UNIVERSIDAD DE MATANZAS
"CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE INGENIERIAS QUÍMICA – MECANICA.

MONOGRAFÍA

GESTIÓN DE LODOS DE EDARs URBANAS. APROVECHAMIENTO COMO CARBÓN ACTIVADO

AUTORES: Dra. Lourdes Yámen González Sáez.[1] lourdes.gonzalez@umcc.cu
Dra. Juana Zoila Junco Horta[1]. juanazoila.junco@umcc.cu
Dra. Marta Otero Cabelo[2]. dfqmoc@unileon.es
Dr. Giovanni Pardini [3]. giovanni.pardini@udg.es
[1] Centro de Estudios de Medio Ambiente de Matanzas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Cuba.
[2] Instituto de Recursos Naturales. Universidad de León, España.
[3] Universidad de Girona. España.

Noviembre, 2006

GESTIÓN DE LODOS DE EDARs URBANAS. APROVECHAMIENTO COMO CARBÓN ACTIVADO.

AUTORES: Dra. Lourdes Yámen González Sáez.[1] lourdes.gonzalez@umcc.cu
Dra. Juana Zoila Junco Horta[1]. juanazoila.junco@umcc.cu
Dra. Marta Otero Cabelo[2]. dfqmoc@unileon.es
Dr. Giovanni Pardini [3]. giovanni.pardini@udg.es

[1] Centro de Estudios de Medio Ambiente de Matanzas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Cuba. Autopista a Varadero, Km 3½.
[2] Instituto de Recursos Naturales. Universidad de León, España.
[3] Universidad de Girona. España.

RESUMEN

Una de las consecuencias de todo tratamiento de depuración de agua residual es la obtención de un subproducto de naturaleza orgánica, en forma de suspensión más o menos concentrada, que reúne los elementos contaminantes y sus productos de transformación conocidos como fangos, lodos o también llamados biosólidos. La producción de fangos es tanto en cantidad como en calidad, muy variable y depende de las características del agua residual y del tipo de tecnología aplicada en el tratamiento. Afrontar de forma integral el problema de las aguas residuales, incluyendo todos los aspectos inducidos, como son la disposición de los lodos y su impacto ambiental, suele ser una labor difícil pero se debe escoger, siempre que sea posible, aquella alternativa que resulte menos agresiva para el entorno. A pesar de las alternativas de gestión de fangos que se llevan a cabo, una fracción importante no se valoriza; es necesario, pues, buscar nuevas alternativas para el reciclado como es la transformación de los fangos en carbón activo.
En la purificación de aguas residuales, la adsorción con carbón activo permite mitigar muchos de los problemas medioambientales que afectan a los ecosistemas y la calidad de los recursos hídricos, dentro de los que cabe destacar los derivados del vertido de contaminantes orgánicos, especialmente resinas orgánicas, partículas coloidales, tales como materiales aceitosas en agua, polvos, minerales precipitados y ciertos tipos de polímeros orgánicos, como el almidón, disolventes de amplia utilización, compuestos coloreados, ácidos grasos e hidrocarburos difíciles de remover por tratamiento convencional, además facilita la evacuación de los residuales industriales y domésticos, insuficientemente tratados, los cuales pueden aportar al medio natural importantes concentraciones de elementos tóxicos como metales pesados, contaminación bacteriana y compuestos coloreados.

INTRODUCCIÓN.

En las últimas décadas se ha divulgado ampliamente los problemas del medio ambiente en su dimensión planetaria. Desde hace años se comenzó a interesarse

por dichos problemas, sin embargo, se ha continuado causando daños irreversibles sin darse cuenta que el pequeño planeta azul es muy vulnerable.

La degradación del Medio Ambiente se produce a un ritmo acelerado y acumulativo, es hora de medir las consecuencias de los actos cotidianos si no las generaciones futuras están condenadas a vegetar en un planeta moribundo. Los seres humanos, en la búsqueda del desarrollo económico y del goce de las riquezas naturales, deberán hacer frente a la realidad de lo limitado que son los recursos y la capacidad de los ecosistemas y deberán tener en cuenta las necesidades de las generaciones futuras. Si bien la finalidad del desarrollo es proporcionar el bienestar social y económico, el objeto de la conservación es, en cambio, el de mantener la capacidad de la tierra para sostener igual desarrollo y respaldar la vida. Es por eso que el desarrollo sostenible se concibe como aquel que satisface las necesidades del presente al garantizar una equidad intrageneracional, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las propias.

Si para los países en desarrollo, el reto de alcanzar la sostenibilidad requiere de grandes transformaciones políticas, económicas y sociales; para Cuba estas transformaciones son un hecho materializado. Cuba no ha permanecido al margen de la preocupación de la comunidad científica, los gobiernos y la opinión pública Internacional sobre los problemas medioambientales, su medioambiente es patrimonio e interés fundamental de la nación y su protección responsabilidad del Estado, la sociedad y el individuo. Sin embargo, la difícil situación económica por la que atraviesa el país en los últimos años ha gravitado sin dudas sobre la explotación de los recursos naturales y limitado emprender acciones para su conservación.

La existencia en la provincia de Matanzas de EDARs urbanas y la proyección y construcción de nuevas instalaciones, fundamentalmente en el polo turístico de Varadero, y sobre todo el crecimiento de este renglón económico en el país, hacen de estas una fuente de obtención de residuos sólidos, capaz de generar una cantidad de lodos que se requieren evacuar. En la actualidad estos lodos se disponen en vertederos y unos pocos en agricultura. Esta última variante ha quedado demostrada, en estudios realizados, con magníficos resultados (Acevedo, 2001; Otero, 1999).

Sin embargo, la disposición de los fangos en vertederos, es una alternativa aplicable en áreas poco pobladas, con terreno disponibles a bajo precio con capacidad suficiente para aceptar los lodos producidos. En cualquier caso, tanto el lodo como el suelo, se convierten en inutilizables durante largos períodos de tiempo. La problemática medioambiental potencial de este sistema de eliminación se debe fundamentalmente al arrastre por lixiviación de sustancias contaminantes, a cauces públicos o aguas subterráneas. En algunos casos, resulta necesario, plantearse el vertedero como sistema de eliminación provisional, hasta la finalización de los estudios necesarios para poder aplicar sistemas alternativos de

utilización.

La gestión de los lodos ha tomado interés desde hace algunas décadas por su repercusión medioambiental lo que ha propiciado el análisis de alternativas de reuso de este residuo con diferentes finalidades. En estudios realizados se ha demostrado que los lodos de depuradoras urbanas pueden ser valorizado para la elaboración de carbones activados (Kordel, 1997; Otero 1999; Martín, 1999; Walhof, 1999; Jeyaseelen, 1999).

En Cuba el carbón activado es un producto fundamental de importación, con un costo muy elevado. La producción nacional no da abasto a las necesidades del país, es por eso que en los últimos años se ha prescindido del uso del carbón activado en Cuba (Hernández, E; 2000).El desarrollo de investigaciones para la implementación de tecnologías que permitan producir carbón activado a partir de materias primas nacionales tiene como objetivo principal sustituir, de manera competitiva, las importaciones actuales de este producto.

DESARROLLO.

1. SITUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL ACTUAL.

1.1. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL NACIONAL.

La capacidad de un país para enfrentar los problemas ambientales depende en gran medida de su nivel organizativo y de la conciencia de su gobierno, organizaciones sociales y de los ciudadanos, en general. En Cuba se han obtenido logros incuestionables que avalan las profundas transformaciones económicas y sociales alcanzadas, los cuales constituyen una importante contribución a la protección del entorno; pero paralelamente existieron errores y deficiencias dados en lo fundamental por la insuficiente conciencia, conocimiento y educación ambiental de un porcentaje considerable de la población; lo que provocó en ocasiones su agravamiento. Sin embargo, en los últimos años, la idea de la sostenibilidad lejos de debilitarse se ha reforzado, ya que se ha adquirido mayor conciencia y nuevas habilidades para emplear de modo racional los recursos, dentro de los que se destaca la búsqueda de variantes de aplicación de prácticas de producción más limpia.

Se trata de considerar las producciones como un proceso de mejora continua con la consiguiente eliminación de residuales y contaminación que requieren que la investigación y el desarrollo se centren en el proceso por completo; del diseño al reciclaje, reutilización o revalorización de los materiales; en el que se prioricen las oportunidades para la prevención antes de recurrir a medidas que contrarresten los efectos de la contaminación (Seoánez, M, 1998; Díaz, 1999).

La complejidad y exigencias actuales del desarrollo económico y social reorientado hacia actividades que producen impacto ambiental significativo; como **el turismo**, la minería o algunas producciones de alta tecnología; la apertura de la inversión extranjera y las insuficiencias de la legislación ambiental, han impuesto la necesidad del fortalecimiento institucional para la atención y control de la política ambiental del país. Es por eso que la política ambiental cubana se ha proyectado a través de una estrategia ambiental para el desarrollo sostenible, basada en la continuidad y perfeccionamiento de los objetivos iniciales del proceso. La estrategia cubana para el desarrollo sostenible es, en esencia, una estrategia de continuidad. El estado cubano ha declarado la soberanía nacional sobre los recursos naturales y ha promovido un activo proceso de recuperación y protección de estos, el cual tiene por centro al hombre y la satisfacción integral de las necesidades materiales, educacionales, culturales y estéticas e incorpora a toda la sociedad en la atención de los problemas ambientales (Pichardo, 1997; Díaz, 1999; Llanez, 1999).

