

## APROVECHAMIENTO DE LODOS DE DEPURADORAS URBANAS COMO ADSORBENTE. EFECTO DEL MÉTODO DE ACTIVACIÓN

Lourdes Y. González Sáez\*, Marta Otelo Cabelo\*, Juana Zoila Junco Horta\*\* Giovanni Pardini\*\*\*

\*Centro de Estudios de Medio Ambiente de Matanzas. Facultad de Ingenierías Química y Mecánica. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, \*\*Instituto de Recursos Naturales. Universidad de León, España, \*\*\*Instituto de Medio Ambiente. Universidad de Girona, España.

*Con el objetivo de aprovechar los lodos que se generan en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas (EDARs) de la provincia de Matanzas, Cuba, en el presente trabajo se estudia una variante de gestión de estos residuos para la producción de carbones activados. Su aplicación en la remoción de fenol permite comprobar la efectividad de estos adsorbentes. Los lodos fueron obtenidos de la activación por método químico con ácido sulfúrico y método físico con vapor de agua. Para comprender los procesos de adsorción así como el desarrollo de la estructura porosa de los materiales se caracterizó tanto a los lodos como a los carbones activados producidos de estos residuos. En la caracterización de los carbones activados obtenidos se emplearon los métodos de prueba para carbones activados reportados en las Normas CEFIC, y los grupos superficiales funcionales se determinaron por el Método de Boehm. Como complemento de la caracterización se realizaron análisis termogravimétrico y termogravimétrico diferencial en atmósfera oxidante e inerte indistintamente. Se desarrollaron las isothermas de adsorción para estudiar la capacidad de adsorción de fenol y el desarrollo de la porosidad producido por ambas activaciones. Los resultados muestran que los adsorbentes obtenidos presentan características superficiales con tendencia a la heterogeneidad estructural, lo que se corrobora con las isothermas de adsorción. Todas estas características condicionan la relación adsorbente/adsorbato lo cual favorece la efectividad en la remoción de fenol. Estos resultados demuestran la factibilidad de elaborar carbones activados a partir de lodos de depuradoras urbanas.*

**Palabras clave:** lodos, EDARs, carbón activado, isoterma de adsorción, activación

*With the objective to take advantage of sewage sludge that are generated in the Purifying Urban Residual Water Plants (EDARs) of the province of Matanzas, Cuba, in the present work studies a variant of management of these remainders for the activated carbon production. Its application in the removal of phenol allows verifying the effectiveness of these adsorbent ones. Activated carbons were obtained from the activation by chemical method with sulphuric acid and physical method with water steam. In order to understand the processes of adsorption as well as the development of the porous structure of the materials so much to sewage sludge as to activated charcoals produced of these remainders was characterized. In the characterization of activated carbons obtained the methods of test for activated charcoals reported in Norms CEFIC were used, and the functional superficial groups determined themselves by the Method of Boehm. As complement of the characterization termgravimetric analysis and termgravimetric differential were made indifferently in oxidating and inert atmosphere. The adsorption isotherms were developed to study the capacity of adsorption of phenol and the development of the porosity produced by both activations. The results show that the adsorbent ones obtained present superficial characteristics with tendency to the structural heterogeneity, which is corroborated with the adsorption isotherms. All these characteristics condition the adsorption which favours the effectiveness in the removal of phenol. These results demonstrate the feasibility to elaborate activated carbon from sewage sludge of urban water purifiers.*

**Key words:** sewage sludge, EDARs, activated charcoal, isothermal of adsorption, activation.

### Introducción

Es evidente que la depuración de aguas residuales constituye una solución a los problemas ambientales que provocan su vertimiento,

sin embargo, esta solución genera otros residuos sólidos cuya gestión ha de ser racional para evitar así que la depuración suponga simplemente trasladar el problema de un medio a otro.

---

En el balneario de Varadero, principal polo turístico de sol y playa de Cuba, los residuales son tratados en plantas de tratamiento biológicos dentro de los que se encuentran tres de lodos activados. Estos sistemas de tratamiento generan una cantidad de residuos sólidos suficientes como para que su evacuación constituya un problema de contaminación.

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. La producción de lodos de depuradoras se ha 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 /5/.

