

Isotermas de adsorción para determinar la máxima capacidad de un carbón activado en fase líquida

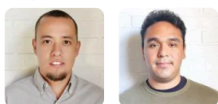
Ing. Germán Grosó Cruzado
Ing. Pamela Moreno Gómez
21 mayo 2024

Atención a clientes:



El equipo de atención a clientes que, como siempre, lo acompañará y dará seguimiento a sus requerimientos.

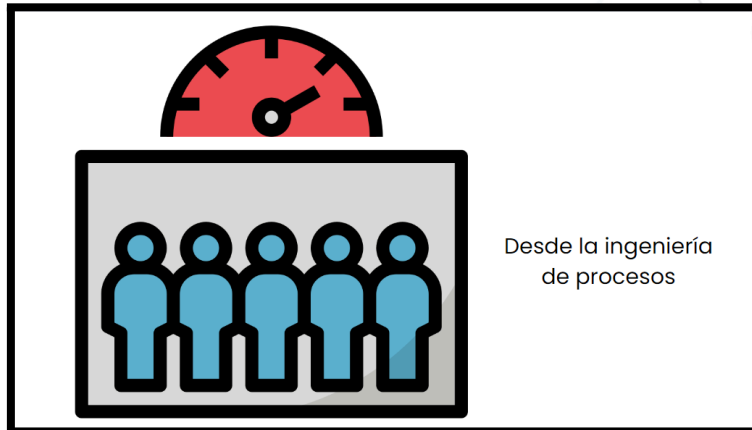
Departamento de calidad:



Departamento de producción y mantenimiento:



Aquí les presento a los compañeros de tres áreas esenciales de Carbotecnia: calidad, producción y mantenimiento. Realizan el trabajo de campo en el que se concreta la aplicación de la tecnología.

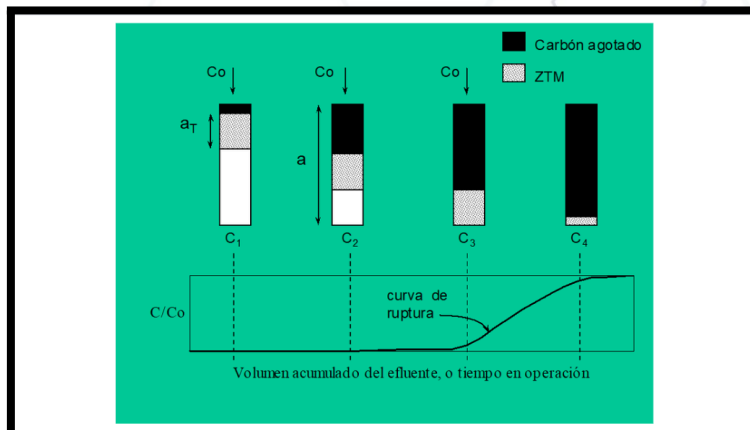


Para todo usuario de carbón activado (CA) es fundamental conocer la capacidad que este tendrá en el proceso en el que lo aplicará.

Suele ser de:

20 a 80 g
100 g CA

En webinars y pláticas anteriores hemos mencionado que, en sus diversas aplicaciones, el CA suele tener una capacidad de adsorción de entre 20 y 80 g de compuestos por 100 g de carbón. Esta capacidad se aprovecha totalmente cuando el carbón cuando se aplica en polvo.



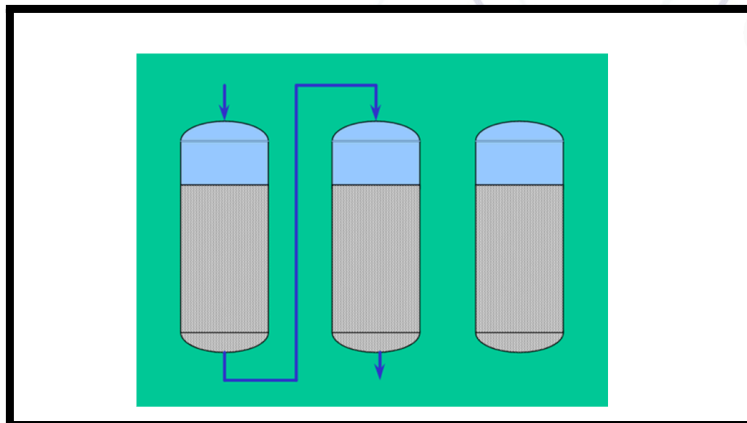
Si el carbón se aplica en forma granular o en pélet y la cama se coloca en una sola columna, el carbón no se cambia cuando ha alcanzado la saturación; se cambia el CA deja “fugar”(pasar) una concentración de moléculas adsorbibles que es inadmisibles en el fluido tratado. En este punto, el carbón no ha alcanzado la saturación, por lo que la capacidad neta del mismo va a ser menor.