La coyuntura actual demanda una concepción integral del desarrollo sostenible entendido como un proceso donde las políticas de desarrollo económico, científica-tecnológica, fiscales, de comercio, energía, agricultura, industria, entre otras, se entrelazan con las exigencias de la protección del medio ambiente y el uso de los recursos naturales en un marco de justicia y equidad social. Esta concepción está diseminada por todo el país de forma que cada territorio y provincia tienen definida su estrategia ambiental. La provincia de Matanzas no se encuentra, por tanto, al margen de este accionar y ya en 1998 se aprueba la Estrategia Ambiental

Provincial.

1.2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL PROVINCIAL.

Matanzas posee una extensión geográfica de 1180751 ha, cuyo mayor porcentaje es tierra firme, con sólo 2 % de cayos. Los principales planes de desarrollo con que cuenta son los terrenos agrícolas dedicados a cultivos varios, caña de azúcar, cítricos y ganadería; aguas subterráneas utilizadas en todas las actividades socio-económicas; bosques como recursos forestales y florísticos; la Península de Hicacos con la Playa de Varadero que concentra más del 95 % del turismo de sol y playa del país; los yacimientos gasopetrolíferos mayores del país; yacimientos minerales no metálicos y fangos minero medicinales distribuidos por todo el territorio.

Las principales industrias químicas-energéticas de la provincia están situadas al nordeste de la ciudad. Todas estas actividades unidas a la agudización del proceso de desarrollo socio-económico crearon una serie de problemas medioambientales para los cuales el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) elabora la Estrategia Ambiental Provincial con el fin de valorarlos y darles solución.

El deterioro del saneamiento y las condiciones ambientales en asentamientos humanos constituye uno de los principales problemas ambientales detectados, el cual repercute en la actividad socio-económica de la provincia. Este deterioro está condicionado, por una parte, por insuficiencias en el suministro estable de los productos necesarios para el tratamiento del agua potable, lo que unido al deterioro de las instalaciones donde se ejecuta el tratamiento ha provocado que en los últimos años existan limitaciones en el servicio de agua potable en cuanto a su calidad y cantidad.

Otro indicador de este problema es la **recolección y disposición de los desechos sólidos** el cual muestra serias afectaciones debido a restricciones con el parque automotor y con la disponibilidad de depósitos para la recolección de la basura. Existen, además, **deficiencias en el estado higiénico-sanitario de los vertederos** y su protección adecuada, así como la incorrecta recolección y disposición de los residuos hospitalarios que en muchas ocasiones se recolectan con la basura domiciliaria y constituyen un riesgo para la salud ocasionando la proliferación de vectores.

Otro de los problemas detectados en la Estrategia Provincial es la contaminación de las aguas, en la que están incluidos los cuerpos de aguas marinas, superficiales y subterráneas. La causa de este problema está en la ausencia de alcantarillados, el vertimiento de residuales no tratados, existencia de viejas tecnologías, el sobreconsumo de agua, el uso inadecuado de productos químicos y la falta de conciencia ambiental. Las fuentes fundamentales de la contaminación están en las industrias, las actividades agropecuarias y las

domésticas. Las aguas superficiales por su parte reciben una considerable carga contaminante principalmente del MINAZ y el MINAGRI, en el primero por la dificultad en los sistemas de tratamiento y en el segundo por la carencia de los mismos. Las aguas subterráneas también tienen afectaciones producto al vertimiento e infiltración de residuales líquidos.

Se hace necesario, luego de analizar lo anteriormente expuesto, llevar a cabo una serie de acciones que faciliten el manejo de los recursos sin que esto afecte la naturaleza.

Según la Estrategia Ambiental Nacional "la solución de los principales problemas ambientales que afectan al país, debe ser vista con un *enfoque ecosistémico e integrador* y no como la solución aislada de cada uno de ellos, pues se concatenan en sus consecuencias y efectos sobre el principal componente del medio ambiente: *el ser humano.* La atención a estos problemas requiere de *acciones a corto, mediano y largo plazo*".

Es imprescindible entonces, la conclusión y/o ejecución de las redes de alcantarillado y *sistemas de tratamiento de asentamientos urbanos*, el mantenimiento de los sistemas de residuales comunitarios, así como proponer y desarrollar una **política de *selección y aprovechamiento de desechos sólidos con énfasis en el sector turístico*** y la mejora de los niveles de potabilidad de las aguas de abasto a la población. Para el *control de la contaminación de las aguas terrestre y marinas* se necesita implementar el cumplimiento del Capítulo IV (artículo 95) de la LEY 81 del Medio Ambiente, donde se propone generalizar el uso y aprovechamiento de los residuales tratados con fines agrícolas, industriales y acuícolas y desarrollar investigaciones en los ecosistemas marinos de alto valor ecológico.

El crecimiento del desarrollo socio-económico y de la infraestructura hotelera en Matanzas ha traído como consecuencia que se genere mayor volumen de residuales industriales y albañales con el consiguiente aumento de la generación de biosólidos.

2. GESTIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LODOS DE EDARS URBANAS.

En Cuba existe un total de 1 079 sistemas de tratamientos de residuales líquidos de los cuales el 28,4 % presentan funcionamiento satisfactorio, el 31% funcionamiento aceptable y el resto no satisfactorio. Del total de sistemas de tratamientos 32 de ellos corresponden a sistemas convencionales de tratamiento biológico desglosados en: 40,6 % filtros biológicos (13), 40,6 % lodos activados (13) y 18,8 % zanjas de oxidación (6), en los que la disposición final (56,3 %) es mayoritariamente en aguas superficiales.

De los sistemas convencionales de tratamiento biológicos existentes sólo el 40,6 % tiene un aprovechamiento seguro de los lodos, por lo que aún es insuficiente el

reuso de estos y el beneficio económico que esto reporta. (CITMA, 2002). La tabla 1 describe los sistemas de tratamiento por lodos activados en funcionamiento, los cuales se encuentran distribuidos por todo el país. Como se observa no todas son eficientes, ni los lodos que se producen en ellas se cuantifican.

Tabla 1. Estaciones depuradoras urbanas por lodos activados existentes en Cuba.

Provincias	***Plantas Depuradoras urbanas***	***Nombre***	***Capacidad (L/s)***	***Eficientes (X)***
La Habana	*1*	*Bejucal*	*90*	*X*
Ciudad de la Habana	*2*	*María del Carmen*	*600*	*-*
		Quibú	*150*	*-*
Matanzas	*3*	*Palmeras*	*11*	*-*
		Taínos I	*17*	*X*
		Siguapa	*45*	*-*
Ciego de Ávila	*1*	*Cayo Guillermo*	*60*	*-*
Santiago de Cuba	*1*	*La Cuba*	*40*	*-*
Total	*8*	*-*	*-*	*-*

Fuente: http://intraweb.hidro.cu/ (Instituto Nacional de Recursos Hidráulico de Cuba).

Es evidente que la depuración de aguas residuales constituye una solución a los problemas ambientales que provocan su vertimiento. Esta problemática se ha visto beneficiada con la implantación de nuevas depuradoras y mejores tecnologías. Sin embargo, el aumento de la población y la obtención de aguas de calidad han traído consigo el aumento de los lodos que se generan en las referidas depuradoras con alto contenido de materia orgánica y nutriente que pueden ser utilizados con diferentes fines. Su gestión ha de ser racional para evitar así que la depuración suponga simplemente trasladar el problema de un medio a otro.

La generación actual de lodos unida a la culminación y construcción en los próximos años de dos nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas incrementará considerablemente la producción nacional de estos residuos sólidos. La primera EDARs en proyección se encuentra en fase de ejecución y su término se prevé para el año 2010. Su construcción se sustenta en el Proyecto de descontaminación de la Bahía de la Habana e incluye el tratamiento de las aguas superficiales del río Luyanó, el drenaje pluvial de agua dulce e industrias del litoral. Un segundo proyecto estudia el desarrollo del alcantarillado y el drenaje pluvial

en la cuenca tributaria de la Bahía de la Habana el cual se extenderá hasta el 2020. Esta planta de tratamiento procesará las aguas residuales de la cuenca media y baja de los ríos Luyanó y Martín Pérez. La generación de los lodos secos en las plantas depuradoras de ambos proyectos se estima que sean de 17 918 m^3/a y 10 974 m^3/a respectivamente.

Como se observa en la tabla 1, en el balneario de Varadero, principal polo turístico de sol y playa, los residuales son tratados en 3 plantas de tratamiento biológicos de lodos activados. Estos sistemas de tratamiento generan una cantidad de residuos sólidos suficientes como para que su evacuación constituya un problema de contaminación (Gómez, 1999).

