos avances, cada vez se necesita producir un mayor volumen de bienes, que a su vez requieren un mayor consumo de recursos y provocan una generación de residuos creciente.

En la actualidad, aunque en las ciudades se produce una enorme cantidad de residuos sólidos, es a nivel industrial donde se más generan. Además de ser más numerosos y variados que en el caso de los urbanos, dichos residuos son en general más peligrosos, más difíciles de controlar y causan serios problemas tanto durante su generación y almacenamiento como en sus posteriores procesos de tratamiento o eliminación. Esta problemática, unida a la cada vez mayor exigencia de reducir los impactos y la contaminación medioambiental de las instalaciones industriales, hace que sea cada vez más necesario elaborar nuevos y mejores métodos o procedimientos de gestión.

Según la Ley 22/2011, del 28 de Julio, *de Residuos y Suelos Contaminados* publicada en el Boletín Oficial del Estado Español (BOE), tiene la consideración de "Residuo Industrial" todo aquel residuo resultante de los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza o mantenimiento generado por la actividad industrial, excluidas emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.

Actualmente la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU), se realiza de manera mucho más desarrollada, controlada y organizada que la de los residuos industriales (RI). Esto es debido a que las técnicas de tratamiento de RSU han sido más estudiadas, desarrolladas y, como consecuencia, son más respetuosas con el medio ambiente que las de cualquier otro sector (Andrés et al, 2005).

A diferencia del caso de los RSU, a la hora de gestionar un residuo industrial existen una serie de inconvenientes añadidos, como una mayor heterogeneidad de estos residuos, la no existencia de vertederos específicos, la dispersión de industrias, las emisiones al aire, agua y suelo relacionadas con la propia generación de estos residuos, etc. Toda esta problemática dificulta una regulación o gestión centralizada por parte de las Administraciones Públicas, siendo las propias empresas las que habitualmente, previa solicitud de permiso, se encargan de su gestión.

Dentro del conjunto de los residuos industriales es posible distinguir los residuos sólidos industriales, cuyos problemas de eliminación se asocian normalmente con la falta de infraestructuras y procesos de tratamiento. A esto se añade, en ciertos casos, un escaso interés de algunas instalaciones industriales, que consideran su gestión solamente como un coste o una obligación más de carácter legal, sin plantearse una búsqueda exhaustiva de soluciones.

1.1. La gestión de los residuos sólidos industriales

Como ya se ha indicado, el gran volumen de residuos sólidos industriales (RSI) generado, unido a los importantes efectos negativos de los mismos sobre el medioambiente, convierten la necesidad de gestionarlos adecuadamente en una prioridad y hace indispensable la elaboración de una estrategia global para la recolección, organización y eliminación de los mismos. Desafortunadamente hasta el momento esta gestión no se realiza en muchos casos de forma adecuada o, al menos, no mediante criterios homogéneos que permitan estandarizar el ciclo desde la recogida hasta su desaparición o deposición.

Evidentemente, la mejor solución para los residuos industriales, es la de prevenir su producción, pero esto es posible en sólo un limitado número de materiales. Los subproductos también están sujetos a las necesidades del mercado, por lo que solo una parte de éstos son susceptibles de ser reciclados o reutilizados, mientras el resto debe ser tratado de otra manera y, finalmente, ser depositado en vertederos.

Las estrategias de desarrollo sostenible que actualmente se aplican en la mayor parte de las empresas, incluyen la necesidad de desarrollar políticas integrales de tratamiento, adaptadas a las normativas legales y a las restricciones técnicas y económicas.

La tecnología actual permite, con algunas excepciones, el reciclaje de casi todos los residuos, siendo la problemática más compleja cuando se precisa la combinación de varias técnicas para la optimización del proceso afectando a su viabilidad y, en definitiva, su rentabilidad. A la vez que se desarrollan nuevos avances tecnológicos y métodos de producción, la lista de los materiales a reciclar aumenta, al generar cada nueva técnica residuos con características distintas.