En estudios realizados recientemente 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 por sí solos resulta un recurso obtenido en grandes cantidades a bajo costo. A pesar de que 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 no se excluye la posibilidad de poderlos utilizar como adsorbentes en la remoción de contaminantes difícil, o casi imposible, de eliminar por los tratamientos biológicos convencionales /4-8, 11, 10/.

Este es el caso de la mayor parte de los contaminantes orgánicos, entre los que se encuentran los compuestos fenólicos. Los efluentes líquidos con contenidos de sustancias fenólicas se originan en procesos industriales como refinerías de petróleo, industria química, metalúrgica, industria del plástico, industria del papel y otras. Las principales Industrias químicas-energéticas de la provincia de Matanzas generan vertidos residuales con contaminantes de esta naturaleza.

## **Materiales y métodos**

En la experimentación se utilizaron lodos procedentes de la depuradora de núcleo urbano de Taínos I (TS). Esta EDARs es un sistema de tratamiento por lodos activados ubicada en el polo turístico de Varadero, Cuba. Los lodos fueron activados química y físicamente. En la activación por deshidratación química (TQ) los lodos se impregnaron con ácido sulfúrico en proporción 1:1 en peso durante 48 horas, pirolizándolos posteriormente en atmósfera de nitrógeno inerte hasta 625 °C con una rampa de calentamiento de 15 °C/min durante 30 min /7, 8/. El carbón obtenido se sometió a un tratamiento posterior con ácido clorhídrico al 10 % en masa para liberar el ácido sulfúrico utilizado en la activación.

En la activación se utilizó vapor de agua como agente activante, con una relación 1:1 kg de vapor de agua/kg de carbón, a una temperatura de 900 °C durante 60 min. Como gas de purga se utilizó nitrógeno de alta pureza /8/.

## **Caracterización del lodo (TS) y los carbones activados (TQ, TF)**

Los análisis químicos de la caracterización del lodo (TS) se realizaron según las Normas ISO 17025:1999 y ISO 13530:1997 reportados por Acevedo /1/.

Los carbones activados obtenidos (TQ, TF) se caracterizaron según el procedimiento reportado en los métodos de prueba para carbones activados de las Normas CEFIC. El índice de yodo (In), se obtuvo según el método volumétrico utilizado por Martín /10/ y los grupos superficiales funcionales se determinaron por el Método de Boehm /3/. Como complemento de la caracterización se realizaron los análisis termogravimétrico y análisis termogravimétrico diferencial en atmósfera oxidante (combustión) e inerte (pirólisis) indistintamente para lo que se empleó un analizador TA Instruments, modelo SDT 2960. En las combustiones se utilizó como gas de purga aire, y nitrógeno de alta pureza en las pirólisis.

## Evaluación de los adsorbentes en el mecanismo de adsorción

Para estudiar la capacidad de adsorción de fenol y el desarrollo de la porosidad producido por la activación de los lodos se desarrollaron las isotermas de adsorción. Las isotermas se desarrollan a temperatura constante de  $25 \pm 2$  °C a partir de la agitación magnética de 0,5 g de cada muestra y 100 mL de disoluciones con una concentración inicial menor de 200 mg/L durante un período de 12 horas hasta alcanzar el equilibrio. Para interpretar el comportamiento de las isotermas obtenidas se utilizaron las ecuaciones de Langmuir y Freundlich. Así las capacidades de adsorción ( $q_e$ , mg/g) fueron calculadas como:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

donde  $C_0$  es la concentración inicial del adsorbato (mg/L),  $C_e$  es la concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L),  $V$  es el volumen de la disolución (L) y  $M$  es la masa del adsorbente (g).

En las pruebas de adsorción se utilizan dos granulometrías,  $g^1$  (diámetro 0,12 mm-0,5 mm) y  $g^2$  (diámetro 0,5 mm-1 mm). Los niveles de fenol en todas las pruebas se determinaron analíticamente por el método fotométrico de estabilización del color azul de prusia /9/. Para las determinaciones colorimétricas se utilizó el espectrofotómetro Spectrophotometer UV-4200, marca Zuzi a 700 nm. Todas las pruebas de adsorción y las determinaciones analíticas se han realizado por triplicado bajo condiciones idénticas.

## Resultados y discusión

### Caracterización de adsorbentes: Lodos de la EDARs de Taínos I TS. Carbones activados: activación química TQ, activación física TF

En la tabla 1 se muestra las características de los lodos de la EDARs de Taínos I, así como de los carbones activados obtenidos a partir de ellos por activación física con vapor de agua y por activación química con ácido sulfúrico.