Los aspectos a contemplar en relación con los lodos de las depuradoras son:

- ✓ Grandes concentraciones humanas e industriales y, como consecuencia grandes volúmenes de lodos arrastrados por las aguas negras en los colectores.
- ✓ Variación en los contenidos orgánicos e inorgánicos de cada vertido, según la población, su nivel de vida, época del año, grado de industrialización, consumo, etcétera.
- ✓ Las exigencias de calidad ambiental y el derecho al disfrute de un bienestar marcan las necesidades de tratamiento y eliminación de los lodos.
- ✓ La escasez de recursos como abonos y recursos energéticos y su coste creciente obliga a replantearse la necesidad de la reutilización de subproductos, buscando la posibilidad de uso como abono así como la de recuperación energética (Sánchez, M; Otero, 1999).
- ✓ Los procesos de depuración de las aguas residuales dependen de los volúmenes de vertido y de su variación en el tiempo y hay que tener en cuenta que procesos de depuración diferentes dan lugar a diferentes tipos de lodos.
- ✓ El proceso de tratamiento, su eliminación o reutilización han de ser tales que se cumpla la normativa existente, considerando los aspectos sanitarios sobre el hombre, los cultivos y el medio ambiente.
- ✓ El aspecto económico, teniendo en cuenta gastos de obras, instalaciones, de mantenimiento y explotación, de gestión y control también condicionan de manera importante las soluciones a adoptar (Otero, 1999).

El tratamiento y gestión de lodos es uno de los problemas más complejos con los que se encuentran las depuradoras debido a:

- ✓ Su elevado contenido en materia orgánica putrefactible.
- ✓ Su elevado contenido en agua.
- ✓ Presencia de gérmenes patógenos.
- ✓ Y al riesgo de contaminación potencial por metales pesados y/o compuestos orgánicos, tóxicos y bioacumulables, que pueden limitar su utilización y exigir la adopción de medidas precautorias para su eliminación (Sánchez, M; 1999).

La naturaleza de los lodos residuales se ve afectada por los diversos factores que intervienen en su obtención (Sánchez, M; 1999). Entre estos factores, los más importantes son:

- ✓ La naturaleza del efluente u origen de las aguas residuales que llegan a la depuradora.
- ✓ Los procedimientos u operaciones utilizados para la depuración de tales aguas.
- ✓ Los tratamientos a que son sometidos los lodos propiamente dichos, que pueden modificar de manera importante su naturaleza y propiedades. La etapa de tratamiento de los lodos es fundamental y debe realizarse ineludiblemente ya que estos materiales, tal como se obtienen al separarlos de las aguas residuales, no se deben verter directamente sobre el medio natural, sobre todo por consideraciones de orden ecológico (Sánchez, M; 1999).

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LODOS DE EDARs.

En el pretratamiento del agua residual se suelen separar los sólidos de grandes tamaños (plásticos, papeles, maderas, telas, otros.) y arenas, todas estas sustancias se suelen evacuar a vertederos, no incorporándose a los lodos (Sánchez, M; 1999).

El tratamiento primario suele consistir en una decantación, donde se sedimentan las partículas sólidas más gruesas que estaban en suspensión en el agua dando lugar a los lodos primarios. En el tratamiento secundario de tipo biológico, las partículas finas en suspensión, así como la materia orgánica disuelta, son metabolizadas por los microorganismos, creándose una biomasa que constituye los lodos secundarios. Estos se separan en el decantador secundario recirculándose en parte y eliminándose el resto como lodos biológicos en exceso.

Una depuradora de aguas residuales produce un promedio de 2,5 litros de lodos

totales (primarios y secundarios) por habitante y día, con un contenido en materia seca de 20 g/L.

El gran volumen de fangos generado en la línea de agua, unido a que presentan en su composición materia orgánica fermentable, microorganismos patógenos y en algunos casos compuestos tóxicos como metales pesados, obligan a que estos sean tratados antes de su destino final.

Estos tratamientos están encaminados a reducir su volumen y su carácter contaminante, de manera que los fangos sean más manejables a la hora de eliminarlos. Dependiendo de las características finales del fango tratado, éste tendrá diferentes aprovechamientos y la gestión, por tanto, dependerá de su destino (Otero, 1999).

A pesar de que varios investigadores reportan la composición química típica de los lodos de EDARs, la tabla 2 demuestra que no puede definirse una composición estándar de sus características. De lo anterior se puede concluir que, si bien estas referencias pueden ser recomendadas como indicativo de valores aceptables de su composición, la heterogeniedad y particularidad de la composición de los lodos dependen de las características del agua residual, del tipo de tecnología aplicada en el tratamiento y la época del año. Se sugiere el estudio individual de cada lodo para conocer las características de los mismos y evitar la generalización y/o normalización de su composición.

Tabla 2. Composición química típica de los lodos.

1	2	3

	Valor Medio (mg/ kg Lodo seco)	Intervalo (mg/ kg Lodo seco)	Valor Medio (mg/ kg lodo seco)	Intervalo (mg/ kg lodo seco)	Límite permisible (mg/ kg lodo seco)
pH	NR-	6-12	NR	NR	NR
Cond (mS/cm)	2,9	0,8-11	NR	NR	NR
C/N	NR	5-8	NR	NR	NR
As	10	1,1-230	9	1-50	NR
Be	0,6	NR	ND	ND	NR
B	40	1-3 400	NR	NR	NR
Cd	43,7	15-70	87	ND-1 100	10
Ca	70 000	20 000-100 000	-	-	NR
Zn	2 194	101-49 000	3 843	51-28 360	2 500
Cr	785	10-90 000	1 800	22-30 000	900
Co	14	11-2 490	350	ND-800	NR
Cu	909	48-17 000	1 250	45-16 030	800
F	260	80-33 500	NR	NR	NR
P	26 000	5 000-140 000	NR	NR	NR
Fe	17 000	100-150 000	NR	NR	NR
Mg	7 000	2 000-20 000	NR	NR	NR
Mn	380	18-7 100	1 190	100-8 800	-
Hg	4,6	0,6-56	7	0,1-89	8
Mo	8	0,1-214	NR	NR	NR
N	39 000	10 000-200 000	NR	NR	NR
Ni	NR	NR	410	ND-2 800	200
Pb	NR	NR	1 940	80-26 000	900

Fuente: [1] Alberti, 1997; [2]Gómez, 1999; [3] Rumphorst, 1994.
ND- No detectado; NR-No reportado.

2.2. GESTIÓN DE LODOS.

Otero, (1999) y Gómez, E (1999) plantean que los mismos principios de gestión de cualquier residuo serían aplicables al caso de los lodos de depuración. En este sentido se ha establecido un orden prioritario de gestión:

- ✓ Eliminación o reducción, que para los lodos, sólo se puede lograr en determinados procesos de tratamiento.
- ✓ Reciclado, entendido como el empleo de un material para el mismo o similar propósito que el que tenía originalmente, por lo que no es aplicable en el caso de los lodos.
- ✓ Recuperación, incluyendo la utilización de sus componentes o producción

de energía a través de ellos. Este sería el caso de la aplicación de los lodos al terreno para aprovechar su contenido en nutrientes y materia orgánica; también estaría aquí incluida la incineración, siempre que haya una recuperación efectiva de la energía.

- ✓ Vertido, que sería la opción menos deseable para cualquier residuo, por lo que deben reducirse en lo posible los residuos con este destino. (Calleja, 1999; Gómez, E .1999).

El destino que actualmente se está dando a los lodos es muy variado, esquemáticamente se podría hablar de varias opciones convencionales de disposición en las que se incluyen: vertido controlado, vertido al mar (descargas marítimas), encapsulación, compostaje (aplicación a la agricultura y silvicultura), incineración, rehabilitación o recuperación de terrenos y otras aplicaciones.

El **Vertido controlado c**onsiste en el enterramiento del máximo volumen de residuos en el mínimo espacio posible. Se vierte el lodo sobre el terreno, se cubre con el material apropiado, evitando riesgos de contaminación ambiental. La modalidad elegida de vertido dependerá del grado de humedad. En caso de dar como destino de los lodos un vertedero controlado no se obtiene ningún aprovechamiento de los mismos. Su realización estaría justificada cuando el contenido de los lodos puede tener un impacto medioambiental negativo (Otero, 1999; Gómez, E. 1999), criterio que comparte el autor. La disposición de los fangos en vertederos, es una alternativa aplicable en áreas poco pobladas, con terreno disponible a bajo precio con capacidad suficiente para aceptar los lodos producidos. En cualquier caso, tanto el lodo como el suelo, se convierten en inutilizables durante largos períodos de tiempo. La problemática medioambiental potencial de este sistema de eliminación se debe fundamentalmente al arrastre por lixiviación de sustancias contaminantes, a cauces públicos o aguas subterráneas

En el **Vertido al mar s**e transportan los lodos mediante barcos o bien mediante emisarios submarinos a través de los cuales se bombean lodos con bajo contenido de sólidos. Esta era una solución muy común pero desde Enero de 1997 se prohíbe esta alternativa. Ni el vertido al mar de aguas sin depurar, ni la deposición de lodos de depuración son ecológicamente justificables (Otero, 1999; Gómez, E. 1999). Las descargas al mar se han prohibido en muchos países debido a la contaminación por metales pesados, aceite, grasas y determinados microorganismos.