Frente a esto, se plantea la necesidad de nuevas estrategias de caracterización, control y seguimiento del ciclo de global de residuos en la industria, para mejorar las técnicas de tratamiento y control de calidad de los residuos.

En definitiva, el gran reto medioambiental no sólo se centra en la investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de los residuos, sino también en la selección de los tratamientos óptimos dentro del creciente catálogo disponible, para optimizar, desde un punto de vista global, el ciclo de gestión de los residuos, culminado con la desaparición de los mismos como tal a través de técnicas medioambientalmente más compatibles.

En los últimos años se han desarrollado metodologías de gestión de residuos, basadas en su mayor parte en disposiciones de cumplimiento voluntario (Reglamento (CE) nº 1221/2009) (IHOBE, 1999) (ISO14001) en cuanto a la evaluación de la eficiencia y de la gestión de los procesos (Finnveden et al. 2007). Algunos de estos estudios y metodologías se desarrollan principalmente en el ámbito de los residuos urbanos (Karmperis et al. 2013), mientras otros presentan análisis que demuestran la evolución e importancia de los sistemas de gestión (Marshall y Farahbakhsh 2013) o sobre la prospectiva actual de estos sistemas de gestión en el caso de los RSU (Guerrero, Maas, y Hogland 2013). Otros estudios se centran en residuos asimilables a urbanos (Casares et al. 2005), o bien residuos peligrosos en general, como los que se pueden producir en un laboratorio.

Por el contrario se han desarrollado pocas metodologías de aplicación general al tratamiento y gestión de residuos sólidos industriales, correspondiendo de forma habitual, a métodos propios desarrollados por las empresas para las actividades relacionadas con el manejo de sus residuos industriales en general (Geng, Zhu, y Haight 2007), o casos en los que se aprovechan residuos de una industria para otra cercana estableciendo sinergias (Costa, Massard, y Agarwal 2010).

La gestión de los residuos sólidos en los procesos productivos industriales independientemente del sector, debe traducirse inicialmente en una disminución de la generación de los mismos, así como un mejor aprovechamiento, convirtiéndose en un subproducto del proceso, con una menor cantidad de emisiones y un mayor beneficio económico para la empresa.

Aunque muchos sectores han desarrollado sus propios métodos para las actividades relacionadas con el manejo de los residuos sólidos industriales, sigue sin existir en la actualidad un método estándar de aplicación válido para cualquier sector.

Existe pues la necesidad de desarrollar una metodología, de carácter general, es decir, aplicable a cualquier tipo de residuo sólido industrial, que permita seleccionar el conjunto de tratamientos más adecuado desde un punto de vista global, tanto medioambiental como económico, social, legal, etc. De esta necesidad surge la propuesta de carácter general para gestionar este tipo de residuos y que se explica a continuación.

2. Metodología de gestión de RSI

En los apartados anteriores se han establecido los problemas y carencias existentes en cuanto a la gestión de los RSI, y la importancia que ello supone a la hora de cuidar el medio ambiente que nos rodea. En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología de gestión de residuos sólidos aplicable a cualquier sector industrial de actividad y que tenga en cuenta los marcos legales europeo, nacional y autonómico. Dicha metodología debe caracterizarse además por ofrecer un sistema para evaluar la eficiencia de los procesos asociados al manejo de los residuos sólidos y que permita optimizar su gestión. La metodología se ha estructurado en las cuatro etapas que se describen a continuación (Figura 1):