Tabla 1  
Composición físico-química de TS, TQ y TF

Lodos TS			
	pH	6,75	
	Cond (mS/cm)	2,11	
	N Kjeldahl (%)	5,5	
	Materia orgánica (%)	72,9	
	CF (%)	13,16	
	MV (%)	60,72	
	Cenizas (%)	26,12	
	Humedad (%)	11,2	
	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	624,8	
	C <sub>6</sub> (mg/L)	5,5	
	M <sub>n</sub> (mg/L)	1,19	
	K (mg/L)	0,99	
	N <sub>i</sub> (mg/L)	0,17	
	P (mg/L)	0,22	
Metales pesados	F <sub>2</sub> (mg/L)	0,52	
	Z <sub>n</sub> (mg/L)	2 776	
	C <sub>u</sub> (mg/L)	4,4	
	P <sub>b</sub> (mg/L)	265	
	C <sub>d</sub> (mg/L)	104	
Carbones activados		TQ	TF
	pH	1,6	11,4
	Cenizas (%)	40,3	78,85
	MV (%)	39,11	6,2
	CF (%)	20,59	14,95
	Humedad (%)	9,6	0
	In (mg/g)	203,14	379,28
	Mel (%)	58,83	68,12
Grupos funcionales superficiales	Carboxilo (meq/g)	2,34	0,28
	Lactónico (meq/g)	0,53	1,37
	Fenólico (meq/g)	0,16	0,31
	Carbonilo (meq/g)	1,56	0,89
	Grupos ácidos totales (meq/g)	4,59	2,85
	Grupos básicos (meq/g)	0,16	3,12

Cualquiera que sea el método de activación que se utilice, el proceso en sí favorece el incremento del contenido de carbono fijo. Aún así la activación física presenta menor rendimiento que la activación química, lo que se refleja en un menor contenido de carbono fijo en los adsorbentes TF. Este hecho se debe a la acción desmineralizante del ácido sulfúrico, el cual produce sales solubles en estos materiales que son eliminados durante el tratamiento, enriqueciendo por tanto su contenido en carbono total.

Las altas temperaturas con que se trabaja en la activación física (900 °C) hacen que exista un mayor desprendimiento de la materia volátil (MV), razón por la cual es mayor su reducción en este proceso. La reducción de la materia volátil condiciona indirectamente el contenido de cenizas.

---

La oxidación en los procesos de activación conduce a un aumento de las cenizas. Una mayor eliminación de volátiles y un menor rendimiento en la activación física hacen que el contenido en cenizas del carbón activado obtenido en este proceso TF sea 3 veces mayor que el de su precursor TS y alrededor de 2 veces mayor que el de los carbones químicamente activados TQ. Si bien es cierto que el contenido de cenizas podría favorecer la adsorción de oxígeno sobre la superficie del carbón en el proceso de activación, su presencia interfiere los procesos de adsorción cuando su contenido es elevado. La eliminación de agua en la etapa inicial del proceso de activación determina la reducción del contenido de humedad para los adsorbentes obtenidos producto del tratamiento térmico.

La capacidad de adsorción tanto de melaza como el índice de yodo son métodos alternativos que se utilizan para caracterizar a los carbones en cuanto a su aplicabilidad como materiales adsorbentes de contaminantes industriales. El índice de yodo como método alternativo y estimado del área superficial, relativo a poros en el rango de los microporos y la capacidad de eliminación de melaza como referencia de la superficie interna del adsorbente en poros con diámetros cercanos al diámetro molecular de la sustancia (~2,8 nm); dan noción de la heterogeneidad de la superficie de ambos carbones activados. El hecho de que los lodos activados físicamente TF presenten mayores capacidades de adsorción de yodo puede relacionarse con que la activación física da lugar a un mayor número de sitios disponibles para la adsorción, probablemente por desarrollar una estructura en el adsorbente con diámetros mayores que 1 nm en el intervalo de los microporos. Las altas temperaturas con que se obra en la activación física benefician la formación de la estructura microporosa del producto, lo que le confiere una mayor superficie. Esta conducta reafirma lo expuesto por Rodríguez /12/, el cual plantea que la activación química confiere poros de mayor tamaño que la activación física. El mayor porcentaje de adsorción de melaza por parte de TF implica una mayor fracción de mesoporos que facilita la transferencia hacia la superficie interna de los microporos.