La **Encapsulación** resulta muy cara y sólo se lleva a cabo cuando los lodos tienen un alto poder tóxico. Se colocan grandes cantidades de fango en el interior de cápsulas de material impermeable y duradero. El material encapsulado va a un vertedero controlado de residuos industriales o residuos tóxicos y peligrosos. En casos especiales puede ser la única alternativa para lodos industriales. Las formas

de encapsulación más habituales son, en recipientes adecuados sometidos a un proceso de fijación química en un lecho de polietileno, o también mezclando el lodo con asfalto a 150 ºC, de manera que cada partícula de lodo quede recubierta, y luego la mezcla se coloca en cápsulas (Oliva, 1999; Calleja, 1999).

El **Compostaje s**e trata de una fermentación aeróbica de la materia orgánica de los lodos de depuración. Este compostaje (Oliva, 1999) da lugar a un producto con ciertas ventajas respecto a la aplicación directa de lodos en la agricultura:

- ✓ Aplicación más fácil, pues la humedad es menor y la granulometría constante.
- ✓ Alto contenido en humus, por lo que es mejor para el terreno.
- ✓ Producto de calidad constante y homologada.

Como desventajas estarían:

- ✓ Una mayor complejidad de infraestructura.
- ✓ Una reducción del porcentaje de elementos fertilizantes respecto a materia seca (aunque también disminuye el porcentaje de tóxicos.)
- ✓ Encarecimiento, porque el fango ha sido manufacturado.

En el proceso de compostaje es importante que se realice un secado previo hasta alcanzar la humedad idónea. Una vez alcanzada, se lleva a cabo un acondicionamiento para la fermentación, mezclando el lodo con paja, hojarasca, aserrín, incluso algas, en zonas costeras. Esta preparación tiene por objeto, por un lado, aumentar la tasa C/N del lodo, que, para compostar, ha de estar próximo a 30 y, por otro, aumentar la porosidad. El fango, una vez secado y mezclado con materia carbonada, se apila en montones y comienza la actividad de las bacterias mesófilas y termófilas, que llevan a cabo la fermentación de la materia orgánica, para la que es importante que volteen periódicamente las pilas de fangos, aireado y homogenizando el producto, así como que se lleve a cabo un control de la humedad y la temperatura para conocer la marcha del proceso. Durante la fermentación aerobia tiene lugar un aumento de temperatura del orden de 65-80ºC, que se mantiene mientras dura el compostaje, destruyendo las bacterias patógenas y los huevos de helmintos y otros parásitos, por lo que, desde el punto de vista sanitario, el fango ha sido sometido a una pasteurización (Otero, 1999). La aplicación en la agricultura está siendo también limitada por la contaminación potencial por metales pesados.

La **Incineración** es una alternativa que requiere mayor inversión económica. En la incineración de los lodos se persigue aprovechar el poder calorífico de la materia orgánica para así generar energía que permita cubrir la mayor parte de las

necesidades energéticas del proceso, tratando de minimizar la cantidad de combustible de apoyo, que incrementa el coste operacional (Oliva, 1999; Calleja, 1999). La combustión ha de cubrir la demanda de calor ocasionada por:

- ✓ La evaporación de toda el agua contenida en el lodo.
- ✓ El calentamiento de los gases de combustión.
- ✓ La compensación de pérdidas de calor.

La mayor parte de la energía se gasta en la evaporación del agua por lo que se logra un gran ahorro deshidratando al máximo los lodos antes de entrar en el horno. En cualquier caso, sólo se deberían incinerar fangos que no tuvieran otra vía de utilización (debido a su toxicidad) o bien que el alto volumen de fangos presentase problemas de disposición o por la inexistencia de vertederos. La repercusión ambiental que presenta esta alternativa sobre todo por la contaminación atmosférica que produce la combustión de los mismos al oxidar la materia orgánica justifica esta restricción.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera constituyen el principal riesgo para la salud y el medio ambiente. La presencia de contaminantes en la atmósfera implica una contaminación global, al dispersarse los mismos en el aire, suelos y aguas superficiales o subterráneas, así como al afectar a los organismos que se desarrollan en este entorno, incluido el hombre (Gómez, 1999). La incineración ha representado un papel importante en los últimos años. Sin embargo, ~~debido a~~ el elevado costo de energía, disposición de cenizas y las continuas emisiones gaseosas constituyen ~~los~~ significantes contrastes en su uso más extensivo (Calleja, 1999; Gómez, 1999; Otero, 1999; Chen, 2002).

Rehabilitación o recuperación de terrenos: los lodos son excelentes para revitalizar la capa superficial de vertederos y otros lugares sin un sustrato adecuado para el desarrollo de una cubierta vegetal. Disminuye la erosión del suelo, aumenta la capacidad productiva de este, disminuye la escorrentía superficial y aumenta la retención hídrica (Otero, 1999; Calleja, 1999). El relleno de terrenos ha sido, por tiempo, la mejor opción de disposición de los lodos, pero esta variante de disposición no es sustentable debido al incremento de la competencia por los espacios, mayores costos y aplicación de restricciones medioambientales estándares.

En cualquier caso, en la gestión de los lodos habrá que tener en consideración ciertos factores como son la situación geográfica, la climatología, las características geológicas del terreno, la situación económica, cultural y ecológica de la población, la industria y por supuesto las características de los fangos (Otero, 1999).

El problema del tratamiento y la gestión de lodos se agudiza por la variabilidad en

su composición química, en especial las concentraciones de metales pesados. La presencia de determinadas sustancias por encima de ciertos límites pueden hacer que el lodo sea inadecuado para determinados usos por lo que deben adoptarse medidas preventivas para su eliminación (Gómez, 1999; Sánchez, 1999).

Como se ha señalado una fracción importante del lodo generado no se valoriza, y su destino final son los vertederos específicos y la disposición conjunta con los residuos sólidos urbanos. La producción de~~Lo~~ lodos de depuradoras se ha~~n~~ incrementado en cantidades debido a la rápida urbanización y el implemento del criterio de altos efluentes en las últimas décadas. Por ello la eliminación de los lodos de las depuradoras no debe hacerse de una manera incontrolada, lo ideal sería buscar un camino que permitiera su aprovechamiento con mínimas o nulas acciones tóxicas para las plantas, los animales y el hombre (Otero, 1999; Chen, 2002).

Es necesario, pues, buscar nuevas alternativas para el reciclado de estos residuos. Se han estudiado algunas posibilidades como: la utilización directa del fango biológico como fuente de proteínas para la alimentación animal, la transformación de los fangos en aceite pesado mediante licuación termodinámica que puede ser utilizado como combustible.

En estudios realizados recientemente (Kordel, 1997; Otero 1999; Walhof, 1999; Jeyaseelen, 1999; Calvo, 2001; González, 2001, 2002; Tay (a), 2001; Chen, 2002; Otero, 2003; Martín, 1999, 2003) se ha comprobado que los lodos de depuradoras urbanas pueden ser valorizados para la elaboración de adsorbentes, demostrándose que pueden ser convertidos con efectividad y economía en carbón activado, pues poseen la característica de presentar alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas y por sí solos resultan un recurso obtenido en grandes cantidades a bajo costo. ~~A criterio del autor, y en coincidencia con~~Según Martín (1999) y Lu (1996), los carbones obtenidos a partir de lodos son materiales que presentan un contenido de cenizas superior al de los carbones comerciales y menor contenido de carbono. Sin embargo, l~~L~~o antes expuesto no excluye la posibilidad de poderlos utilizar como adsorbentes por las ventajas que poseen.

En años recientes se ha promovido ~~un crecimiento en las investigaciones interesadas~~ una investigación centrada en la producción de adsorbente alternativos obtenidos de residuos, principalmente subproductos de la industria o la agricultura. Según Martín (2003), la producción de carbones activados a partir de residuos permite a los productores de desperdicios compensar el incremento de los costos de eliminación de residuos, contra el costo de producción de carbón, mientras ahorran recursos naturales renovables y producen un producto valioso con aplicaciones potenciales en el control de la contaminación.

La posibilidad de convertir los lodos, subproducto generado durante el tratamiento de aguas residuales, en carbones activados fue reconocida por primera vez por

Razouk en 1960 y entonces verificada por Buckmans and Park en 1971.

Los lodos de EDARs urbanas constituyen un material carbonáceo por naturaleza y rico en materia orgánica. Por lo tanto ellos constituyentienen un cierto potencial para ser convertidos en carbón activado si se pirolizan bajo condiciones controladas o con algunos tratamientos químicos. Esta conversión puede ofrecer beneficios combinados de reducción del volumen de lodos y producir un adsorbente valioso con menor costo que el de los carbones activados comerciales (Chen, 2002)

Varios autores han estudiado eEl proceso de carbonización de lodos y el resultado de la activación previa se ha estudiado con diferentes agentes químicos y bajo varias diferentes condiciones, y se handonde se han obtenido sólidos con área superficiales de 100-600 m^2/g (Martín, 1999; Otero, 1999;Tay (b), 2001; González, 2001; Chen, 2002; Martín, 2003; Walhof).

