

04-025

### **Influence of localization in the choice of industrial waste treatment alternatives**

José Manuel Mesa Fernández; Henar Morán Palacios; Gemma Martínez Huerta; Sara Andrés Vizán

Universidad de Oviedo. Area de Proyectos de Ingeniería;

The management of solid waste by industrial companies requires the establishment of adequate management systems. Such systems should take into account numerous factors that allow choosing the most suitable treatment techniques within the best available techniques. Such selection is a complex process dependent on several factors. In this study, the influence of the location of the generation point of the waste in this selection is analyzed. As a starting point, a previous methodology, based on a set of environmental, regulatory and socioeconomic indicators, is used. Through the application of this methodology, it will be compared the impact on the selection of the treatment of the characteristics of different sites of the facilities. This analysis will be carried out for a specific application case, the treatment of LD sludge.

**Keywords:** waste management; location; methodology; system of indicators

### **Influencia de la localización en elección de alternativas de tratamiento de residuos industriales**

El manejo de los residuos sólidos por parte de las empresas industriales requiere el establecimiento de sistemas de gestión adecuados. Dichos sistemas deben tener en cuenta numerosos factores que permitan elegir las técnicas de tratamiento más adecuadas dentro de las mejores disponibles. Dicha selección es un proceso complejo dependiente de numerosos factores. En este estudio se analiza la influencia de la localización del punto de generación del residuo en dicha selección. Como elemento de partida se utiliza una metodología previamente desarrollada y basada en un conjunto de indicadores ambientales, de cumplimiento normativo y también de carácter socioeconómico. Mediante la aplicación de dicha metodología se comparará el impacto en la selección del tratamiento de las características de distintos emplazamientos de las instalaciones. Dicho análisis se efectuará para un caso de aplicación concreto, los lodos de acería LD.

**Palabras clave:** gestión de residuos; emplazamiento; metodología; sistema de indicadores

Correspondencia: José Manuel Mesa Fernández email: mesa@api.uniovi.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## 1. Introducción

El manejo de los residuos sólidos industriales (RSI) es una realidad con la que conviven todos los países a nivel mundial. Debido a los diferentes grados de desarrollo, tanto a nivel industrial, como económico, político o socio-cultural, no todos los países tienen la misma conciencia ambiental a la hora de gestionar sus residuos. Por otra parte, todos ellos deben intentar utilizar de las mejores técnicas disponibles para poder tratarlos.

Para ello es necesario que las empresas establezcan unos sistemas de gestión adecuados. En estos sistemas, se deben tener en cuenta una serie de factores mediante los cuales sea posible seleccionar, de entre las mejores técnicas de tratamiento disponibles, las más adecuadas en cada caso. Dicha selección puede convertirse en un proceso complejo ya que depende de numerosos factores.

Un elemento a tener en cuenta a la hora de tratar un residuo industrial, además de las características propias del residuo y los tratamientos a los que va a ser sometido, son las condiciones propias del lugar donde se van a producir las actividades. En este estudio, con el objetivo de conocer el grado de influencia de las características del entorno en la selección de uno u otro tratamiento, se ha empleado una metodología previamente desarrollada (Fernández et al., 2014) capaz de decidir qué alternativa es la óptima, teniendo en cuenta distintos factores, incluyendo la sostenibilidad medioambiental.

Para valorar dicha influencia, se han seleccionado varias localizaciones geográficas con diferentes condiciones de entorno físico, medioambiental y social. A la hora de escoger los lugares de estudio, se ha tenido en cuenta la existencia de zonas industriales más o menos cercanas, concretamente plantas cuyas actividades están vinculadas a la siderurgia, ya que el residuo analizado es producto de las operaciones realizadas en este tipo de industria.

En todos los casos el residuo objeto de análisis es el lodo de acería LD, que se produce como resultado de las operaciones que engloban el proceso de producción de acero en las instalaciones de siderurgia integral. Conocidas las condiciones de cada localización, se aplicó la metodología seleccionada (Fernández et al., 2014) y se analizaron los resultados obtenidos.

## 2. Metodología de gestión de RSI utilizada

La finalidad de la metodología empleada (Fernández et al., 2014) es seleccionar, en base al análisis de diferentes aspectos o criterios, la solución o soluciones de tratamiento más adecuadas en función de las características y del entorno en el que se trate el residuo. Este procedimiento permite que el análisis se produzca de una forma más objetiva.