Los valores de pH de los carbones activados TQ y TF se diferencian con respecto del lodo seco TS (6,75) con la peculiaridad de que la activación química lo disminuye (1,60) y la activación física lo incrementa (11,40). Esto está muy relacionado con el proceso de activación en cuestión, pues altas temperaturas combinadas con la exposición de vapor de agua producen carbones activados básicos del tipo H, fundamentalmente por la transformación de las oxisales contenidas en estos materiales a óxidos metálicos de naturaleza alcalina. Por el contrario la activación con ácido sulfúrico a menores temperaturas genera adsorbentes ácidos del tipo L, fundamentalmente por la acción de este ácido sobre el material. Las características de los grupos funcionales superficiales en ambos tipos de carbones activados son indicadores de los comportamientos antes señalados.

En los carbones activados TQ prevalecen los grupos superficiales ácidos (4,59 meq/g), siendo mucho menor su contenido en los carbones activados TF (2,85 meq/g). Dentro de los grupos ácidos, los carbonilos son los dominantes en todos los casos, lo cual acentúa la adsorción de compuestos orgánicos de acuerdo a un mecanismo de formación de complejo donador-aceptor /2, 5/. Estas características influyen en la capacidad de adsorción en dependencia de la naturaleza del soluto.

Como complemento de la caracterización de los carbones activados, las figuras 1, 2 y 3 muestran el análisis termogravimétrico (TG) y termogravimétrico (DTG) diferencial del lodo y los adsorbentes. Si bien el análisis gravimétrico en atmósfera inerte permite complementar la caracterización de los materiales carbonosos objeto de estudio, las combustiones constituyen referencias para futuras valoraciones alternativas de gestión de manejo de estos materiales, una vez agotados. Ambos análisis citados indican la estabilidad térmica del sólido según el desprendimiento de volátiles y la descomposición térmica que ocurre producto a las transformaciones y/o oxidación del material. La mayor o menor pérdida de masa en función del incremento de la temperatura se encuentra influenciada por el contenido de volátiles y agua presente en la matriz del material carbonoso.

El perfil TG en la pirólisis de TS muestra una primera transformación a temperaturas algo ma-

yores de 100 °C, correspondiente a la pérdida de agua no estructural. Con el posterior incremento de la temperatura se observa la ocurrencia de una serie de transformaciones con máximas velocidades a temperaturas de 280 °C, 340 °C y 420 °C. Estas transformaciones, aunque en una menor medida, fueron asimismo observadas en este material bajo condiciones de tratamiento térmico en atmósfera oxidante. Por el contrario, tales transformaciones no fueron observadas en TF y TQ, lo cual nos permite suponer que tales procesos involucren a materiales volátiles contaminantes del lodo inicial, los cuales son eliminados durante los procesos de activación química y física.

Otro aspecto a señalar es la mayor estabilidad térmica conferida a este lodo TS después de su activación por ambos métodos, porque las transformaciones térmicas observadas en estos últimos ocurren a valores de temperatura superiores.

En este sentido también se debe recordar que el aumento de la temperatura a la cual se exponen estos materiales conlleva a una pérdida de masa producto al secado y la desvolatilización del mismo. Al finalizar el proceso se obtiene un sólido carbonoso constituido, principalmente, por carbono fijo y cenizas. Por tanto, los valores de porcen-

tajes de pérdida de masa en los TG para las temperaturas máximas se corresponden con el contenido de estos dos parámetros que se obtienen en la caracterización físico-químico para cada material (tabla 1), el porcentaje restante se relaciona con la materia liberada u oxidada en la pirólisis asociada al contenido de materia volátil y humedad. De esta forma, el contenido de carbono fijo y cenizas, según los TG en la pirólisis, es mayor para TF (91,36 %) que para TQ (52,60 %) y para TS (35,82 %). Esta menor pérdida de masa en TF se justifica con el menor contenido de sustancias volátiles, las cuales son eliminadas de TS tras tratamiento físico. Por otra parte el análisis térmico de estos materiales en atmósferas oxidantes conlleva a la formación de derivados oxigenados de los compuestos carbonados, quienes desprenden monóxido de carbono y dióxido de carbono a altas temperaturas. Esto justifica el mayor contenido final de material en TF en comparación con TQ.

