

## **1. INTRODUCCIÓN**

## **1. INTRODUCCIÓN**

La presente tesis se encuadra en el marco de la investigación desarrollada por dos proyectos centrados en la utilización de residuos de combustión del carbón, financiados por la CICYT (Plan Nacional de I+D en Medio Ambiente, AMB95-198) y por la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA 7220/ED/079). Además se ha contado con la ayuda del Programa de Becas Predoctorales para la Formación de Personal Investigador (FI) de la CIRIT (1998FI 00004). Dentro de este marco, el objetivo final es la optimización de los procesos para la obtención de zeolitas de interés industrial a partir de los residuos de combustión de centrales térmicas de carbón y en sus posibles aplicaciones industriales.

Se han seleccionado 19 cenizas volantes, 13 de ellas provenientes de centrales termoeléctricas españolas, 3 sudafricanas, 2 colombianas y 1 china, de esta forma se ha cubierto una amplia gama de cenizas con características morfológicas y químicas diversas.

### **1.1. CENIZAS VOLANTES DE LA COMBUSTION DEL CARBÓN**

El carbón está constituido por componentes orgánicos (fases macerales) y componentes inorgánicos (fases minerales) procedentes de la acumulación de restos vegetales y materia mineral en cuencas sedimentarias, y así como en su posterior evolución durante el enterramiento y diagénesis.

El carbón a utilizar en las centrales termoeléctricas es triturado, pulverizado y posteriormente introducido dentro de la cámara de combustión. Los componentes orgánicos son oxidados y volatilizados durante la combustión mientras que una gran parte de la materia mineral es transformada en subproductos residuales sólidos: cenizas volantes y escorias. Las cenizas volantes están compuestas por partículas que debido a su pequeño tamaño son arrastradas por el flujo de gases que se generan durante la combustión del carbón. Mientras que las escorias constituyen la parte del subproducto residual que no puede ser arrastrado por dicho flujo gaseoso y caen depositadas en el fondo de la cámara de combustión. El porcentaje de uno y de otro tipo de residuo depende de la configuración de la central, especialmente del tipo de caldera empleado.

Para retener las cenizas volantes del flujo de gases que sale de la cámara de combustión y evitar que sean emitidas a la atmósfera se emplean diversos sistemas de retención: filtros de tejidos especiales, colectores mecánicos

(ciclones), depuradores por vía húmeda y precipitadores electrostáticos, siendo este último el que presenta mayor eficiencia, por lo general superior al 99.5% (Smith, 1987). Las cenizas volantes se recogen en las tolvas de los precipitadores electrostáticos, desde donde son transportadas a lugares de almacenamiento, situados frecuentemente en balsas de decantación o en seco.

El almacenamiento en seco tiene como ventaja principal que las propiedades físico-químicas de las cenizas permanecen inalteradas, lo que constituye una reserva para su futura utilización. El almacenamiento en seco requiere de algunas medidas especiales para evitar los problemas asociados a la lixiviación de las cenizas volantes, es decir, la liberación de elementos metálicos al medio ambiente en general y en especial la contaminación de aguas subterráneas. La lixiviación estandarizada y los ensayos de difusión determinan la calidad ambiental de estos residuos en forma aglomerada y en bruto (Reardon et al., 1995; Khanra et al., 1998; Drakonaki et al., 1998; Wasay, 1992; Prasad et al., 1996; Wang et al., 1999; Duchesne y Reardon, 1999; Hjelmar, 1990; Carlson y Adriano, 1993; Lee, 1997; Jackson et al., 1999; Karuppia y Gupta, 1997; Jhonson et al., 1996; Janssen-Jurkovičová et al., 1994; Sloop, 1996 y Nugteren et al., 1999). La liberación de estos metales está fuertemente condicionada por el pH (Fleming et al., 1996).

Las cenizas volantes presentan generalmente una cobertura exterior reactiva sobre una matriz vítrea constituida principalmente de Si-Al. Esta capa está enriquecida en la mayor parte de los elementos de interés medioambiental, como As, Cr, Cs, Mo, S, Sb, Se, V y Zn, (Dudas y Warren, 1987) debido a procesos de condensación.

El Comité Europeo, CEN292/WG2 está desarrollando actualmente normas al respecto. Además de los metales pesados típicos, otros trabajos demuestran que también han de ser considerados elementos como As y Mo; ya que dependiendo del tipo de ceniza se presentan en cantidades significativas. Un ejemplo se da en las cenizas volantes provenientes de la central térmica de Puertollano con contenidos de As>100ppm, Pb>1000ppm y Zn>1000ppm según los resultados obtenidos en este estudio.