Figura 1: Etapas de la metodología desarrollada



1. **Caracterización de residuo y entorno:** la primera etapa consiste en la caracterización tanto del residuo a tratar como del entorno en el cual se gestiona el mismo. Para ello se han desarrollado unas fichas de residuo que recopilan información del tipo de residuo a tratar, es decir, sus propiedades físicas y químicas, composición, peligrosidad etc. Del mismo modo se han diseñado unas fichas de entorno, que caracterizan la zona donde se encuentra la instalación en la que se va a gestionar el residuo. Ambas fichas serán el punto de partida para posteriormente identificar, dentro del catálogo de técnicas y tratamientos disponibles, las alternativas existentes para gestionar dicho residuo.
2. **Identificación de alternativas de gestión:** en la segunda etapa se identifican el tratamiento o conjunto de tratamientos aplicables al residuo. Para ello se emplea el *Diagrama de selección de alternativas (Figura 3)* (Morán, H. et. al. 2010). Este diagrama permite determinar los posibles caminos de gestión a seguir por cada tipo de residuo en función de sus características, y cómo se adecuan estas a cada uno de los procesos o técnicas de tratamiento existentes. Para su utilización simplemente es necesario seguir las líneas de flujo determinadas por las decisiones que se tomen en base a los datos (caracterización) del residuo. Cada una de las técnicas de tratamiento disponibles se encuentran recogidas en la correspondiente "Ficha de

Proceso” de tal forma que es posible determinar cuáles de ellas son aplicables al residuo que se pretende gestionar. La incorporación de nuevos tratamientos, o la modificación de alguna característica de los mismos, sólo supondrá la inclusión de una nueva ficha de proceso o su revisión.

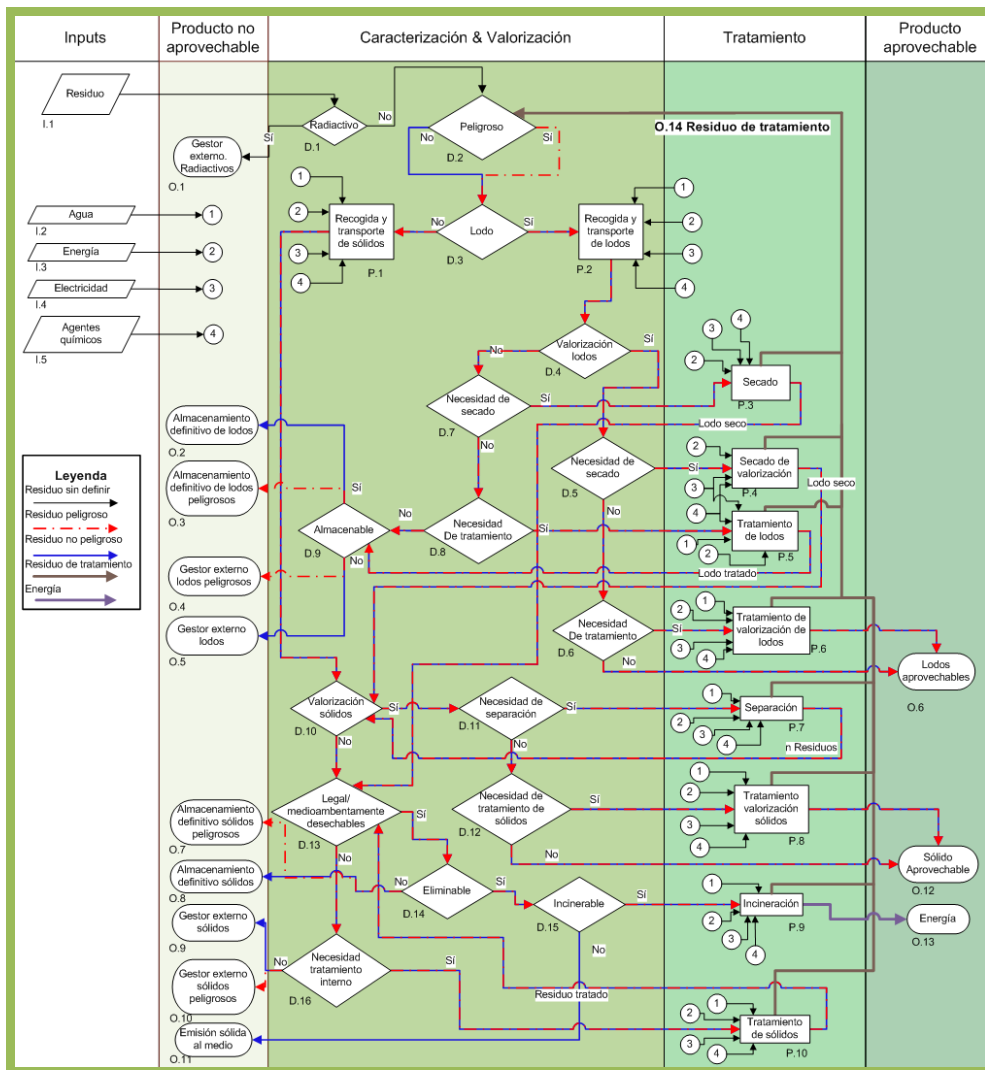
Figura 2: Fichas de residuo y de entorno