De igual forma debe resaltarse la gran similitud observada en los valores de residuos sólidos finales para estos materiales, determinados tanto por análisis termogravimétrico como por gravimetría convencional (tabla 2).

Tabla 2  
Resumen de las caracterizaciones del lodo TS y los carbones activados TQ y TF

	Análisis físico-químico			Análisis termogravimétrico (TG)		
	TS	TQ	TF	TS	TQ	TF
Contenido de Cenizas (%)	26,12	40,30	78,85	20	36,06	82,58
Contenido de MV (%)	60,72	39,11	6,20	59,18*	43,40*	7,64*
Contenido de CF (%)	13,16	20,59	14,95	15,82*	16,54*	8,78*
Humedad (%)	11,2	9,6	0	5	4	1
Contenido de cenizas y carbono fijo (%)	39,28	60,89	93,80	35,82	52,60	91,36
Contenido de materia volátil y humedad (%)	71,92	48,71	6,20	64,18*	47,40*	8,64*
Temperatura de máxima velocidad de transformación térmica (°C)						
• Pirólisis	-	-	-	135-280-340-420	80-300-800	80-770-970
• Combustión	-	-	-	90-270-330-410-570	90-500	80-530

(\*) valores calculados a partir de los datos obtenidos del análisis termogravimétrico.

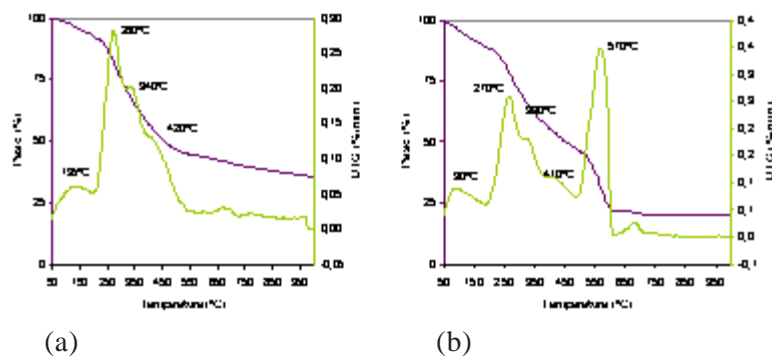


Fig. 1 Análisis termogravimétrico (DTG) del lodo TS. a- Pirólisis; b- Combustión.

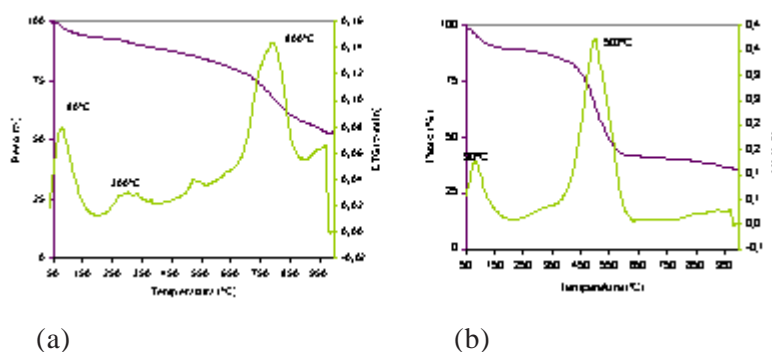


Fig. 2 Análisis termogravimétrico (DTG) del carbón activado TQ. a- Pirólisis; b- Combustión.

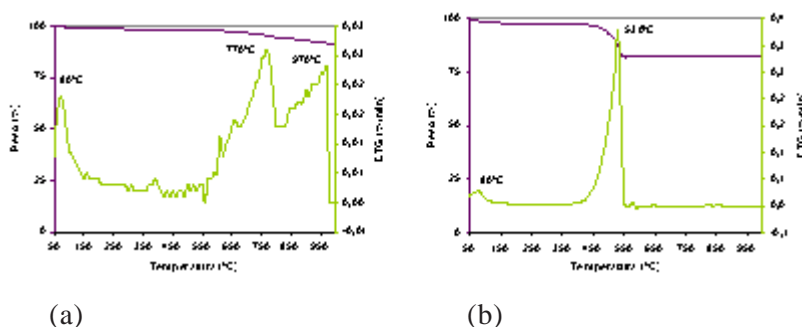


Fig. 3 Análisis termogravimétrico (DTG) del carbón activado TF. a- Pirólisis; b- Combustión.