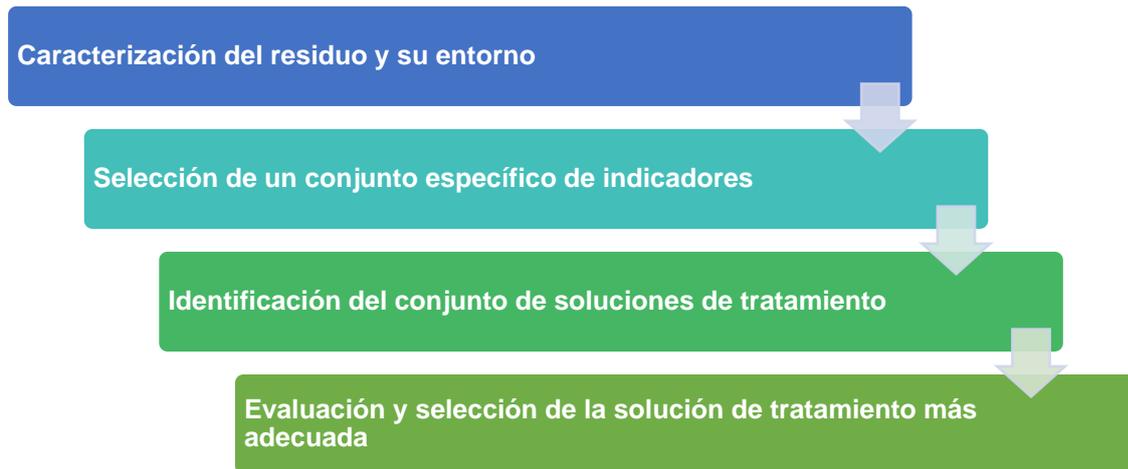
Dicha metodología tiene una serie de características que la hacen adecuada para el estudio del tratamiento de los residuos sólidos industriales:

- La primera de ellas es su *adaptabilidad*, ya que se adecúa sin ningún problema a cualquier tipo de residuo, sea sólido, o semisólido.
- Debido a su *carácter general*, se puede aplicar a diferentes tipos de residuos industriales y también se puede emplear en cualquier tipo de entorno, sin más que cambiar las condiciones de situación (clima, suelo, cercanía a áreas pobladas o hábitats naturales, etc.) de la instalación donde tiene lugar el proceso de gestión.
- Es una metodología *flexible*, ya que se pueden tener en cuenta diferentes tipos de procesos, en función del tipo de residuo de entrada al proceso. A la hora de analizar qué alternativa es la más válida, se pueden considerar otros criterios o indicadores medioambientales diferentes de los utilizados en el ejemplo.
- Es *fácil de manejar*, ya que el proceso de decisión, principio fundamental de funcionamiento de la metodología, ayuda y guía al usuario a lo largo de las diferentes

posibilidades de forma rápida, cómoda y sencilla. También es *fácil de actualizar*, ya que su estructura la hace ser una herramienta abierta, capaz de aceptar futuras mejoras y cambios que se puedan producir, como, por ejemplo, la inclusión de nuevos métodos de tratamiento, cambios derivados de la evolución de la tecnología, de las condiciones sociales o económicas.

Esta metodología utilizada se estructura en cuatro etapas (Figura 1) definidas a continuación:

**Figura 1: Esquema de desarrollo de la metodología**



Lo primero que hay que conocer son las características del residuo a tratar y del entorno en el que va a transcurrir el tratamiento, toda esta información se recoge en formatos de fichas, una con las características del residuo y otra con las del entorno.

- La **“Ficha del residuo”** caracteriza el residuo mediante información relativa a su identificación, origen y clasificación legal, composición e información sobre sus componentes, propiedades físicas y químicas, etc.
- De igual modo se ha denominado **“Ficha de entorno”** a la que recopila la información relativa a la situación y las condiciones del lugar en las que se va a encontrar el sistema de tratamiento, características del proceso o procesos de tratamiento del residuo y características del residuo final del tratamiento del RSI.