Las cenizas volantes generalmente están compuestas por un aglomerado de microesferas (cenoesferas y pleuroesferas) de hasta cientos de  $\mu\text{m}$  de diámetro. Estas microesferas están constituidas principalmente por Si y Al con cantidades menores de Fe, Na, K, Ca, P, Ti, y S. Los principales compuestos minerales son aluminosilicatos amorfos (vítreos), pero también están presentes otros minerales como la mullita, cuarzo, hematita, magnetita, cal, anhidrita, y feldespatos.

Las centrales termoeléctricas utilizan dos sistemas de combustión del carbón PC (*pulverised coal*) y el FBC (*fluidised bed combustion*), las cenizas volantes producidas por el primer sistema pueden clasificarse en dos grupos según sus

propiedades de acuerdo a la Norma ASTM C618 (Gebler y Klieger, 1986): las de carácter cementante están catalogadas, como de clase C y las de naturaleza puzolánica como de clase F (Tabla 1.1). Además, dependiendo de sus características mineralógicas y químicas pueden clasificarse como siálicas, ferrosiálicas, sulfocálcicas, calciosiálicas y ricas en fases de aluminosilicatadas. El segundo sistema de combustión produce cenizas volantes ricas en calcio y en sulfatos.

**Tabla 1.1. Clasificación de las cenizas volantes. Norma ASTM-C618.**

	<b>CLASE F</b>	<b>CLASE C</b>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70% mín	50% mín
MgO	5% máx	5% máx
SO <sub>3</sub>	5% máx	5% máx
Humedad	3% máx	3% máx
Pérdidas a la incineración	6% máx	6% máx

Las propiedades físicas y químicas de los productos de combustión del carbón están muy documentadas y sus variaciones dependen principalmente del tipo de carbón utilizado y de la técnica de combustión empleada (Vasilev y Vasileva, 1996; Querol et al., 1995; Graham y Hower, 1994; Mings et al., 1990; White y Case, 1990; Graham y Hower, 1994)

## **1.2. PRODUCCION DE CENIZAS VOLANTES Y RECICLAJE**

La creciente demanda de energía eléctrica ha creado la necesidad de construcción de grandes centrales termoeléctricas en donde el carbón es el principal combustible utilizado. Las previsiones de la UE del programa Thermie (1992), estimaban para el siglo XXI un incremento del 30% en la producción de energía eléctrica a partir del carbón. Esto implica un incremento en el consumo de carbón y por consiguiente en la generación de residuos de combustión en un futuro próximo.

Diariamente se generan cantidades considerables de cenizas volantes y escoria debido al alto consumo de carbón y al contenido de materia mineral del mismo. La combustión de 1 Tm de carbón genera un promedio de 80 a 250 kg de residuos dependiendo del tipo de carbón utilizado (PROGRES, 1997).

A escala mundial el mayor productor de cenizas volantes es China, en segundo lugar Rusia y el tercer puesto lo ocupa E.E.U.U. La producción de cenizas volantes de la combustión del carbón en E.E.U.U. y Europa se estima en 88 y 55 millones de toneladas por año respectivamente (Bossart y Newman, 1995; ECOBA, 2001). De esta producción, una proporción muy baja es reciclada (22% en E.E.U.U. Bossart y Newman 1995) y en promedio solo el 50% en la

## 1. Introducción

UE presentándose grandes diferencias de un país a otro (Manz, 1997, Tabla 1.2). España tiene una producción aproximada de 9 millones de toneladas de las cuales se recicla aproximadamente un 63% (Tabla 1.2).

Los problemas ambientales ocasionados por la combustión del carbón son de gran importancia para el desarrollo sostenible de la electricidad y de industrias relacionadas con la utilización de estos residuos en el siglo XXI. Las convenciones de Río de Janeiro en 1992 y Kioto en 1997, mostraron que las emisiones descontroladas de gases a la atmósfera no pueden por más tiempo ser política ni socialmente aceptadas. La sustitución de una tonelada de cemento portland por una tonelada de ceniza volante elimina una tonelada de CO<sub>2</sub> emitido durante la producción de cemento (Stewart y Kalyonku, 1998).