### Isotermas de adsorción. Carbones activados TQ y TF

La figura 4 representa las isotermas de adsorción de ambos carbonos activados. Como se ilustra, estas isotermas no describen una *plateau* bien definida. Sin embargo, los coeficientes de determinación de la forma linealizada de los modelos de isotermas y la desviación normalizada ( $\Delta D_N$ ) (tabla 3) parecen indicar que existe una estructura microporosa desarrollada al predominar valores superiores de los

parámetros del modelo de Langmuir ( $R^2 > 98\%$ ). Además, en todos los casos, la adsorción se puede considerar favorable, porque el factor de separación  $R_L$ , que caracteriza a la isoterma de Langmuir, alcanza valores  $0 < R_L < 1$ . No obstante, no puede descartarse una cierta heterogeneidad y por tanto la existencia de estructura mesoporosa, pues para el modelo de Freundlich se han obtenido en la totalidad de las curvas isotermas coeficientes de determinación superiores al 94% y valores de  $n$  mayores a la unidad.

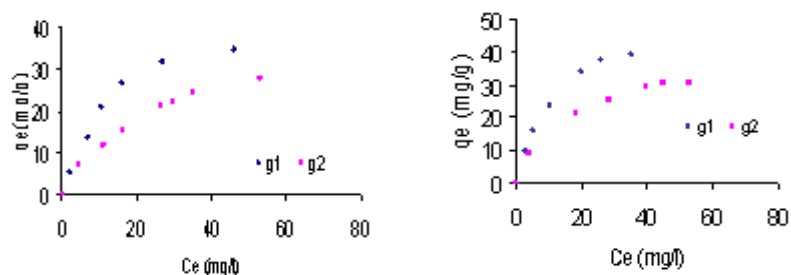


Fig. 4 Isotermas de adsorción de fenol de los carbones activados TQ y TF para los tamaños de partículas g1 (0,12 mm-0,5 mm) y g2 (0,5 mm-1 mm).

Tabla 3

Parámetros de los modelos que describen las isotermas de adsorción de fenol de los carbones activados TQ yTF

			<i>Isoterma de Langmuir</i>					
Tamaño de partícula	Adsorbente	Adsorbato	$Q_0$ (mg/g)	$b$ (L/mg)	$R^2$ (%)	$R_L^{(*)}$	$\Delta D_N$ (%)	Modelo
g1	TQ	PF	50,50	0,0621	99,74	0,0745	4,9476	$q_e = \frac{3,1368C_e}{(1+0,0621C_e)}$
g1	TF	PF	55,25	0,0794	99,8	0,0592	2,5616	$q_e = \frac{4,386C_e}{(1+0,0794C_e)}$
g2	TQ	PF	44,64	0,0392	92,97	0,1131	9,1456	$q_e = \frac{1,7507C_e}{(1+0,0392C_e)}$
g2	TF	PF	50,00	0,0426	92,02	0,1051	9,5972	$q_e = \frac{2,1281C_e}{(1+0,0426C_e)}$
			<i>Isoterma de Freundlich</i>					
			$K_f$ [(mg g <sup>-1</sup> )(mg <sup>-1</sup> L) <sup>1/n</sup> ]	$n$	$R^2$ (%)	$\Delta D_N$ (%)	Modelo	
			4,2198	1,6348	94,52	12,9605	$q_e = 4,2198 C_e^{0,6117}$	
			6,2445	1,8198	97,67	7,1519	$q_e = 6,2445 C_e^{0,5495}$	
			1,3861	1,2136	95,61	13,5889	$q_e = 1,3861 C_e^{0,824}$	
			1,5962	1,2283	91,53	21,1217	$q_e = 1,5962 C_e^{0,8141}$	

(\*)- calculados para la concentración inicial de cada experimento (~200mg/L).  $Q_0$ - capacidad máxima de adsorción.  $b$ - constante del modelo de Langmuir.  $R_L$ - factor de separación del modelo de Langmuir.  $R^2$ - coeficiente de determinación de los modelos.  $\Delta D_N$ - desviación normalizada.  $K_f$  y  $n$ -constante del modelo de Freundlich. PF- disolución de patrón fenol. HP- residual de Hidrolizado de Proteínas.