La segunda etapa consiste en la selección de un conjunto de indicadores específico para cada caso de aplicación, resultado de particularizar un sistema de indicadores de carácter general.

Para ello, el Sistema de Indicadores Medioambientales (SIM) diseñado de forma general para cualquier área de la empresa, se particulariza a la gestión de residuos configurando un Sistema de Indicadores Medioambientales para la Gestión de Residuos Sólidos (SIMGRE) que será el medio de valoración posterior de las posibles soluciones de tratamiento aplicables a estos residuos.

Las características de los indicadores se describen de manera detallada en una ficha de contenido informativo para cualquier indicador denominada **“Ficha de indicador”**.

En la tercera etapa se identifican las soluciones de tratamiento gracias a un **“Diagrama de selección de alternativas”**, que presenta el proceso necesario para el tratamiento de un residuo sólido desde su generación hasta su disposición, eliminación o reutilización, y funciona como un sistema de ayuda a la decisión, esta identificación se lleva a cabo teniendo en cuenta las características del residuo **“Ficha de residuo”** y el conjunto de técnicas disponibles, **“Ficha de proceso”**, que recopila los principales datos de interés de cada técnica

y los residuos a los que es aplicable. Cada una de estas soluciones pueden estar formada por más de un proceso de tratamiento.

La última etapa de la metodología permite seleccionar, de entre todas las soluciones posibles, previamente identificadas en la etapa anterior, aquella considerada como más adecuada. Para ello se dispone del conjunto de indicadores seleccionado que evalúa cada una de las soluciones disponibles, esta evaluación se lleva a cabo mediante la aplicación del Método analítico Jerárquico ó AHP (Analytical Hierarchy Process) desarrollado por Tomas Saaty en el año 1980 y posteriores (Saaty et al., 1980), (Saaty, T. L., 1995), (Saaty, 2000), (Saaty, T. L., 1980).

### 3. Selección de las localizaciones

Para la realización de este estudio se han escogido 5 zonas geográficas caracterizadas por diferentes condiciones del entorno tanto físico, como medioambiental y social.

El primer criterio para la selección, ha sido la búsqueda a nivel mundial de zonas industriales relativamente cercanas en las que se llevara a cabo trabajos o labores vinculadas con la industria siderúrgica en los que se obtuviese como producto de las operaciones realizadas el lodo de acería LD. Estos lodos son resultantes del tratamiento húmedo de los gases procedentes del proceso de fabricación del acero en el convertidor de oxígeno BOF denominado así por sus siglas en inglés, Basic Oxigen Furnace o también denominado convertidor LD cuyas siglas provienen de las dos compañías localizadas en Linz y Donawitz que desarrollaron este sistema.

Entre las localizaciones posibles y como segundo criterio, se han elegido zonas que tuvieran condiciones climáticas diferentes, según la clasificación climática desarrollada por Köppen. Este procedimiento se basa en observaciones empíricas (W. Köppen, 1900) con las que se establece un sistema de clasificación climática que utiliza temperaturas y precipitaciones mensuales para definir los límites de los diferentes tipos de clima a nivel mundial. Ésta clasificación fue revisada posteriormente (W. Köppen and R. Geiger, 1930), (W. Köppen and R. Geiger, 1936) y actualizada, (H Stern et al., 2000), (Peel et al., 2007) y es utilizada ampliamente a nivel mundial por meteorólogos y geógrafos (Chen and Chen, 2013), (Feng et al., 2014) además de ser la base de múltiples estudios científicos (Pražnikar, 2017), (Yoo and Rohli, 2016), (Almorox, J. and Quej, V. H., 2015).

Según dichas premisas, se escoge para su análisis un clima templado con temperaturas suaves en todas las estaciones del año, siendo la media de 13,5°C y una elevada humedad relativa (78%) con precipitaciones frecuentes, como ocurre en la localidad de Avilés, situada en la costa noroeste de España. Este caso se enfrenta a otros con climas más secos, como en Newcastle (Sudáfrica), en el que la humedad relativa es muchísimo menor (59%), las temperaturas medias son más altas (21'9 °C) y hay menos precipitaciones (543 mm).