**Carbón activado granular o pélet
suele ser de:**

10 a 30 g

100 g CA

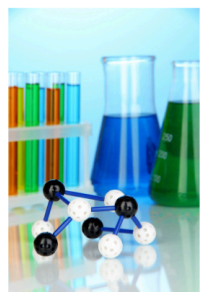
Para el caso de CA que se aplica en forma granular (o en pélet) en una sola columna, la capacidad neta suele ser de entre 10 y 30 g de compuestos adsorbidos por 100 g de CA en el momento en que debe cambiarse el carbón.



Si el carbón granular (o pélet) se coloca en suficientes columnas conectadas en serie, se puede lograr la meta de cambiar el CA totalmente saturado de la primera columna de la serie. En ese momento, el fluido se alimenta a la segunda columna de la serie; el carbón saturado de la primera columna se cambia por carbón virgen o reactivado, y se vuelve a interconectar, ahora al final de la serie de columnas. Esto se realiza solamente cuando el costo que representa el cambio de CA es muy alto en relación al costo total del fluido tratado. Cuando el costo del CA no es alto en relación a otros costos, no vale la pena instalar varias columnas en serie.

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO Mismos principios en líquidos y en gases

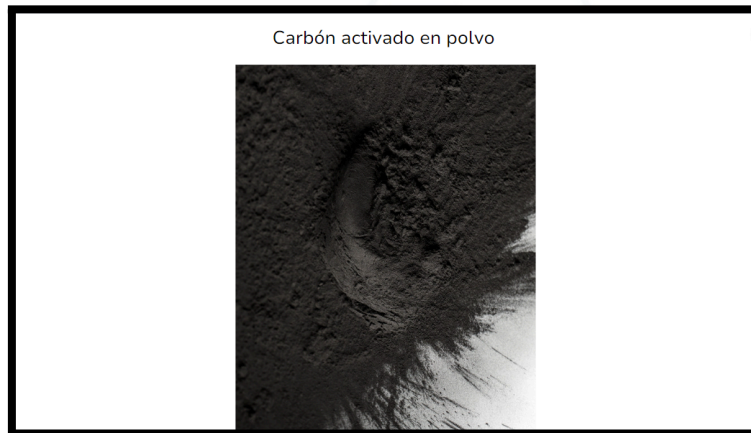
En este webinar hablaremos en términos de fase líquida:
"matraz", "agitar", "g/L", etc.



Adsorción en carbón activado



Lo que mencionaremos en este webinar aplica tanto a líquidos como a gases. No obstante, nos hemos concentrado en líquidos, para hablar de lo que aplica a ellos: matraces, agitar, dosificar carbón activado en polvo, reportar las concentraciones en mg o en g por litro...



Cuando utilizaremos carbón activado en polvo (CAP), es razonable buscar su capacidad de adsorción dosificando el carbón a un volumen de líquido en un matraz que se agita durante un tiempo, al final del cual, el líquido se filtra y se analiza el resultado.