Teniendo en cuenta que en el modelo de Langmuir:  $Q_0$  indica la capacidad de adsorción,  $b$  está relacionada con la afinidad de los sitios de enlace y en el modelo de Freundlich:  $K_f$  es interpretado como un parámetro de capacidad y  $n$  representa la magnitud de adsorción, los mayores valores de estos parámetros para la granulometría  $g^1$  indican que la disminución del tamaño de partícula favorece la existencia de un mayor número de sitios activos disponibles para la adsorción de fenol y una mayor accesibilidad al sistema de poros. Por esta razón se alcanza mayores capacidades de adsorción para las partículas de menor tamaño ( $g^1$ ) al ser comparada con la capacidad de adsorción que alcanzan las partículas de mayor granulometría ( $g^2$ ). El aumento del ángulo de la pendiente de la curva isoterma para la granulometría  $g^1$  con respecto a  $g^2$  indica que la velocidad de adsorción es mayor en la medida que se incrementa el área superficial por la disposición de un mayor número de sitios activos referidos a la misma relación adsorbato/adsorbente.

Al comparar los resultados obtenidos para ambos carbones activados se observa que la activación física y química de un mismo material produce carbones activados con características diferentes en cuanto a estructura porosa y química de la superficie. Si bien Rodríguez /12/ demostró que mediante la activación química se consigue un conjunto de volumen de conjunto de microporos más mesoporos es superior en el proceso de activación química, el proceso de activación física desarrolla una mayor microporosidad, de ahí que la aplicabilidad sea específica en función de la interacción adsorbente-adsorbato.

Los parámetros de la ecuación de Langmuir y Freundlich son mayores para el carbón activado obtenido por activación física TF con respecto al carbón activado químicamente TQ por lo que existe una mayor afinidad del fenol por los sitios activos del carbón activado TF, dado en lo fundamental por diferencias estructurales y físico-químicas de ambos adsorbentes. Al estudiar las características de los carbones TQ y TF (tabla 1) se aprecia que, aún cuando el contenido de carbono fijo es mayor en TQ, el contenido de materia volátil también es mayor en este último. Esto explica, en parte, la baja retención de fenol que

presenta en comparación con TF, la materia volátil presente en la matriz del carbón activado no es más que estructura amorfa que no fue convertida en centros activos del nuevo producto y que ocluye poros dentro de la estructura.

El alto contenido de cenizas del carbón TF puede interferir la satisfactoria retención del fenol al influir negativamente en el mecanismo ocluyendo los poros de la estructura del carbón activado e interfiriendo en la movilidad de las moléculas hacia los centros activos de la superficie y por tanto en la cinética del mecanismo. Sin embargo, el pH de las disoluciones y de los carbones activados juega un papel importante. Las densidades de cargas negativas o positivas que puedan rodear la superficie de los carbones activados dependen fundamentalmente de los grupos funcionales superficiales ionizables y del pH de la disolución. El carbón TQ se considera carbón ácido del tipo L, estos carbones son fundamentalmente hidrófilos lo que hace que disminuya la adsorción de fenol sobre estos adsorbentes. El principal responsable de esta característica es el grupo carboxílico de la superficie del carbón /12/. Como se observa en la tabla 1, los grupos carboxílicos representan una fracción mayor para el carbón TQ que para los restantes carbones activados. Por otra parte, el carbón TF es del tipo H por su carácter básico. Tales carbones son hidrófobos, características que favorece la adsorción del soluto en cuestión.

Como el fenol se adsorbe en los poros con diámetros mayores a 1 nm, los mayores índices de yodo y capacidad de adsorción de melaza de TF indican que los poros adyacentes están menos distantes que en TQ, al estar referidos a menos contenido de carbono fijo. Este hecho contribuye a la facilidad de acceso del fenol a los poros por difusión superficial e interna.

## Conclusiones

Los resultados demuestran que es posible la elaboración de carbones activados a partir de lodos de depuradoras urbanas, para la adsorción de fenol, lo que constituye una alternativa confiable de disposición final de este residuo. Sin embargo



los métodos de activación condicionan directamente las características superficiales de los carbones activados e indirectamente su aplicación en la adsorción. 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 su posible aplicación. La activación química y física estudiadas, propician el desarrollo de una estructura porosa heterogénea en los adsorbentes obtenidos. La distribución de poros es indistinta en función del propio método de activación. Las diferencias relativas encontradas en la distribución de poros y características físico-químicas permiten concluir que la activación física con vapor de agua desarrolla carbones con una mayor distribución de microporos y propiedades básicas de su estructura. Es por esto que de los carbones activados elaborados por este método de lodos nacionales, son los que mejores propiedades presentan para ser utilizados en el mecanismo de adsorción del fenol. Estos resultados se sustentan en los niveles de adsorción alcanzados por ambos carbones activados, influenciado por el tamaño de partícula del adsorbente, así como de los grupos superficiales y el tamaño y distribución de los poros desarrollados con la activación.