Se han tenido también en cuenta climas ecuatoriales, donde los inviernos son secos pero el nivel de precipitaciones anuales se mantiene elevado a lo largo del año. Éste es el caso de Lázaro Cárdenas, con una media de precipitación de 1278 mm, esta localidad está situada cerca de la costa Pacífica de Méjico. En ella las temperaturas son las más elevadas, con medias de 27°C y la humedad relativa ocupa el segundo lugar después de la localidad de Avilés.

La humedad de la ciudad de Tubarao (61%), en Brasil, es inferior al caso de Méjico, mientras que las temperaturas son también elevadas (26,4°C) y siendo el nivel de precipitaciones más bajo que en el caso anterior (1003 mm), aunque relativamente cercanas a la localidad de Avilés.

En Pekín, las condiciones meteorológicas se aproximan a las de la ciudad de Newcastle en

Sudáfrica, aunque es más frío, (11,8°C) y seco (47%), el nivel de precipitaciones es un poco superior (577 mm) al de la capital china.

Todos estos datos aparecen reflejados en la Tabla 1. En el caso de España los datos se han obtenido de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, n.d.) y el resto de localidades los datos se han recogido del repositorio de la WMO, World Meteorological Organization (WMO, n.d.), desde la página oficial de la NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, perteneciente al Gobierno de los EEUU.

**Tabla 1: Características climáticas según localización**

	BOF	BOF	BOF	BOF	BOF
Centro siderúrgico	Avilés (España)	Lázaro Cárdenas, (Méjico)	Tubarao (Brasil)	Newcastle (Sudáfrica)	Beijing (China)
Localización de medida	Avilés	Acapulco	Sao Goncalo	Johannesburg	Beijing
zona	Industrial	Rural-Ciudad	Rural	Industrial	Industrial
Número de estación WMO	NA	76805	82689	68368	54511
Periodo (años)	1981-2010	1961-1990	1961-1990	1961-1990	1961-1990
Tipo de clima según Köppen	(Cfb) templado/muy húmedo/verano templado	(Aw) ecuatorial/invierno seco	(Cfa) templado/muy húmedo/verano caluroso	(Cwb) templado/invierno seco/verano templado	(Cwa) Templado/invierno seco/verano caliente
Distacia (km)	0	300	510	289	0
Temperatura media anual (°C)	13.5	27.5	26.4	21.9	11.8
Humedad media anual (%)	78	75,8	61	59.2	47
Precipitación total acumulada anual (mm)	1062	1278	1003.3	543	577
Velocidad del viento media anual (m/s)	3.5	2.2	2.82	2.78	2.5
Fuente datos	AEMET	WMO	WMO	WMO	WMO

Como último criterio se ha tenido en cuenta el tipo de zona, es decir, si se trata de un área industrial o rural y si es cercana o no a núcleos de población o reservas y áreas naturales (Tabla 1). Como localidades situadas en zonas industriales se consideran: Avilés, Newcastle y Pekín, frente a Tubarao y Lázaro Cárdenas, más próximas a áreas rurales con pequeños

núcleos de población y cerca de áreas consideradas patrimonio natural.

#### 4. Aplicación de la metodología:

El lodo de acería LD al que se le aplica la metodología, además de resultar un ejemplo de estudio muy interesante y representativo, supone un problema real, debido a que se generan importantes volúmenes de residuo, unos 27 kg de lodo LD por tonelada de metal caliente. Su composición fisicoquímica lo hace apto para que a la hora de tratarlo surjan diferentes alternativas o posibilidades, como se evidenció en el estudio de Fernández et. al (2014). Por otra parte, tiene un porcentaje de material valorizable, su parte metálica, que lo hace ser un producto reaprovechable tanto para la industria siderúrgica como para otro tipo de industrias.

Se comprueba el funcionamiento de la metodología según las localizaciones caracterizadas en la Tabla 1, donde se produce y trata el lodo de acería LD. Para ello se siguen los mismos pasos que en el estudio realizado por Fernández et. al (2014), obteniendo las seis posibles alternativas de tratamiento:

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

Cada una de estas alternativas está compuesta por un conjunto de tratamientos que comienza en el momento en el que el residuo entra en la instalación y termina cuando se obtiene el producto final. Se denotan con el nombre del último tratamiento de valorización aplicado al residuo, de esta forma se identifican mejor en las sucesivas etapas del análisis.