**Tabla 1.2. Producción y utilización de cenizas volantes por países, según Manz (1997). CV, cenizas volantes; F+E, cenizas de fondo y escorias; REC, total reciclado; N.D., No determinado. Unidades en miles de toneladas.**

PAÍS	AÑO	CV	F+E	TOTAL	REC	%REC
HOLANDA	1992	780 <sup>a</sup>	82	862	883	102.4
ARGENTINA <sup>b</sup>	1992	35	10	45	45	100
ALEMANIA	1992	14300	5740	20040	19840	99
FRANCIA	1993	1436	287	1723	1636	95
COREA SUR	1992	1868	3701	5569	5217	93.7
ISRAEL	1992	462	61	523	479	91.6
PORTUGAL	1992	335	39	374	335	89.6
GRECIA	1992	7000	630 <sup>c</sup>	7630	6800	89.1
POLONIA	1992	14010	N.D.	14010	11995	85.6
DINAMARCA	1992	1043	133	1176	920	78.2
ESPAÑA	1992	7444	1431	8875	5582	62.9
HONG KONG	1992	841	71	912	553	60.6
TAIWAN	1994	1206	299	1505	882	58.6
COLOMBIA	1992	924	126	1050	590	56.2
JAPON	1992	3659	472	4131	2153	52.1
ITALIA	1992	910	102	1012	507	50.1
FINLANDIA	1993	490	90	580	230	39.7
CHINA	1992	80641	10498	91139	34100	37.4
IRLANDA	1992	200	22	222	80	36
REINO UNIDO	1989	13300	2200	15500	5467	35.3
USA	1992	43631	16368	59999	18183	30.3

<sup>a</sup> + 1900 toneladas importadas de Alemania; 53% de la producción exportada a Francia/Bélgica.

<sup>b</sup> Existe tan solo una planta termoeléctrica de carbón en Argentina

<sup>c</sup> Estimado a partir de datos anteriores. Grecia es el cuarto país del mundo en utilización de cenizas volantes en la industria cementera.

Los residuos de combustión del carbón contienen más del 70% de material sílico-aluminoso vítreo lo cual hace posible que sean utilizados como materia prima para rellenos inertes y funcionales, adsorbentes, inmovilizadores, y materiales de construcción de alto valor. Mientras que los componentes

indeseables como los metales pesados están presentes tan solo como trazas, con excepciones muy puntuales.

En Holanda se recicla el 100% de la producción. Además, un estudio de mercado realizado por PROGRES (1997) ha mostrado que en Holanda el mercado potencial en los sectores mencionados de nuevos productos derivados de las cenizas volantes, sin incluir las aplicaciones convencionales, es de 175000 Tm año<sup>-1</sup>, lo que implica el aprovechamiento de más del 20% de los residuos producidos.

Los beneficios económicos esperados de los diferentes productos se pueden estimar entre 20 y 40 EUR por tonelada (5 MEUR/año), sin considerar el beneficio ambiental y la pérdida que representa si los residuos no son utilizados apropiadamente o infravalorados.

El análisis estratégico de proyectos de conversión de cenizas volantes ha determinado un ratio de retorno a la inversión entre 88 y 221 MEUR/año (Wels, 1996). Extrapolando a nivel Europeo y subestimando la utilización de las cenizas en un 10-15% se podrían obtener beneficios, aun así, de 200 a 300 MEUR/año (PROGRES, 1997).

La posibilidad de procesar las cenizas volantes para convertirlas en productos de interés para mercados específicos es algo que como hemos visto se ha demostrado. Este aprovechamiento no solo representa una oportunidad única de mercado, sino una necesidad dado el impacto ambiental que se deriva del almacenamiento indiscriminado de estos residuos.

Todo lo anterior conlleva a la participación de la comunidad investigadora hacia una mayor comprensión de las características fundamentales de las cenizas; por ejemplo, en qué grado las características de la superficie controlan la reactividad, y qué técnicas de beneficio son aplicables para maximizar esta característica particular.

El conocimiento de las necesidades del mercado y la relación simbiótica entre el investigador y el desarrollo de productos es de suma importancia para la creación de nuevos campos para el reciclaje de las cenizas volantes (Kruger, 1997).

### **1.3. APLICACIONES DE LAS CENIZAS VOLANTES**

Tradicionalmente estos productos de combustión son utilizados como materiales de construcción en obras de ingeniería civil (ECOBA, 2001). Esta aplicación puede dividirse en un sentido amplio en aplicaciones en forma aglomerada y en bruto (Goumans et al., 1994).