The image shows two overlapping forms used for waste management documentation. The top form, titled 'CARACTERÍSTICAS DEL RESIDUO', is divided into sections for general information, composition, and physical/chemical properties. The bottom form, titled 'FICHA DE ENTORNO', is divided into sections for meteorological, edaphic, and hydrological conditions.

- 3. Evaluación de alternativas:** una vez identificadas las alternativas de gestión, éstas se evalúan en la tercera etapa. En este momento se considera esencial disponer de un conjunto de indicadores que permitan comparar las alternativas en la gestión de los residuos, desde distintos puntos de vista y así poder determinar cuál es el mejor destino de los mismos. Con ese objetivo se ha elaborado un sistema de indicadores medioambientales. Inicialmente se han identificado indicadores cuantificables y representativos del nivel de eficiencia en la gestión de los residuos, tanto desde el punto de vista de su generación como de su reutilización o valorización externa, considerando aspectos ambientales, económicos, sociales y de condiciones de entorno. Después de realizar un estudio de los principales sistemas de indicadores existentes, se configura a partir de ellos un sistema propio y optimizado incorporando tanto factores ambientales como socioeconómicos, que permiten medir y cuantificar la información de los procesos. Finalmente, se establece un sistema de indicadores específico para la gestión de los RSI, denominado SIMGRE (Sistema de Indicadores ambientales para la Gestión de Residuos) (Morán, H. et. al. 2010). A partir de este sistema de indicadores se evaluarán cuantitativamente, de entre las posibilidades de reutilización o valorización identificadas en la etapa anterior, aquellas más factibles y eficientes, suponiendo la base para la comparación con otras instalaciones de

referencia.

Figura 3: Diagrama de selección de alternativas



- Selección de la alternativa más sostenible:** con los criterios proporcionados en la etapa anterior, la última etapa de la metodología debe permitir seleccionar de entre las alternativas posibles identificadas anteriormente aquella más adecuada en función de un conjunto específico de indicadores. Uno de los problemas habituales es la imposibilidad de cuantificar algunos de dichos indicadores, por lo que su valoración debe ser realizada de forma cualitativa. Por tanto, el método de selección de alternativas a emplear debe permitir combinar información cuantitativa y cualitativa. El procedimiento seleccionado con tal finalidad se describe en el apartado siguiente.

2.3. Selección de alternativas mediante el Método de Análisis Jerárquico (AHP)

A la hora de seleccionar que solución o alternativa de gestión es la más viable, se ha valorado la aplicación de distintos sistemas expertos, dentro de los cuales se incluyen las denominadas técnicas de análisis multicriterio (Khadivi y Fatemi Ghomi 2012). De entre todas ellas se ha seleccionado el Método Analítico Jerárquico ó AHP (Analytical Hierarchy Process), desarrollado por Thomas Saaty en el año 1980, y posteriores (Saaty, R.W. 1987,

Saaty, T. L.; Rogers, P., Pell, R. 1988), Saaty, T (1995), Saaty, T (2000), como el más conveniente para su aplicación en este caso.