Por lo tanto, la alternativa 1A ceramización, no supone solamente un proceso de ceramización, sino un conjunto de tratamientos que engloban la gestión del residuo en los cuales el último de ellos es la ceramización.

Finalmente se escogen los 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).

1. Consumo específico de energía
2. Consumo específico de agua
3. Consumo específico de agentes químicos.
4. Volumen de efluentes líquidos
5. Volumen de emisiones gaseosas
6. Proporción total de sólido aprovechables
7. Costes operativos de producción medioambiental

En cuanto a los indicadores correspondientes a las condiciones del entorno que afectan a los procesos de tratamiento se han utilizado los siguientes:

8. Pluviosidad de la zona en la que está situada la instalación
9. Velocidad del viento respecto de la media en la zona en la que está situada la instalación
10. Proporción de patrimonio natural afectado
11. Proximidad a núcleos de población

Estos indicadores constituyen los criterios de decisión del método AHP, y con ellos se realiza la valoración cualitativa que completa la metodología como se hizo en (Fernández et al.,

2014).

Se aplica el método AHP a los cinco escenarios propuestos, para contrastar de qué manera pueden variar los resultados en función de las condiciones climatológicas y su cercanía a núcleos de población, zonas industriales, zonas rurales, reservas naturales, etc. donde transcurren los procesos de tratamiento.

En el análisis de toma de decisiones, al calcular la matriz de juicios por comparación pareada de las alternativas de tratamiento para cada uno de criterios o indicadores relacionados con el entorno, las ponderaciones de cada uno de estos criterios cambian en función de las localizaciones que se analicen, por ejemplo:

- En localidades húmedas y lluviosas, como son Avilés y Lázaro Cárdenas, se producen efluentes líquidos en las opciones correspondientes a las alternativas 2.2 A Fitorremediación y 2.2 B Biorremediación. Estas localidades, al estar situadas en un territorio húmedo y lluvioso hace que en los tratamientos en vertedero se produzcan más lixiviados que en climas más secos y con menos lluvias, de forma que la suma de las puntuaciones para el total de estas alternativas es mucho menor que para el caso 1A Ceramización. Se produce el efecto contrario en las localidades de Newcastle y Pekín, con una mejor puntuación del criterio efluentes, ya que se producen en menor cantidad al ser un clima más seco, hace que las alternativas de vertedero; 2.2 A Fitorremediación y 2.2 B Biorremediación aumenten.
- En zonas cercanas a parques naturales, o zonas rurales, donde la velocidad del viento es elevada, ocurre algo parecido. En ellas, los criterios o indicadores "Proporción de patrimonio natural afectado" o "Costes operativos de producción medioambiental", se convierten en factores o criterios negativos a la hora de ser ponderados. Esto es debido a que la contaminación gaseosa se desplaza a otras áreas cercanas a la instalación, como núcleos de población cercanos a la zona industrial o parques naturales. Este sería el caso de localidades como Avilés o Tubarao, en las que las puntuaciones de procesos de valorización como ceramización o vitrificación serán más bajos que los de vertedero o envío a gestor externo de sólidos peligrosos, Alternativa 2.1 A.

Una vez aplicado el método AHP a las cinco localizaciones teniendo en cuenta las ponderaciones de los indicadores según la zona donde se sitúa la instalación de tratamiento se obtienen las siguientes puntuaciones:

**Tabla 2: Soluciones el método de análisis jerárquico en diferentes localidades.**

Alternativas	Vector prioridad alternativa				
	Avilés	Lázaro Cárdenas	Tubarao	Newcastle	Pekin
	Industrial	Rural	Rural	Industrial	Industrial
1 A Ceramización	0.2635	0.2705	0.2602	0.1857	0.1857
1 B Vitrificación	0.2429	0.2516	0.2459	0.1923	0.1937
2.1 A gestor externo sol. peligrosos	0.2386	0.2381	0.2371	0.1801	0.1788
2.2 A Fitorremediación	0.0794	0.0882	0.0803	0.1776	0.1853
2.2 B Biorremediación	0.0692	0.0702	0.0703	0.1378	0.1393
2.2 C Vitrificación in situ	0.1063	0.0814	0.1062	0.1265	0.1173

## 5. Análisis de resultados

En los resultados de la Tabla 2 se observa como han variado las puntuaciones finales de las alternativas de tratamiento en función de las condiciones del entorno en las que transcurre el proceso.