## 1. Introducción

---

Diversas aplicaciones han sido estudiadas en todo el mundo, y algunas ya están establecidas y tienen una práctica común. Entre ellas merecen ser destacadas las siguientes (Goumans et al., 1994):

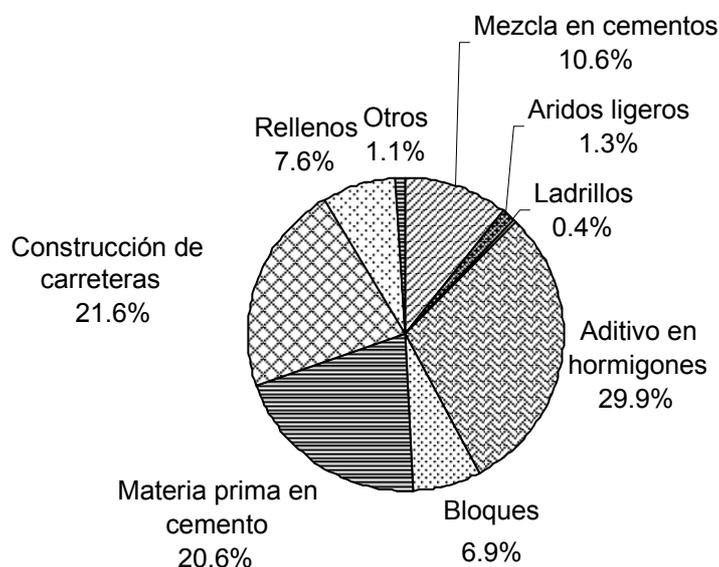
### FORMA AGLOMERADA:

- Aditivos en cemento y hormigón.
- Fabricación de ladrillos.
- Fabricación de áridos artificiales (Aardelita).
- Fabricación de materiales refractarios.
- Aditivos sustitutivos en la industria cerámica.

### EN BRUTO

- Construcción de caminos y ferrovías y como material para pavimentos.
- Material de relleno en minería.
- Aditivos para suelos.

La Figura 1.1 muestra las principales aplicaciones dadas por la Unión Europea (UE 15) a las cenizas volantes durante 1999 (ECOBA, 2001). La mayor parte de estos residuos tienen aplicación en la industria de la construcción (aproximadamente 48%).



**Figura 1.1. Utilización de las cenizas volantes en la industria de la construcción y minera en la Unión Europea (UE 15) en 1999 (ECOBA 2001).**

La restauración de minas a cielo abierto, minas de carbón y de canteras utilizan el 40% de la producción de cenizas volantes y aproximadamente el 2% es

almacenado para una futura utilización.

### **1.3.1. Nuevos productos y aplicaciones**

Una aplicación interesante de los residuos de combustión vítreos es el uso de éstos como aditivos reactivos en lugar de cemento (Eymael y Cornelissen, 1996) o en procesos de inmovilización de otros residuos (Chang y Shi, 1995 y Lee et al., 1996).

Recientemente se han obtenido resultados satisfactorios con respecto a la inmovilización y estabilización de lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales (Dirk, 1996; Patane et al., 1996), polvos de fundición de acero (Andrés et al., 1995), lodos de hidróxidos de la industria galvánica (proyecto en conjunto de Progres y PM: MHYSTI BRE2 CT94 0968) y en residuos industriales (Proyecto ECSC 7220/ED/079 AICIA-ECSC, 1996).

Se ha estudiado la recuperación de metales a partir de las cenizas volantes (Mavros et al., 1993; Lakshnanan, 1990; Lee, 1994; Takahashi et al., 1996). Técnicamente las cenizas volantes pueden ser utilizadas como una fuente alterna de aluminio, pero no son competitivas con las tradicionales fuentes de bauxita (Bolt, 1985, McDowell y Seeley, 1980). También como fuentes de Fe y Si (Pickles et al., 1990). Otros metales tales como el Ge y el Ga fueron recuperados de cenizas típicamente altas en estos metales (Tsuboi et al., 1991 y Lisowyj et al., 1987), al igual que el V y el Ni (Lakshmanan et al., 1986).

En países de gran tradición minera, las mezclas de cenizas volantes son utilizadas para la estabilización de antiguas explotaciones mineras (Jarvis y Brooks 1996). Otras aplicaciones más puntuales son la construcción de arrecifes artificiales para la industria pesquera (Collins et al., 1991), adsorbentes para la desulfurización de gas de combustión (Garea et al., 1997) y materiales de construcción a prueba de fuego (Vilches et al., 2001).