3. EL CARBÓN ACTIVADO.

En los procesos industriales, agropecuarios y urbanos los adsorbentes más empleados son el gel de sílice, la alúmina, y sobre todo, el carbón activo además de determinadas resinas sintéticas. El adsorbente más utilizado para el tratamiento de aguas residuales es, no obstante, el carbón activado.

3.1. ANTECEDENTES Y APLICACIONES.

El uso del carbón activado se remonta a los años 1500 A.C. usado en un papiro egipcio con propósito medicinal. Aunque ciertos fenómenos asociados con la adsorción fueron conocidos en tiempos remotos, la primera observación cuantitativa se realizó por Sheele en 1773 y Fontana en 1777 quienes reportaron algunos experimentos de la retención de gas por carbón de madera y arcilla. La aplicación moderna de adsorción está relacionada con las observaciones de Lowitz el cual en 1785 usó carbón de madera para la decoloración de soluciones de ácido tartárico, experiencia que pronto se aprovechó para la decoloración del azúcar en su etapa de refino. No fue hasta el año 1814 que comienzan los estudios sistemáticos de adsorción con los trabajos de Saussure el cual descubre el carácter exotérmico de los procesos de adsorción. El término “adsorción” fue propuesto por du Bois-Reymond, pero introducido en la literatura por Kayser en 1881. En los próximos años, los términos isoterma y curva isotérmica fueron usados para describir el resultado de las medidas de adsorción a temperatura constante. Kayser también desarrolló algunos conceptos teóricos los cuales son básicos para la teoría de la adsorción monomolecular. Referido a los inicios de la época teórica se conoce que la llamada isoterma de adsorción de Freundlich fue propuesta inicialmente en 1888 por van Bemmelen y posteriormente como una ecuación empírica por Boedocker en 1895. Esta ecuación se conoce en la literatura como ecuación de Freundlich porque fue él quién le asignó gran importancia y popularizó su aplicación. En 1903, Tswell por su parte, descubrió la

adsorción selectiva.

En 1911 se funda la compañía NORIT en Ámsterdam, actualmente una de las compañías internacionales más avanzadas de carbón activado. En ese mismo año NORIT comienza la activación comercial con vapor. La activación química con cloruro de cinc fue descrita inicialmente en una patente australiana y este proceso fue desarrollado en Aussig, Checoslovaquia, en 1915. Entre 1914 y 1918 se proponen dos descripciones diferentes de los fenómenos de adsorción. Estas descripciones se asocian con los nombres de Langmuir, Eucken y Polanyi.

Ya en 1915 Zlinsky, profesor de la Universidad de Moscú, fue el primero en sugerir y aplicar el uso del carbón activado como medio de adsorción en máscara de gases. Durante la Primera Guerra Mundial se fabricaron grandes volúmenes de carbón activo granular (GAC) para emplearse en las máscaras de gas.

En la segunda mitad del siglo XIX ya se utilizaba en América filtros de carbón vegetal en las plantas de tratamiento de aguas (Cotoruelo, 1998). Las primeras unidades con GAC usadas para el tratamiento de aguas de abastecimiento público fueron construidas en Hamm (Alemania) en 1929. El carbón activo en polvo (PAC) se utilizó por primera vez para aguas públicas en New Milford (Nueva Jersey, EEUU), en 1930. Otro desarrollo en la ciencia de la adsorción fue la ecuación de la isoterma multicapa propuesta por Brunauer, Emmett y Teller en 1938. Esta teoría de la multicapa fue precedida por Brunauer y Emmett en 1935 quienes por primera vez, por medio de isotermas de adsorción de seis gases diferentes, determinaron el área superficial de un metal. Ya en 1946 Dubinin-Radushkevich propone la teoría del llenado del volumen de los microporos la cual se basa en la teoría potencial de adsorción propuesta por Eucken y Polanyi en 1914 (Dąbrowski, 2001).

Los primeros estudios sobre la aplicación del carbón activado al tratamiento de aguas residuales se remontan a 1935. Durante las siguientes décadas, el interés de la adsorción como proceso para eliminar compuestos orgánicos presentes en las aguas potables aumentó progresivamente junto a la creciente preocupación sobre la contaminación de los recursos hídricos debida a los residuos industriales, productos químicos usados en la agricultura y a las descargas de las alcantarillas. En la década de los años 50 ya se utilizaba para el tratamiento de efluentes industriales procedentes de la fabricación de pesticidas y, hacia 1960, comienza a considerarse de interés su posible aplicación al tratamiento de aguas residuales urbanas (Cotoruelo, 1998; Dąbrowski, 2001).

La elevada efectividad de estos adsorbentes hace~~n~~ posible que sean usados de forma extensiva en numerosas aplicaciones, algunas de estas incluyen adsorción en la fase gaseosa de gases contaminantes (monóxido de nitrógeno, compuestos sulfurosos, compuestos orgánicos volátiles) y adsorción en fase líquida de contaminantes orgánicos (Walhof, 1999; Martín, 2002). También se utiliza en la etapa final de limpieza o eliminación de contaminantes en los casos donde los

procesos mecánicos, biológicos y químicos de tratamiento hayan demostrado ser insuficientes. Las industrias de alimentación, química y farmacéutica son las que más lo utilizan. Otras aplicaciones más puntuales incluyen la fabricación de filtros de aguas domésticos, limpiezas de acuarios, tratamiento de piscinas, otros. (Rodríguez, 1998). La adsorción en fase líquida con carbón activo, como operación de separación para el tratamiento y purificación de aguas residuales, ha cobrado gran interés en los últimos tiempos, por lo que constituyen uno de los procesos más utilizados dentro de los sistemas de tratamiento terciario de las aguas residuales (Rodríguez, 1998; Martín, 2002).

La operación de adsorción en fase acuosa se emplea, fundamentalmente, para retener contaminantes de naturaleza orgánica, presentes, en general, en concentraciones bajas, ~~por dificultarse~~cuando ~~-~~su ~~eliminación~~ remoción por otros procedimientos es difícil. En los procesos industriales, en específico , se utiliza para remover altas concentraciones de compuestos orgánicos difíciles de remover por tratamientos convencionales. Cabe citar la ~~eliminación~~ adsorción de compuestos fenólicos, hidrocarburos, aromáticos nitrados, derivados clorados, sustancias coloreadas, así como otras que comunican olor y sabor a las aguas. Se prevé que con la atención que se presta a las mayores exigencias de calidad de los efluentes, el uso de los carbones activos en el tratamiento de las aguas residuales aumentará considerablemente en el futuro.

Dentro de los procesos utilizados, la adsorción ha sido aplicada con gran resultado en el tratamiento de efluentes líquidos. En este contexto, el carbón activado se ha convertido en el material adsorbente de mayor utilización; sin embargo, en algunas circunstancias se hace injustificable el uso de carbones activados altamente estructurados y vigorosos basados en materiales no renovables y relativamente caros en la aplicación del control de la contaminación y, por tanto, sus altos costos hacen prohibitivo la utilización de este material a gran escala. Conocida su principal desventaja económica diversos materiales adsorbentes alternativos de bajo costo han sido propuestos en su lugar a partir de precursores carbonáceos y minerales tales como: huesos, cenizas, cáscara de nuez y minerales (Iáñez, 2002; Chen 2002).

3.2. LA ADSORCIÓN Y EL CARBÓN ACTIVADO.

Como se ha mencionado con anterioridad, dentro de los sistemas de tratamiento terciarios de aguas residuales, la adsorción es el proceso más utilizado para retener contaminantes de naturaleza orgánica, especialmente compuestos fenólicos, hidrocarburos, entre otros. Esta operación es menos efectiva para sustancias de pequeño tamaño molecular y estructura sencilla, que suelen ser fácilmente biodegradables.

La adsorción es un proceso físico-químico de separación y concentración de uno

o más componentes de un sistema sobre una superficie sólida o líquida. Los diversos sistemas heterogéneos en los que puede tener lugar la adsorción son: sólido/líquido y, sólido/gas y líquido/gas. Como en otros procesos de este tipo, los componentes se distribuyen selectivamente entre ambas fases, donde una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales (Ramalho, 1996; Cotoruelo, 1998).