## Nomenclatura

### Caracterización de adsorbentes y adsorbatos

<b>TS</b>	lodos secos de la EDARs de Taínos I
<b>TQ</b>	carbón activado químicamente de los lodos de la EDARs de Taínos I
<b>TF</b>	carbón activado físicamente de los lodos de la EDARs de Taínos I
<b>MV</b>	contenido de materia volátil (%)
<b>CF</b>	contenido de carbono fijo (%)
<b>C</b>	contenido de cenizas (%)
<b>R</b>	rendimiento (%)
<b>In</b>	Índice de yodo (mg/g)
<b>Mel</b>	capacidad de adsorción de melaza (%)
<b>Isotermas de adsorción</b>	
<b>g<sub>1</sub></b>	tamaño de partícula (0,12-0,5 mm)
<b>g<sub>2</sub></b>	tamaño de partícula (0,5-1 mm).

<b>(%)</b>	porcentaje de adsorción (%)
<b>ads.</b>	
<b>C<sub>o</sub></b>	concentración inicial del adsorbato (mg/L)
<b>C<sub>e</sub></b>	concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L).
<b>Q<sub>e</sub></b>	capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)
<b>V</b>	volumen de la disolución (L)
<b>M</b>	masa del adsorbente (g)
<b>ΔD<sub>N</sub></b>	desviación normalizada (%)
<b>Q<sub>o</sub></b>	capacidad máxima de adsorción (mg/g)
<b>b</b>	constante de la isoterma de Langmuir
<b>RL</b>	factor de separación de la isoterma de Langmuir
<b>K<sub>f</sub></b>	parámetro de la isoterma de Freundlich
<b>n</b>	parámetro de la isoterma de Freundlich

## Bibliografía

1. ACEVEDO, M; y col, 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, 2001.
2. AKSU, Z, et al.: "A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents", en Waste Management. vol 21, 2001, p 695-702.
3. BOEHMS, H.P, et al.: "Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment", en Carbon, N° 40, junio 2002, p 145-149.
4. CALVO, L.F, et al.: "Upgrading sewage sludge for adsorbent preparation by different treatments", en Bioresource Technology, España, N° 80, 2001, p 143-148.
5. CHEN, X, et al.: "Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge", Waste Management, N° 22, 2002, p 755-760.
6. EKINCI, E, et al.: "Removal of mercury ion from aqueous solution by activated carbons obtained from biomasa and coals", en Fuel Processing Technology, N° 77-78, 2002, p 437-443.
7. GONZÁLEZ, L, et al.: "Eliminación de fenol utilizando adsorbentes obtenidos a partir de lodos de depuradoras", en Tecnología del agua, España, N° 208, enero 2001, p 34-38
8. GONZÁLEZ, L, et al.: "Aprovechamiento de lodos de EDAR urbanas como carbón activo", en Ingeniería Química, España, N° 454, diciembre 2007, p 102-107.
9. GRAHAM, HD, et al.: "Stabilization of the Prussian blue color in the determination of polyphenols", en

- 
- Journal of Agricultural and Food Chemistry, N° 40, mayo 1992, p 801 – 805.
10. MARTÍN, M.J, et al.: “Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions”, en Chemical Engineering Journal, España, N° 94, septiembre 2003, p231-234
  11. OTERO, M, et al.: “Elimination of organic water pollutants using adsorbents obtained from sewage sludge”, en Dyes and Pigments, España, N° 57, 2003, p 53-65.
  12. RODRÍGUEZ, F, et al, El carbón activado en procesos de descontaminación. Dpto. de Química Inorgánica. Universidad de Alicante. España. [en línea] junio 200. Disponible en: <http://www.icp.csic.es/cyted/Monografias2001/A5-163.html>. [consulta: julio 22 2006],2001.