Investigaciones notables en el campo de la aplicación de las cenizas volantes se han realizado en:

- Japón (Inoe et al., 1993): Construcción, arrecifes artificiales, islas y terrenos de pesca, conversión en fertilizantes y zeolitas (a escala de laboratorio), vitrificación y recuperación de materiales.
- USA (Lisowyj et al., 1987): Recuperación de Al, Ge y Ga, adsorbentes, rellenos industriales, estabilización de residuos.
- Canadá (Pickles et al., 1990): Principalmente actividades relacionadas con la minería (material de relleno, barreras hidráulicas, recuperación de metales).

- China (Lin y Hsi, 1995): Recuperación de aluminio y zeolitización.
- Corea (Park y Choi, 1995): Zeolitización.
- España (Querol et al., 1995 y 1997): Zeolitización
- España (Vilches et al., 2001): Construcción de paneles de construcción contra incendios.
- Israel (Singer y Berggaut 1995): Zeolitización.
- Sudáfrica (Kruger, 1991): Rellenos, estabilización de residuos, micronización, separación y actualmente se investiga la utilización de una mezcla de ceniza volante y lodos residuales para la preparación de tierra artificial especial para uso agrícola denominada "Slash". (Reynolds et al., 1999).

Las investigaciones hechas fuera de la UE frecuentemente no son aplicables directamente como soporte a las investigaciones realizadas dentro de ésta por:

- Los residuos producidos fuera de la UE son obtenidos generalmente a partir de una técnica de combustión diferente y/o poseen diferente calidad ambiental.
- Los mercados dentro de la UE están mejor establecidos, definidos y más cercanos a las fuentes de los residuos.
- La mayoría de las aplicaciones exploradas en muchos países (principalmente en Japón) no son apropiadas para la legislación prevalente en los estados de la UE.

Una de las aplicaciones de mayor interés de las cenizas volantes para obtener un producto de alto valor añadido es la síntesis de zeolitas, la cual se explica a continuación.

### 1.3.2. Síntesis de zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos, naturales o sintéticos, cuya estructura cristalina presenta cavidades con aberturas aproximadamente circulares de diámetro único que oscila entre 2 y 10 Å. El tamaño de estos canales impide la entrada de moléculas voluminosas, por lo que también se les conoce como tamices moleculares (Breck et al., 1974).

Las zeolitas tienen, además, otra propiedad útil derivada de su estructura: el agua puede pasar fácilmente por los canales y en este proceso, iones en solución pueden ser cambiados por iones de la estructura mediante procesos de intercambio iónico.

Aunque la aplicación industrial intensiva de las zeolitas ha tenido lugar durante los últimos 30 años, las propiedades de las zeolitas naturales ya se conocían en el siglo XIX, habiéndose realizado estudios sobre su capacidad de adsorción e intercambio iónico en los primeros decenios del siglo XX (Lefond, 1975).

Las cenizas volantes son una fuente de aluminio y silicio, los cuales son los principales elementos en la composición de las zeolitas, debido a ésto, al alto contenido de fases reactivas de las cenizas volantes y a la granulometría fina de las mismas, hacen que este residuo de combustión sea materia prima excelente para la síntesis de zeolitas (Querol et al., 1997) por medio de la activación hidrotermal alcalina (adición de soluciones de hidróxidos), las cenizas pueden ser convertidas en zeolitas. Los rendimientos de conversión de las cenizas volantes en zeolitas reportados pueden variar entre el 50% al 75% (Singer y Berkgaut, 1995).

La conversión de cenizas volantes en material zeolítico es estudiada desde hace más de 25 años (Ishikawa, 1973), principalmente por investigadores asiáticos y europeos (Inoe et al., 1993; Haruna y Meguro, 1990; Haruna, 1987 y 1989; Hüller y Hantschel 1989; Huller, 1989; Kato, 1985; Kato y Kakimoto, 1987; Shigemoto, 1993 y 1995; Lin y Hsi, 1995; Watanabe et al., 1993; Larosa, 1992; Okada, 1991; Mondragón et al., 1990; Hemni, 1987; Bergk et al., 1986 y 1987; Stamboliev et al., 1985; Höller y Wirscing, 1985, Amrheim et al., 1996; Kolousek et al., 1994; Kim et al., 1997; Meguro et al., 1997; Hollman et al., 1997; Ma, 1997; Grutzeck y Siemer, 1997 y Steenbruggen y Hollman, 1998).

Dependiendo de las condiciones experimentales y de la composición química de la ceniza utilizada se han obtenido diferentes tipos de zeolitas.