Si bien en los procesos de adsorción se utilizan diversos adsorbentes, es el carbón activo el adsorbente más utilizado. La estructura del carbón activado recuerda en cierta medida a la del grafito, ya que contiene unidades estructurales constituidas por capas paralelas de átomos de carbono ordenados en hexágonos regulares. Sin embargo, se diferencia de éste tanto en el tamaño de las unidades estructurales como en su ordenamiento. En el carbón activado estas unidades son del orden de 100 veces menores que las del grafito, y no están apiladas ordenadamente, sino orientadas al azar, lo que trae consigo, la existencia de unos huecos llamados microporos (tamaño inferior a 2 nm), cuyas paredes generan la elevada superficie que le confiere la elevada capacidad de retener sustancias en fase gaseosa o de una disolución. Las unidades estructurales están a su vez disgregadas por numerosas grietas y fisuras denominadas, de acuerdo con su tamaño, mesoporos (tamaño comprendido entre 2 nm y 50 nm) y macroporos (tamaño $>$ 50 nm). Por tanto, la distribución de tamaños de poros del carbón activado deberá adecuarse a la aplicación a que vaya destinado. De ahí que los fabricantes no presenten un producto único, sino un gama o una línea de productos que han preparado de forma diferente de acuerdo a la aplicación que previsiblemente vaya a tener. Esta línea de productos habitualmente contempla diferentes formas físicas: granular, polvo, pellets, briquetas, e incluso fibras o telas de carbón activados y cada una de ellas a su vez puede tener diferentes distribución de porosidad (Rodríguez, 1998; Groso, 1999).

Esta clasificación de los poros del carbón activado es la que reporta la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists) que se basa en el diámetro de los poros. Existen otras clasificaciones menos generalizadas como la anterior, pero que también se emplean en ocasiones y se refiere a la función que realizan. Según esta clasificación pueden dividirse en poros de adsorción o poros de transporte. Los primeros consisten en espacios entre placas grafíticas con una separación de entre una a cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En estos, ambas placas del carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre le adsorbato y retenerlo con mayor fuerza. Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaños, que abarca hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0,1 nm. En esta clase de poros, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tienen poca influencia en la capacidad de

carbón activado, afectan la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción (Groso, 1999).

Los adsorbentes industriales y los carbones activados de buena calidad pueden llegar a tener áreas superficiales entre 1 000 m²/g y 1 500 m²/g aunque se reportan otros intervalos entre 800 m²/g y 1 500 m²/g (Roop, 1988) e incluso entre 500 m²/g y 1 500 m²/g (Groso, 1999). En cualquier caso, el proceso de fabricación del carbón activado ha de asegurar un gran desarrollo superficial mediante una elevada porosidad que les permita poseer una alta capacidad de adsorción, además de propiedades físicas y tamaño de partículas adecuados, acompañado de un costo asequible y una fácil regeneración (Cotoruelo, 1998).

3.2.1. MECANISMO DE ADSORCIÓN.

La capacidad adsorbente ~~producida en ellos~~ de cualquier carbón activado, está determinada por la distribución de tamaños de poros y el área superficial total. Tanto Walhof (1999) como Daifullah (1998) coinciden en que el área superficial elevada y el buen desarrollo de distribución de tamaños de poros obtenidos pueden ser controlados por el proceso de activación química y la variación de la metodología del tratamiento térmico, aunque cada adsorbente puede mostrar diferentes capacidades de adsorción frente a diferentes adsorbatos y viceversa. Esta teoría concuerda con lo planteado por Dąbrowski en 2001: “Toda la información derivada de una isoterma de adsorción relaciona solamente un adsorbente y adsorbato en concreto”. También plantea ~~que por medio de varios~~ el hecho de que el estudio de la adsorción de diferentes adsorbatos ~~y el~~ sobre un mismo adsorbente puede ~~obtenerse~~ proporcionar diferentes informaciones. Lo anteriormente expuesto se corrobora en investigaciones realizadas por Aksu (2001), Li (2002), Pan (2003), Daifullah (1998) y Roop (1988) ~~al obtenerse~~ que obtuvieron distintos comportamientos en las isotermas de adsorción ante diferentes compuestos fenólicos sobre el mismo adsorbente.

Si bien es conocido y se reporta con frecuencia que diversos parámetros afectan la capacidad, retención y fuerzas de adsorción en soluciones acuosas, el autor de esta investigación considera que son las propiedades químico-físicas del adsorbato en la fase líquida, las características del adsorbente y la interacción adsorbato-adsorbente los factores claves que dominan el mecanismo. Cada uno de estos factores influye ~~por la afectación~~ directa o indirectamente sobre el resto de ~~de otras~~ las variables. Así las propiedades del adsorbato en fase líquida incluyen la polaridad, la naturaleza iónica, los grupos funcionales, la solubilidad, la estructura y las dimensiones moleculares del soluto, además de la naturaleza del solvente y otros. Entre las características del adsorbente se pueden mencionar la naturaleza de la superficie, su distribución porosa y estructura superficial, la cual dependerá principalmente de las condiciones de activación y de las características de la materia prima. En la interacción adsorbato-adsorbente se considera la afinidad que existe entre el adsorbato y los grupos funcionales presentes en la superficie del adsorbente, además de estar determinada por una

variedad de fuerzas y mecanismos químico-físicos tales como las fuerzas de van der Waals, puentes de hidrógeno, interacción dipolo-dipolo, intercambio iónico, enlace covalente y puente de agua (Cotoruelo, 1998; Aksu, 2001).

3.2.2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.

El carbón activado puede fabricarse a partir de distintos materiales carbonosos~~de todo tipo de material carbonoso de lo cual depender~~, en función de lo cual serán~~á~~ las características y la calidad del producto final. Cada materia prima brindará características y cualidades distintas al producto (Groso, 1999). Las propiedades del carbón activo final dependen tanto de la materia prima como del método de activación empleado (Cotoruelo, 1998; Groso, 1999).

En cuanto al proceso de activación existen dos tecnologías básicas: la activación térmica o física y la activación química o también denominada por deshidratación química.

En el método de producción denominado de activación química el precursor ~~debe~~ suele ser de origen vegetal. Este se impregna y deshidrata con una disolución concentrada del reactivo, se amasa durante un tiempo, y posteriormente se carboniza a una temperatura intermedia, del orden de los 500 ºC. Este criterio es compartido por Groso (1999), aunque él considera que puede llegar a los 600 ºC. El producto obtenido, tras un lavado riguroso para extraer el reactivo, ya tiene las propiedades adsorbentes de un buen carbón activado. Por otra parte, si se tiene en cuenta que la función del reactivo es de por sí lo que diferencia este proceso del de activación física, factores como la concentración del reactivo, tiempo y temperatura a la que se realiza la impregnación serán determinantes en el desarrollo de la porosidad. Por tanto, la extensión del proceso de activación o grado de activación habría que expresarlo como cantidad de reactivo incorporada a la materia prima durante la impregnación (Rodríguez, 1998).

Cuando el precursor es un material orgánico, éste se carboniza a bajas temperaturas en ausencia de aire, de forma tal, que no se favorezca la grafitización (Groso, 1999).~~. Si se parte de un carbón mineral, este no requiere ser carbonizado.~~ En el proceso de carbonización o pirólisis, se elimina el agua y una gran cantidad de materiales volátiles y alquitranes, quedando un sólido carbonoso, denominado carbonizado, el cual posee una estructura porosa rudimentaria y escasa capacidad adsorbente. El desarrollo de la porosidad se produce en el proceso de activación donde el carbonizado reacciona parcialmente por combustión y de forma controlada con un gas oxidante débil a temperaturas elevadas, usualmente por encima de los 800 ºC (Rodríguez, 1998), pudiéndose alcanzar los 1 000 ºC (O Campo, 1986; Raveendran, 1996; Groso, 1999). En estas condiciones se eliminan selectivamente átomos de carbono del interior de la partícula con la consiguiente creación de la porosidad. A lo largo del tiempo algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de dióxido de carbono y otros se recombinan y condensan en formas de placas grafíticas, estas

placas tienden a ser pequeñas e imperfectas y su tamaño depende de la materia prima. El grado de activación y el rendimiento dependen de la temperatura del horno y de la composición de los gases. Normalmente el rendimiento está entre 0,25 kg y 0,5 kg de carbón activado por kg de carbón alimentado al horno (Groso, 1999).

La dificultad del control del proceso radica precisamente en la selección de las condiciones para que se favorezca la reacción en el interior de la partícula, y se evite al máximo la reacción en el exterior de la misma. De no ser así, se tendría simplemente un quemado exterior sin desarrollo de la porosidad en lugar de una activación.

~~1.3.1.~~3.2.2.1. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR ACTIVACIÓN FÍSICA.

La activación física es autoenergética por el carácter exotérmico del proceso global de activación, pero como se trabaja a temperaturas muy altas, algunas reacciones se hacen incontrolables y el resultado es una disminución notable en el rendimiento del producto. Durante la carbonización de un material la mayoría de los elementos no carbonosos (hidrógeno, oxígeno, trazas de azufre, y nitrógeno) son eliminados primero en forma gaseosa por descomposición pirolítica. La estructura porosa que se logra en esta etapa es bloqueada por carbón amorfo, alquitrán y otros residuos de la descomposición pirolítica del material. Ya en la activación estos poros se limpian por la oxidación de las deposiciones que los bloqueaban y podrán entonces ~~actúan~~actuar como centros activos en los procesos de adsorción (O Campo, 1986; Wigmans, 1989).