En el caso de las tres primeras localizaciones, la instalación de gestión ubicada en Avilés, en un entorno Industrial, y las ubicadas en Lázaro Cárdenas y Tubarao, en entornos rurales, se observa que, comparándolas con las otras dos localizaciones, Newcastle y Pekín (zonas industriales), las alternativas de tratamiento mejor valoradas son diferentes. En los tres primeros casos la alternativa 1A. Ceramización es la opción preferida, mientras que en los dos segundos la mayor puntuación es para la alternativa 1B Vitrificación. En todos los casos se ven favorecidas las alternativas que finalizan en valorización (ceramización y vitrificación) frente a las de tratamiento final (vertedero) y 2.1 A. Gestor externo. Las puntuaciones varían debido a las siguientes causas:

1. Al ponderar las alternativas de tratamiento en climas húmedos y lluviosos, algunas de ellas empeoran por el aumento de lixiviados provocado por el exceso de agua. Éste es el caso de las tres primeras zonas, frente a las dos últimas, menos lluviosas. Como consecuencia:
  - a. En Newcastle, las alternativas de vertedero (fitorremediación y biorremediación) tienen mayores puntuaciones por ser tratamientos en los que se obtienen buenos resultados en climas con poca lluvia. Las plantas (Liphadzi et al., 2005) (Sharma and Pandey, 2014) y microorganismos de estas áreas (Yadav and Hassanizadeh, 2011), (Hejazi et al., 2003) desarrollan bien su actividad, limpiando la tierra de metales pesados. En este caso, las puntuaciones cambian hasta el punto que la alternativa de tratamiento difiere de las tres primeras localizaciones (Tabla 2), resultando 1.B vitrificación, la solución de tratamiento más adecuada. Lo mismo ocurre en Pekín, en las que se ven favorecidas las alternativas que finalizan en tratamiento (vertedero) y gestor externo, posicionando como mejor la alternativa 1B Ceramización.
  - b. En el caso de Lázaro Cárdenas ocurre lo contrario, ya que se ven favorecidas las alternativas que finalizan en valorización (ceramización y vitrificación) por ser una zona muy lluviosa y producirse lixiviados en los procesos de tratamiento en vertedero. Sin embargo, aumentan las puntuaciones de la alternativa 2.2 C

Vitrificación in situ, al producirse lixiviados, ya que el proceso no necesita agua ni tiene efluentes.

2. En las zonas rurales donde el hábitat natural es más diverso, como son Lázaro Cárdenas y Tubarao, se generan más impactos sobre el medioambiente (emisiones de gases) que en las industriales. Esto favorece la puntuación de las alternativas que incluyen depósito en vertedero, como 2.2 A Fitorremediación, 2.2 B Biorremediación, disminuyendo las que no, como 1 B vitrificación y 2.1 A gestor externo. Estos impactos también tienen lugar en Avilés, pero al ser un entorno industrial, el patrimonio natural y rural se ve menos afectado, por lo que las puntuaciones de vertedero no suben tanto como en la localización de Tubarao.
3. Todas las localizaciones tienen una velocidad del viento similar, siendo la más elevada en la localidad de Avilés. En esta zona las emisiones en forma de escapes que pueden irrumpir en la atmosfera, tienen más probabilidad de ser arrastradas a otra zona contaminando más el medio. Esto hace que los procesos de valorización sean mejor valorados que los de vertedero o envío a gestor, produciéndose el caso contrario en el resto de localizaciones, donde las velocidades del viento son más suaves.
4. Si se comparan las soluciones de tratamiento finales obtenidas en las cinco localizaciones se observa que los cambios de las condiciones de entorno provocan que los resultados varíen. Se pueden observar dos grupos, en función de la solución propuesta por la metodología como más adecuada, es decir, la alternativa 1 A Ceramización o bien la 1 B Vitrificación. Esto es debido fundamentalmente a que las condiciones de entorno establecidas al principio del análisis son considerablemente diferentes unas de otras y cambian la valoración de los indicadores.