Este método se ha seleccionado como parte de la metodología de gestión de RSI por las siguientes premisas (Martínez, 2007), (Saaty, T. L., Vargas, L. G., 2001):

1. Es simple y flexible, está formado por una serie de alternativas limitadas, y facilita la comprensión del problema planteado para llevar a cabo un proceso adecuado de toma de decisión.
2. El problema de decisión se modela jerarquizando los criterios, frente a otros métodos en los que únicamente se comparan globalmente las alternativas.
3. Solamente es necesaria información cualitativa respecto a las valoraciones del centro decisor, no siendo necesaria información cuantitativa resultante de cada uno de los criterios considerados.
4. Es posible analizar por separado la contribución de cada uno de los componentes del modelo al objetivo general.
5. Las incoherencias de los individuos son detectadas y aceptadas
6. Se puede integrar con otras metodologías multicriterio.

3. Aplicación a un caso particular

Una vez definida la metodología se procedió a comprobar su funcionamiento mediante su aplicación a un caso particular. El problema planteado consiste en seleccionar el tratamiento más adecuado para un residuo sólido industrial procedente del sector siderúrgico como es el lodo de acería LD, resultante del tratamiento húmedo de los gases del proceso de obtención de acero. Dicho residuo es generado en un entorno específico, en este caso en una zona industrial como Avilés, situada en el norte de España y caracterizada por tener un clima húmedo y lluvioso y velocidades del viento moderadas.

El primer paso consistió, según indica la metodología propuesta, en la caracterización de dicho lodo en forma de ficha, recopilando de manera representativa las propiedades del mismo. De esta forma, en el momento de seleccionarlo como entrada a cualquier proceso resulta sencillo determinar si las características del lodo de acería son las adecuadas para la entrada a él.

Una vez conocidas las propiedades físico químicas de lodo, y aplicando el diagrama de selección de alternativas de gestión, se obtuvieron seis posibles alternativas de tratamiento:

1. Alternativa 1^a. Ceramización
2. Alternativa 1B. Vitrificación
3. Alternativa 2.1 A. Gestor externo de sólidos peligrosos.
4. Alternativa 2.2A. Fitorremediación
5. Alternativa 2.2B. Biorremediación
6. Alternativa 2.2C. Vitrificación in situ.

Cada una de estas alternativas está formada por un conjunto de tratamientos que comienzan en el momento en el que el residuo entra a la instalación y terminan cuando se obtiene el producto final. Con el objetivo de identificarlas mejor se denominó a cada alternativa de gestión con el nombre del último tratamiento de valorización que se le aplicaría al lodo de acería.

A continuación se escogieron 11 indicadores con los que se recogen de manera global los diferentes impactos medioambientales (indicadores ambientales), socioeconómicos (indicadores de comportamiento financiero), y aquellos que el entorno causa en el proceso de gestión en función del conjunto de tratamientos que sufra el residuo (indicadores de entorno). Al no disponer de datos suficientes para valorar dichos indicadores medioambientales del sistema SIMGRE de forma cuantitativa, se utilizaron la valoración cualitativa de los indicadores como criterios de decisión del método AHP.

Tabla 1: Matriz A de comparaciones pareadas

	Consumo específico de agentes químicos	Consumo específico energía	Consumo específico de agua	Proporción total de sólidos aprovechables	Volumen de efluentes líquidos	Volumen de emisiones gaseosas	Costes operativos de producción medioambiental	Pluviosidad de la zona de la instalación	Velocidad del viento en la zona	Proximidad a núcleos de población	Proporción de patrimonio natural afectado
Consumo específico de agentes químicos	1	4	1/2	1/6	5	6	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3
Consumo específico energía	1/4	1	1/4	1/7	2	3	1/7	1/6	1/6	1/5	1/4
Consumo específico de agua	2	4	1	1/5	5	6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2
Proporción total de sólidos aprovechables	6	7	5	1	8	9	2	3	3	4	4
Volumen de efluentes líquidos	1/5	1/2	1/5	1/8	1	2	1/8	1/7	1/7	1/6	1/5
Volumen de emisiones gaseosas	1/6	1/3	1/6	1/9	1/2	1	1/9	1/8	1/8	1/6	1/6
Costes operativos de producción medioambiental	6	7	5	1/2	8	9	1	2	2	4	4
Pluviosidad de la zona de la instalación	5	6	4	1/3	7	8	1/2	1	1/2	2	3
Velocidad del viento en la zona	5	6	4	1/3	7	8	1/2	2	1	3	3
Proximidad a núcleos de población	4	5	3	1/4	6	6	1/4	1/2	1/3	1	3
Proporción de patrimonio natural afectado	3	3	2	1/4	0	1/4	1/4	1/3	1/3	2/3	1