Como una medida del grado de activación se usa con frecuencia el término quemado, que es el porcentaje de la masa reducida del material durante la activación, referido a la masa del producto carbonizado. En ocasiones se usa el quemado del material para designar la masa del carbón activado resultante expresado como un porcentaje del producto carbonizado antes de la activación. El quemado (B) y el rendimiento de activación (A) están relacionados (B = 100 – A). Normalmente, c~~C~~uando el quemado es menor que 50 % se obtienen carbones activados microporosos, cuando es mayor que 75 % se obtiene un producto macroporoso y cuando el quemado está entre 50-75 % el producto es de estructura mixta y contiene tanto micro, meso y macroporos. En general el aumento de la superficie se logra prolongando el grado de activación lo que favorece la capacidad de retención de contaminantes (Smísěk, 1970). ~~El autor de este trabajo investigativo entiende que aunque pueda cumplirse este criterio~~A pesar de este criterio general, la relación entre el quemado y la estructura porosa depende también de ~~diversos~~ factores como son las características de la materia prima, el agente activante, entre otros, que pueden variar el comportamiento descrito.

En la activación física, l~~L~~os agentes activantes más usados son el vapor de agua,

el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el oxígeno, pero vapores de cloruro y sulfuros, dióxido de azufre, amoníaco y otras sustancias presentan efectos activantes aunque ellos son raramente usados para este propósito~~. Los agentes activantes más utilizados son el vapor de agua y el dióxido de carbono~~. Wignmans (1989) sugiere que debido a diferencia en la reactividad y dimensiones moleculares combinada con la velocidad de difusión, disminuye el diámetro de los poros eficazmente accesibles en el orden oxígeno-dióxido de carbono-vapor de agua. Esto implica que puede esperarse el desarrollo de la mayor estructura microporosa en el caso de la activación con vapor de agua, ya que el acceso de esta pequeña molécula a través de la entrada de los poros y su difusividad efectiva es favorable con respecto a la del dióxido de carbono. Sin embargo, en trabajos recientes se han reportado comportamientos diferentes. Alcañiz en 1997 desarrolló un estudio de la producción de carbón activado con ambos agentes activantes y concluyó que la activación con dióxido de carbono produce, un grado de activación similar y una velocidad de activación comparable, y mayor volumen de microporos que el vapor de agua. Estos resultados se atribuyen al proceso de gasificación que es más lento y uniforme en el caso del dióxido de carbono. Además, el hidrógeno es un inhibidor mucho más fuerte que el dióxido de carbono y la activación con vapor de agua es menos uniforme y está enfocada a la parte externa de la superficie. Molina (1996) encontró que la apertura de los poros es el efecto predominante de la activación con vapor de agua y el dióxido de carbono produce un mayor desarrollo de la microporosidad estrecha. En 1998, Rodríguez obtuvo que la activación con vapor de agua producía materiales más mesoporosos que con dióxido de carbono.

Es evidente que difiere el desarrollo de la porosidad del carbón activado con dióxido de carbono y con vapor de agua. Al inicio del proceso de activación con cualquiera de ellos el quemado del carbón desorganizado conduce a la apertura de los poros parcialmente bloqueados; sin embargo, el consiguiente aumento del volumen de microporos resulta diferente para los dos activantes. La tendencia de las investigaciones recientes evidencian que el vapor produce una amplia distribución de tamaños de poros, mientras el dióxido de carbono desarrolla principalmente la microporosidad. Si bien, al respecto existe una importante controversia, los criterios no pueden ser extrictos, porque en el proceso de producción del carbón activado influyen muchas variables que pueden modificar la estructura del producto. Según el autor de esta investigación, ~~no se puede~~ llegar a un criterio concluyente en cuanto a la diferencia del efecto en la estructura porosa de los carbones producidos con estos agentes es un aspecto que necesita ser estudiado con mayor profundidad.

3.2.2.2. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR ACTIVACIÓN QUÍMICA.

En la producción de carbón activado por adición de agentes activantes, la temperatura necesaria para la pirólisis es relativamente baja. El carbonizado en estas condiciones remueve el agente oxidante y se obtiene un producto con

propiedades de un buen carbón activado. Los agentes activantes más utilizados son: el cloruro de cinc, el sulfuro de potasio, el tiocianato de potasio y los ácidos sulfúrico y fosfórico, algunos hidróxidos de metales alcalinos, el cloruro de calcio y el de magnesio entre otras sustancias (Smísěk, 1970; Rodríguez, 1998; Groso, 1999). Martín (1999, 2003) y González (2001) por su parte han utilizado el ácido sulfúrico para esta operación con muy buenos resultados.

La activación química usualmente se lleva a cabo a temperaturas ~~medias. Estas temperaturas son~~ inferiores a las utilizadas en la activación con agentes gaseosos por lo que, en estas condiciones, propicia la formación de cristales elementales de pequeñas dimensiones.

Un factor importante en la activación química es el grado o coeficiente de impregnación. El efecto del grado de impregnación en la porosidad del producto resultante est~~aá~~ aparejado al hecho de que el volumen de la sal en el material carbonizado iguala el volumen de poros ~~los~~ que son liberados por su extracción. Cuando el grado de impregnación se incrementa, el número de grandes poros se incrementa también y el volumen de los pequeños decrece (Smísěk, 1970).

De forma general se puede resumir que mediante el control de los parámetros o variables durante el proceso de activación tanto química como física, se puede favorecer el desarrollo de una estructura porosa determinada. Esto está estrechamente relacionado con el tipo de precursor y equipamiento empleados para la producción de carbón activado, los cuales varían en un intervalo amplio, por lo que resulta difícil establecer normas generales que describan la relación entre las variables del proceso y la estructura porosa desarrollada (Smísěk, 1970). ~~El autor de este trabajo considera, e~~En este sentido, la temperatura y el tiempo de residencia son las variables de mayor importancia en el proceso y probablemente las de mayor influencia en la formación de la estructura porosa.

3.3. PREMISAS DE LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN CUBA.

En Cuba el carbón activado es un producto fundamental de importación, con un costo muy elevado. Tanto su precio en el mercado internacional como su adquisición han presentado fluctuaciones debido a las afectaciones provocadas por la crisis económica mundial.

La producción nacional se realizaba desde 1985 a escala piloto, pero a partir de 1998 se inicia la producción de carbón activado en Baracoa, con el diseño y montaje de la primera planta industrial de tecnología nacional. Esta planta, diseñada por especialistas del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) de la Ciudad de la Habana, ~~con~~ tiene una capacidad ~~para~~ de producción de 500 toneladas anuales, la cual puede asimilar disímiles materias primas, sin cambios tecnológicos. ~~La~~ Sin embargo la producción de carbón activo se realiza a partir de materiales carbonosos de origen vegetal, fundamentalmente de Casuarina (*Casuarina equisetifolia*) y cascarón de coco~~, ~~. Esta~~pero, esta~~

producción no da abasto a las necesidades del país, y es por eso que en los últimos años se ha prescindido del uso del carbón activado. El resto del carbón activado que se consume es importado principalmente de México y Holanda (Hernández, 2000; Pérez, 2002).

La producción anual de carbón activado en el mundo se comporta de forma ascendente en los últimos años, la cual alcanzó, en el año 2000, 1 092 920 toneladas. Esta tendencia se encuentra influenciada por el incremento de la demanda del producto. Aunque América Latina sólo demanda el 1,10 % de la producción anual de carbón activado, Cuba no está exento de su consumo (Pérez, 2002).

El análisis de mercado realizado en Cuba en el año 2000, arrojó como principal consumidor al Ministerio de la Industria Azucarera (MINAZ) seguido por el Ministerio de la Industria Alimenticia (MINAL) y su demanda incrementa anualmente tal como se muestra en la tabla 3

Tabla 3. Demanda promedio de carbón activado por organismo (t)

Organismo / año	1988	1992	2000
MINAZ	1032	1032	2000
MINAL	273	330	400

Fuente: Pérez, 2002

El consumo por otros organismos como los Ministerios de Salud (MINSAP), Ministerio de las FAR (MINFAR), Ministerio de la Industria Ligera (MINIL), Empresa CUBARON, Ministerio del Turismo (MINTUR), laboratorios de insulina, inyectables y monoclonales, Centro Nacional de Biopreparados (BIOCEN), Empresa de bebidas y licores, Instituto “Carlos J. Finlay”, entre otros, elevan la demanda nacional de este producto (Pérez, 2002).

El análisis histórico de los precios de venta del carbón activado a nivel mundial (tabla 4) muestra una tendencia creciente, aunque los productores restringen las producciones a fin de que estos no varíen mucho (Roskill, 1992). La fluctuación de los precios de carbón activado depende de la materia prima usada, el costo y su relación con la legislación ambiental, energía consumida, costo de transportación, tipo y calidad del carbón activado producido y del balance de demanda y suministro.

Tabla 4. Precios promedios de carbón activado en $/t

	Granular	Polvo
1990*	2 367	1 119
2000**	5 000	2 500

*Fuente: *- Roskill (1992).*

**- *Pérez (2002)*

En actualidad la tonelada de carbón activado en polvo que se produce en la planta de Baracoa se vende a empresas nacionales a $ 1 200.

CONCLUSIONES.

1. Afrontar de forma integral el problema de las aguas residuales, con todos los aspectos inducidos, como es la disposición de los lodos y su impacto ambiental, suele ser una labor difícil; pero se debe escoger, siempre que sea posible, aquella alternativa que resulte menos agresiva para el entorno.