## 6. Conclusiones

Se ha aplicado la metodología desarrollada por Fernández et. al (2014) para seleccionar la mejor alternativa de tratamiento, en cinco localizaciones diferentes, demostrando su aplicabilidad y flexibilidad. Dicha metodología permite la comparación de soluciones de tratamiento de un residuo industrial en diferentes condiciones. Junto a las características de dicho residuo permite considerar simultáneamente otros criterios o indicadores medioambientales.

Los resultados obtenidos muestran claramente que las condiciones del entorno en diferentes localizaciones pueden hacer variar la solución más adecuada para el tratamiento del mismo tipo de residuo. Las valoraciones cambian de forma significativa al modificar las condiciones del medio, de forma que se podría ampliar el estudio a otras localidades con características meteorológicas distintas. Del mismo modo, es posible la aplicación en otros ámbitos industriales, generadores de residuos diferentes al analizado y, por tanto, con alternativas de tratamiento totalmente ajenas a las del presente estudio.

## Bibliografía

- AEMET, n.d. Valores climatológicos normales: Asturias Aeropuerto - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España [WWW Document]. URL <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos> (accessed 3.17.17).
- Almorox, J., Quej, V. H., 2015. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *J. Hydrol.* 528, 514–522.
- Chen, D., Chen, H.W., 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environ. Dev.* 6, 69–79.
- Feng, S., Hu, Q., Huang, W., Ho, C.-H., Li, R., Tang, Z., 2014. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Glob. Planet. Change* 112, 41–52.
- Fernández, M., Palacios, H.M., Cabal, J.V.A., Huerta, G.M.M., 2014. Methodology for industrial solid waste management: implementation to sludge management in Asturias (Spain). *Waste Manag. Res. J. Int. Solid Wastes Public Clean. Assoc. ISWA* 32, 1103–1112.
- H Stern, G. de Hoedt, J. Ernst, 2000. Objective classification of Australian climates. *Aust. Meteorological Mag.* 49, 87–96.
- Hejazi, R.F., Husain, T., Khan, F.I., 2003. Landfarming operation of oily sludge in arid region—human health risk assessment. *J. Hazard. Mater.* 99, 287–302.
- Liphadzi, M.S., Kirkham, M.B., Musil, C.F., 2005. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals: a technology for rehabilitation of the environment. *South Afr. J. Bot.* 71, 24–37.
- Nadia Badr, Manal Fawzy, Khairia M. Al-Qahtani, 2012. Phytoremediation: An Ecological Solution to Heavy-Metal-Polluted Soil and Evaluation of Plant Removal Ability. *World Appl. Sci. J.* 16 16, 1292–1301.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci* 11, 1633–1644.
- Pražnikar, J., 2017. Particulate matter time-series and Köppen-Geiger climate classes in North America and Europe. *Atmos. Environ.* 150, 136–145.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. L., 1995. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. Pittsburgh: RWS publications.
- Saaty, T.L., 2000. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications.
- Saaty, T.L., Rogers, P.C., Pell, R., 1980. Portfolio selection through hierarchies. *J. Portf. Manag.* 6, 16–21.
- Sharma, P., Pandey, S., 2014. Status of Phytoremediation in World Scenario. *Int. J. Environ. Bioremediation Biodegrad. Int. J. Environ. Bioremediation Biodegrad.* 2, 178–191.
- W. Köppen, 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Z.* 6, 657–679.
- W. Köppen, R. Geiger, 1930. *Handbuch der Klimatologie*. Gebrueder Borntraeger, Berlin.
- W. Köppen, R. Geiger, 1936. *Das geographische System der Klimate*. Gebrüder Bornträger,

Berlin.

WMO, n.d. Global Climate Normals (1961-1990) | National Centers for Environmental Information (NCEI) formerly known as National Climatic Data Center (NCDC) [WWW Document]. URL <https://www.ncdc.noaa.gov/wdcmet/data-access-search-viewer-tools/global-climate-normals-1961-1990> (accessed 3.17.17).

Yadav, B.K., Hassanizadeh, S.M., 2011. An Overview of Biodegradation of LNAPLs in Coastal (Semi)-arid Environment. *Water. Air. Soil Pollut.* 220, 225–239.

Yoo, J., Rohli, R.V., 2016. Global distribution of Köppen–Geiger climate types during the Last Glacial Maximum, Mid-Holocene, and present. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 446, 326–337.