A la hora de aplicar AHP para la selección de la alternativa más sostenible se diferenciaron las siguientes fases:

1. En la primera fase se desglosó el problema de decisión como una jerarquía. El objetivo o meta fue el de escoger que proceso era el más sostenible, en el segundo nivel se situaron los 11 indicadores previamente escogidos y en el tercer nivel se situaron las 6 alternativas del tratamiento.
2. En la segunda fase se evaluó la importancia relativa que la unidad decisora asigna a cada uno de los criterios seleccionados. Comparando por pares cada uno de los criterios ó indicadores se obtiene la matriz de comparaciones pareadas (A), que en este caso fue una matriz 11x11, (Tabla 1) por los 11 indicadores.

La preferencia de un indicador con respecto al otro se establece por el decisor puntuando según la escala de medidas proporcionada por Thomas Saaty (Saaty 1987) en la que se obtiene la matriz A.

Para garantizar que dicha matriz sea representativa del proceso de decisión y por lo tanto válida y coherente para el análisis se realiza un análisis de consistencia. Para ello se calcula el vector prioridades (W) y a partir de él, el ratio de consistencia (CR). Para que el análisis sea consistente el método establece que se debe cumplir $CR \leq 10\%$. En este caso se obtuvo que $CR = 5,88\%$ ($\sim 0,06$), cumpliéndose este factor.

3. En la tercera fase se calculan las prioridades locales de las alternativas donde se obtiene la matriz de juicios por comparación pareada entre las mismas (R) (Tabla 2). Esto se hizo para cada uno de los 11 criterios o indicadores con los que se obtuvo la matriz A y el análisis también fue consistente.

Tabla 2: Matriz de Juicios R por comparación pareada entre alternativas

	Alt. 1a. ceramización	Alt. 1b vitrificación	Alt. 2.1a gestor externo sol. peligrosos	Alt. 2.2a fitorremediación	Alt. 2.2b biorremediación	Alt. 2.2 c vitrificación in situ
Alt. 1a. Ceramización	1	2	1/6	1/3	1/2	1/2
Alt. 1b. vitrificación	1/2	1	1/8	1/6	1/6	1/2
Alt. 2.1a . gestor externo sol. peligrosos	6	8	1	2	3	6
Alt.2.2a. fitorremediación	3	6	1/2	1	2	6
Alt. 2.2b. biorremediación	2	6	1/3	1/2	1	3
Alt 2.2 c. vitrificación in situ	2	2	1/6	1/6	1/3	1

Una vez calculado el vector prioridades, se obtuvo una matriz consistente, al ser el $CR = 3,33\%$. Obtenidas las prioridades locales, se calculó la matriz de prioridades totales y el vector

prioridad, que presentan la importancia que tienen las alternativas con respecto a la meta, identificándose por orden las mismas (Tabla 3), siendo la de mayor valor la que más se adecuó al objetivo final:

Para este caso, en el que la instalación está situada en Avilés, se obtuvo como mejor alternativa de gestión la Alternativa 1A Ceramización, con una puntuación de (0,2635) según la Tabla 3, en la que el residuo pasa por dos ciclos en el diagrama de selección (Figura 3).

- Una primera etapa de secado y otra de separación magnética, en la que se obtiene un sólido aprovechable (hierro), cuya salida es común para todas las opciones de gestión.
- Una segunda etapa en donde el polvo, con elevado contenido en el resto de metales que no han sido separados por la corriente magnética, pasa a la etapa de tratamiento de valorización final que puede ser de vitrificación o ceramización.