2. El estudio realizado demuestra que es posible la elaboración de carbones activados a partir de lodos de depuradoras urbanas como mecanismo de gestión de estos residuos. Esto constituye una alternativa confiable de disposición final.

3. De las referencias estudiadas se aprecia que no es posible generalizar sobre

la composición de los lodos de EDARs, pues estas dependen de las características del agua residual y del proceso de tratamiento que les da origen.

4. Constituye una novedad el hecho de producir carbón activado de los lodos de EDARs urbanas nacionales. En Cuba la producción de este adsorbente se realiza solamente a partir de materiales carbonosos de origen vegetal, fundamentalmente de Casuarina y cascarón de coco.

5. Las características de la estructura porosa del carbón activado están determinadas por la relación que se establece entre las variables involucradas en el proceso de obtención, que condicionan la interacción con el adsorbato en el mecanismo de adsorción.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

1. Acevedo, M; *y col.* 2001. Valoración de lodos residuales de la planta depuradora de aguas albañales del Complejo Turístico Taínos I para uso agrícola. Tesis (en opción al grado científico de Master en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental). Universidad de Matanzas. Cuba. p 1-90.

2. Aksu, Z; *et al*. 2001. A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents. Waste Management. (T) 21. p 695-702.

3. Alberti, J; *y col.* 1997. Contaminación del suelo: Utilización excesiva de fertilizantes. Girona, Marc. *citado por:* Acevedo, M., *et al.* 2001. Valoración de lodos residuales de la planta depuradora de aguas albañales del Complejo Turístico Taínos I para uso agrícola. Tesis (en opción al grado

científico de Master en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental). Universidad de Matanzas. Cuba. p 1-90.

4. Calleja Pardo, G; *y col*. 1999. Introducción a la Ingeniería Química. Ciencia Química e Ingeniería Química. Editorial Síntesis. España.
5. Chen, X; *et al*. 2002. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. Waste Management 22: 755-760.
6. CITMA. 2002. Introducción de la Producción Más Limpia en la Gestión Ambiental. Diagnóstico de la situación de los sistemas de tratamiento y disposición final de residuales líquidos. La Habana. p 6-39.
7. Cotoruelo, M; *y col*. 1998. Tratamiento de aguas por adsorción. El carbón activo como adsorbente. Ingeniería Química. (E): 195-200, septiembre.
8. Dąbrowski, A. 2001. Adsorption _ from theory to practice. Advances in Colloid and Interface Science 93. p 135-224
9. Díaz, J. 1999. El desarrollo científico-técnico y la interrelación sociedad-naturaleza. Tecnología y Sociedad. Ciudad de la Habana. Editorial Felix Varela. Cuba.
10. Gómez, E. 1997. Curso de Verano: Evaluación de impacto ambiental. Universidad de León. España. septiembre.
11. Gómez, E. 1998. Caracterización y depuración de aguas residuales, sector agrario. Tecnología de Bajo Costo. España. Edición. Madrid. p 183-189.
12. Gómez, E. 1999. Curso de Verano: Introducción a la Gestión, Tratamiento y Valorización de los Residuos Sólidos. Universidad de León. Julio.
13. González, L; *y col*. 2001. Eliminación de fenol utilizando adsorbentes obtenidos a partir de lodos de depuradoras. Tecnología del agua. (E) 208: 34-38, enero.
14. Groso, G; *y col*. 1999. El carbón activado, materias primas y aplicaciones. Química e Industria: 177-180, marzo
15. Hernández, E. 2000. La regeneración del Carbón Activado en polvo como una vía de solución a la afectación ambiental que provoca su vertimiento. // Tesis (presentada en opción al grado científico de Master en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental). Universidad de Matanzas. Cuba. p 5-73.
16. Iánez, E. 2002. Curso de Microbiología General. Acción de los agentes químicos sobre las bacterias. [en línea] junio 2002. Disponible en: http://www.ugr.es/~eianez/microbiologia/19_Micro.html. [consulta: mayo 20 2003]
17. Jeyaseelan, S ; *et al*. 1996. Development of adsorbent/catalyst from municipal wasterwater sludge. Water Science Technology. (GB) 34 (3-4):

449-505.

18. Kördel, W; *et al*. 1997. Determination of the adsorption-coefficients of organic substances on sewage sludge Chemosphere. 35 (1/2): 107-119.
19. Li, A ; *et al.* 2002. Adsorption of phenolic compounds from aqueous solutions by a water-compatible hypercrosslinked polymeric adsorbent. Chemosphere. (CH) 47: 981-989.
20. Li, G. Q; *et al*. 1995. Surface area development of sewage during pyrolysis. Fuel 74 (3): 344-349.
21. Li, Y.H ; *et al.* 2003. Importance of activated carbons oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption. Fuel (USA) 82: 451-457.
22. Llanez, J. 1999. Políticas económicas ambientales. 1ra Edición. La Habana. Editorial Ciencias Sociales. p 172.
23. Martín, M.J; *y col*. 1999. Valorización de fangos biológico a excedentes de EDARs por transformación en carbón activado. Análisis comparativo de la capacidad de adsorción respecto a colorantes y metales pesados. Universidad de Girona. Tecnología del Agua. (E) 184: 42-48.
24. Martín, M.J; *et al*. 2003. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions. Chemical Engineering Journal . (E) 94:231-234. septiembre.
25. Martín, M.J; *et al*. 2004. Carbonaceous adsorbents from sewage slugde and their application in a combined activated slugde-powdered activated (AS-PAC) treatment. Carbon . (E). 42:1389-1394. febrero.
26. O Campo, G; *y col*. 1986. El carbón activado a partir de los subproductos de la caña de azúcar. En su: La industria de los derivados de la caña de azúcar. Editorial Científico-Técnica. Cuba.
27. Otero, M (a). 1999. Gestión de los biosólidos. Aplicación agrícola a pequeña escala. Programa de Doctorado Ecología y Medio Ambiente. España. p 13-18, septiembre.
28. Otero, M (b). 1999. The use of sewage sludges as adsorbents. Specialised Conference on Disposal and Utilization of Sewage Sludge: Treatment Methods and Aplication Modalities. (G): 623-626, octubre.
29. Otero, M; *et al*. 2003. Elimination of organic water pollutants using adsorbents obtained from sewagw sludge. Dyes and Pigments. (E) 57: 53-65.
30. Pérez, N. 2002. Obtención de carbón activado a partir del residual sólido generado en el beneficio húmedo del café. Tesis (en opción al grado científico de Master en Ciencias Ambientales). Universidad de Pinar del Río. Cuba.
31. Pichardo Díaz, J. 1997. Los problemas ambientales y sus manifestaciones

globales. Instituto Superior Pedagógico. Ciudad de la Habana. Caminos Abiertos. (C) 72-73 (6).

32. Ramalho,R. S. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Ed Reverté, S.A, España. 705 p

33. Rodríguez, F; *y col*. 1998. Carbones activados a partir de materiales lignocelulósicos. Departamento de Química Inorgánica Universidad de Alicante. Tratamiento Medioambiental. Química e Industria: 19-27, octubre.

34. Roop, B; *et al*. 1998. Removal Phenolic Compounds. Activate Carbon applications. New York. p 398-401.

35. Roskill Information. 1992. The economics of activated carbon. Fourt Edition. Services Ltd.

36. Rumphorst, M.P; *et al*. 1994. Pyrolysis of sewage sludge and use of pyrolysis coke. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 28: 137-155. Amsterdan

37. Sánchez, M. 1999. Valorización de fangos biológicos excedentes de EDARS por transformación en carbón activado. Tecnología del agua (E) 184.

38. Seoanez, M. 1998. Ecología Industrial. Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. Manual para responsables medioambientales Ediciones Mundi-Prensa. Segunda Edición. Madrid. España.

39. Seoanez, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al medio natural continental. Ediciones Mundi Prensa, Editorial Aedos, S.A.

40. Seoanez, M. 2000. Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos // Ediciones Mundi Prensa. Madrid.

41. Seoanez, M.1999. Residuos. Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Ediciones Mundi Prensa, Editorial Aedos, S.A.

42. Smísěk, M; *et al*. 1970. Active Carbon. Manufacture properties and applications. Institute of Physical Chemistry Czechoslovak Academy of Science. Elsevier Publishing Company.

43. Tay, J.H (a); *et al*. 2001. A comparative study of anaerobically digested and undigested sewage sludgesin preparation of activated carbons. Chemosphere 44: 53-57.

44. Tay, J.H (b) ; *et al*. 2001. Optimising the preparation of activated carbon from digested sewage sludge and coconut husk. Chemosphere 44: 45-51

45. Walhof, L; *et al.* 1999. Effect of pyrolysis temperatura on preparation of activited carbon from biosolids. Illinois Instituted of Thecnology. Department of Chemical and Enviromental Enginering. (USA). p 605-612.

46. Wigmans, T. 1989. Industrial Aspects of Production and Use of Activated. Carbon 27 (1): 13-22.