Los parámetros más importantes a tener en cuenta en los procesos de zeolitización son la composición química de la ceniza volante, la composición de la solución de la reacción, la relación líquido/sólido, temperatura, tiempo de reacción y agitación de la mezcla.

- Composición química de la ceniza volante. El contenido de metales alcalinos (Hüller y Hantschel, 1989) y la relación Si/Al (Shigemoto et al., 1995) condicionan el tipo de zeolita obtenida. Las zeolitas con bajo contenido de silicio presentan un mejor comportamiento en cuanto a la capacidad de intercambio iónico, una alta selectividad por moléculas polares y un gran volumen de poros (Höller y Wirscing, 1985).

- Composición de la solución activante. Las zeolitas son estables a valores de pH altos y son así sintetizadas por la adición de soluciones de hidróxidos. Se han utilizado soluciones de hidróxido de Na, K, Ca, Li, Ba y Sr. En algunos casos se han utilizado otros activantes como cloruros, carbonatos, silicatos y aluminatos para influir en el tipo de zeolita obtenida. Sin embargo, los mecanismos relacionados con el proceso no están aún muy bien comprendidos.
- Relación líquido/sólido (L/S). La relación L/S influye en el rendimiento de la reacción y en el tipo de zeolita formada. La relación L/S de los experimentos reportados está entre 2 y 50 (Querol et al., 1995). Este factor es de gran importancia desde el punto de vista económico pues el elevado consumo de agua, el secado de las cenizas volantes y tratamiento de las soluciones para su reutilización ocasionan gastos adicionales.
- Temperatura. Los experimentos más frecuentes se han realizado generalmente con temperaturas entre 20 y 250 °C. Con temperaturas inferiores a 150 °C parece que se sintetizan la mayor parte de las zeolitas, exceptuando a la cancrinita que se obtiene a temperaturas por encima de 200°C (Lin y Hsi, 1995, Ghobark H y Schaf, 1999).
- Tiempo de conversión. Se han realizado experimentos recientemente en donde los tiempos de activación necesarios para la obtención de zeolitas es reducido desde 24-48 horas a tan solo 30 minutos, por medio del uso de microondas (Querol et al., 1997), pero con los métodos convencionales se puede llegar a necesitar desde horas hasta días (Höller y Wirshing, 1985).
- Agitación. La velocidad de agitación influye en el tipo de zeolita formada, así como la distribución de tamaño de grano y la velocidad de reacción (Berg et al., 1986).

### 1.3.3. Aplicaciones de las zeolitas obtenidas de cenizas volantes

Las zeolitas comerciales para aplicación catalítica son sintetizadas por medio de productos químicos puros. Dado el grado de pureza que este tipo de zeolitas exige, hasta ahora no se han podido sintetizar a partir de cenizas volantes, pero se espera que las zeolitas obtenidas a partir de estos residuos puedan competir con algunas zeolitas catalíticas en aplicaciones tales como:

- Adsorbente en filtros de agua y aire (García, 2001).
- Capa aislante en los terrenos de industrias nuevas (ECOBA, 2001).
- Aislante inferior en los depósitos de residuos (ECOBA, 2001).
- En tareas de limpieza de suelos (Domy, 2001).
- En un gran número de aplicaciones agrícolas (ECOBA; 2001 y Reynolds et al., 1999).
- Tratamiento de efluentes residuales metalúrgicos (Hanson, 1995).
- Efluentes de plantas de aguas residuales, y tratamiento de las aguas residuales agrícolas principalmente para la captación de iones (Hanson, 1995).
- Captación de gases como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, etc. (García, 2000 y Mumpton, 1977).
- Intercambiadores iónicos. (Hemni, 1987; Singer y Bergaut, 1995; Lin y Hsi, 1995; Querol et al., 1997; Ricou et al., 1998; Shih y Chang, 1996; Ma, Brown y Komarneni, 1998. Chang y Shih, 1998. Suyama et al., 1996; Ye et al., 1996; Patane et al., 1996; Lin et al., 1998; Kim W. y Lee et al., 1998).
- Control de olores (Hanson, 1995 y Mumpton, 1977).
- Agricultura, acondicionamiento de suelos, tratamiento de excrementos de animales. (Hanson, 1995, Domy, 2001 y Mumpton, 1977).

A mi juicio, la aplicación con más posibilidades de desarrollo es la utilización de los materiales zeolíticos como intercambiadores iónicos.