Tabla 3: Solución del Proceso de Análisis Jerárquico AHP

	Vector prioridad alternativa	
Alternativa 1a ceramización	0,2635	Mejor alternativa
Alternativa 1b vitrificación	0,2427	
Alternativa 2.1 a gestor externo sol. Pelig	0,2386	
Alternativa 2.2 a fitorremediación	0,0796	
Alternativa 2.2 b biorremediación	0,0692	
Alternativa 2.2 c vitrificación in situ	0,1064	

El resultado ha sido consistente no solo porque el valor de CR se encuentre dentro los límites requeridos, sino porque además se cumplen las siguientes características:

- Se consume menos energía que para el caso 1B Vitrificación o para el 2.2 C, Vitrificación in situ, que para el resto de las opciones y el consumo de agua no es muy elevado, aunque ligeramente superior al del caso 1B Vitrificación.
- Al emplearse en esta técnica como agente químico la arcilla, no tóxico ni peligroso, la ceramización muestra un nivel de preferencia más alto que otras alternativas que consideran agentes químicos más agresivos.
- No se generan efluentes líquidos, ya que en el proceso de secado se evaporan, en la separación magnética no hay agua y en la etapa final de ceramización tampoco, a diferencia de otras opciones donde se producen lixiviados como en las alternativas 2.2 A Fitorremediación y 2.2 B Biorremediación.
- Se generan dos sólidos aprovechables, uno el hierro resultante de la separación magnética y otro el sólido ceramizado.
- Los costes operativos de producción medioambiental son altos, ya que en el proceso de secado y en el de valorización, se utilizan técnicas para recuperar los efluentes o tratar los gases que salen del proceso antes de que se eliminen a la atmósfera, con lo cual es un coste positivo, mayor del que se puede producir cuando se envían los residuos a un vertedero o a un gestor por ejemplo.
- En cuanto a las condiciones del entorno donde se produce la gestión, la elevada velocidad del viento en esta zona es un factor negativo a la hora de ponderar, ya que si es fuerte desplaza la contaminación gaseosa a otras áreas cercanas de la zona, como núcleos de población cercanos a la zona industrial, como Avilés. El clima lluvioso no influye mucho en este caso, ya que todos los procesos transcurren en una instalación

cerrada, sin embargo no ocurre lo mismo en los casos en los que se tienen tratamiento en vertedero (fitorremediación o biorremediación) por la generación de lixiviados antes descrita.

La metodología propuesta ha permitido en este caso identificar seis posibles alternativas de gestión para el residuo objeto de estudio y determinar mediante el método AHP cuál de ellas es la más viable según un conjunto de criterios medioambientales.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una completa metodología para la gestión de los RSI que incluye los siguientes elementos:

- Un conjunto de fichas, de residuo, de proceso y de entorno, que facilitan la identificación de alternativas y la actualización de las técnicas de tratamiento disponibles.
- Un sistema de indicadores de aplicabilidad general a todo tipo de residuos sólidos industriales y que servirá posteriormente para el análisis y evaluación de las distintas alternativas de tratamiento.
- Un esquema general de valoración de alternativas o soluciones de tratamiento en función de las características recogidas de cada residuo sólido industrial y de cada técnica de tratamiento actualmente existente.
- Un proceso de análisis jerárquico (AHP) cuya aplicación permite obtener la solución de tratamiento de residuos más adecuada de acuerdo al conjunto de criterios de análisis.

Como conclusiones se puede indicar que este procedimiento:

- Permite que el análisis o selección de la solución de tratamiento de los residuos se produzca de una forma más objetiva, en base al análisis de diferentes aspectos y características.
- Posibilita la incorporación de criterios de evaluación no sólo cuantitativos sino también cualitativos, en función de la disponibilidad y las necesidades concretas de cada caso, lo que hace muy flexible su utilización.
- Facilita la repetitividad de dicho análisis y que se pueda aplicar a cualquier tipo de residuo sólido industrial con independencia del origen que tenga.
- Admite sin dificultad la incorporación de los cambios derivados de la evolución de la tecnología de las condiciones sociales o económicas.

5 Referencias

- Andrés, A. et al (2005). Punto focal de residuos del observatorio de sostenibilidad de Cantabria (PFR). Informe II. Aplicación de indicadores ambientales del área de residuos. Grupo DEPRO, Desarrollo de Procesos Químicos y Control de contaminantes. Gobierno de Cantabria. Consejería de Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica.
- Casares, M.L., N. Ulierte, A. Matarán, A. Ramos, y M. Zamorano. 2005. «Solid industrial wastes and their management in Asegra (Granada, Spain)». *Waste Management* 25 (10): 1075-1082. doi:10.1016/j.wasman.2005.02.023.
- Costa, Inês, Guillaume Massard, y Abhishek Agarwal. 2010. «Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries». *Journal of Cleaner Production* 18 (8) (mayo): 815-822. doi:10.1016/j.jclepro.2009.12.019.

- Finnveden, Göran, Anna Björklund, Åsa Moberg, Tomas Ekvall, y Åsa Moberg. 2007. «Environmental and Economic Assessment Methods for Waste Management Decision-support: Possibilities and Limitations». *Waste Management & Research* 25 (3) (enero 6): 263-269. Doi:10.1177/0734242X07079156.
- Geng, Yong, Qinghua Zhu, y Murray Haight. 2007. «Planning for integrated solid waste management at the industrial Park level: A case of Tianjin, China». *Waste Management* 27 (1): 141-150. doi:10.1016/j.wasman.2006.07.013.
- Guerrero, Lilliana Abarca, Ger Maas, y William Hogland. 2013. «Solid waste management challenges for cities in developing countries». *Waste Management* 33 (1) (enero): 220-232. doi:10.1016/j.wasman.2012.09.008.
- Karmperis, Athanasios C., Konstantinos Aravossis, Ilias P. Tatsiopoulos, y Anastasios Sotirchos. 2013. «Decision support models for solid waste management: Review and game-theoretic approaches». *Waste Management*. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13000470>.
- Khadiwi, M.R., y S.M.T. Fatemi Ghomi. 2012. «Solid waste facilities location using of analytical network process and data envelopment analysis approaches». *Waste Management* 32 (6) (junio): 1258-1265. doi:10.1016/j.wasman.2012.02.002.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. (BOE núm. 181, de 29 de julio de 2011)
- Martínez Rodríguez, E. (2007). Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. Real Centro Universitario «Escorial-María Cristina» Anuario Jurídico y Económico Escurialense, XL. 523-542 / ISSN: 1133-3677
- Marshall, Rachael E., y Khosrow Farahbakhsh. 2013. «Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries». *Waste Management* 33 (4) (abril): 988-1003. doi:10.1016/j.wasman.2012.12.023.
- Morán, H., et al. (2010) Metodología para la optimización en la gestión de residuos industriales. Congreso Internacional de Ingeniería de proyectos, Número XIV, Madrid 30/06/2010 - 02/07/2010.
- Reglamento (CE) no 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) no 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión
- Saaty, T. (1980) «The analytic hierarchy process». New York.USA: Macgraw-Hill.1980.
- Saaty, R.W. 1987. «The analytic hierarchy process—what it is and how it is used». *Mathematical Modelling* 9 (3–5): 161-176. doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- Saaty, T. L.; Rogers, P., Pell, R. 1988 «Portfolio selection through hierarchies». *Journal of Portfolio Management*, 6/3 (1988) 16-21
- Saaty, T (1995), «The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. ».Pittsburgh: RWS publications 1995
- Saaty, T (2000), «Fundamentals of Decision Making and priority theory with the Analytic hierarchy process ». Pittsburgh: RWS Publications 2000
- Saaty, T. L., Vargas L. G. (2001). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. ISBN 0-7923-7267-0, Kluwer Academic
- Sociedad Pública Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (1999). *Guía de Indicadores Ambientales para la Empresa*. Bilbao: IHOBE, S.A.
- UNE-EN ISO 14001: 2004. *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso*. Noviembre 2004. (ISO 14001:2004)