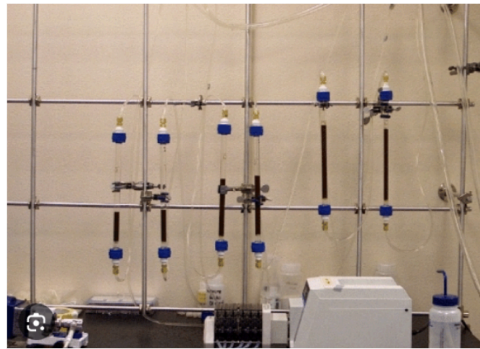


Esto se repite con diversas dosis, hasta encontrar aquella que nos lleva al resultado esperado. La prueba en todos los matraces debe llevarse a cabo a la misma temperatura. Si no se hace así, no se pueden comparar los resultados de cada dosis de carbón, ya que la temperatura tiene un efecto grande en el resultado.

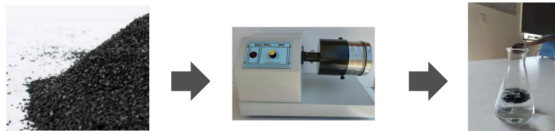
Carbón activado granular



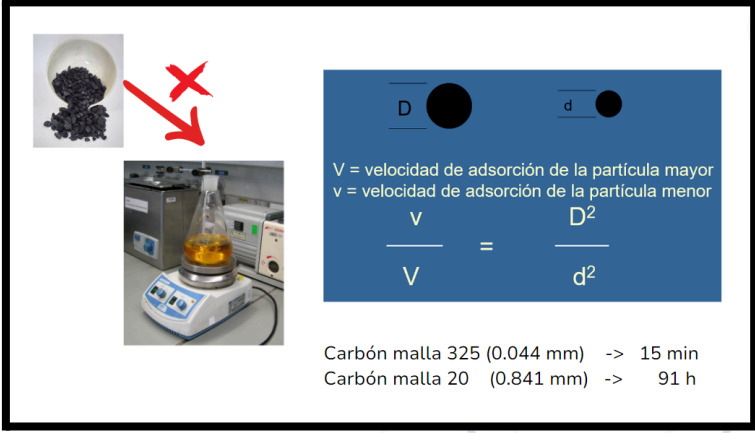
Cuando vamos a utilizar carbón granular (el pélet se aplica más bien a gases), lo más común a priori es que propongamos colocarlo en una columna pequeña para hacer pruebas a nivel laboratorio.



Las pruebas en columna de laboratorio no son nada recomendables, por diversas razones. En primer lugar, el carbón granular tarda mucho tiempo en alcanzar el equilibrio (la prueba puede durar horas o días). En segundo lugar, si no se tiene experiencia para empacar bien la columna, eliminar totalmente el aire de los poros y lograr un flujo homogéneo del líquido, los resultados mienten. En tercer lugar, por bien que se realice la prueba, si la columna de laboratorio tiene un diámetro menor a 2", el efecto de pared de la misma distorsiona los resultados y hace necesario encontrar las constantes de una ecuación de escalamiento, que no es lineal. Solamente así los resultados obtenidos simularán lo ocurrirá en el proceso a escala industrial. Por lo tanto, nuestra recomendación es no hacer pruebas en columna a nivel laboratorio.



Lo mejor es pulverizar el carbón hasta que la mayor parte pase la malla 200 (o, mejor aún, la malla 325), y aplicarlo de la misma manera en que se aplicó el carbón que se va a utilizar a nivel industrial como polvo.



$$\frac{v}{V} = \frac{D^2}{d^2}$$


v = velocidad de adsorción de la partícula mayor
 v = velocidad de adsorción de la partícula menor

Carbón malla 325 (0.044 mm) -> 15 min
Carbón malla 20 (0.841 mm) -> 91 h

Si el carbón activado se va a aplicar industrialmente en forma granular, es importante pulverizarlo muy bien antes de hacer las pruebas para determinar la isoterma de adsorción. Lo que un carbón activado malla 325 logra en 15 min, un carbón granular 8x30 (con tamaño promedio correspondiente a la malla 20) tarda 91 horas.

Columna piloto

Diámetro > 2"
(para evitar distorsión de resultados por efectos de pared)



Mi compañera Pamela explicará la manera de realizar la prueba para obtener una isoterma de adsorción que permita conocer la máxima capacidad que puede alcanzar un carbón activado granular que se aplicará en un determinado proceso. Cuando se tiene dicha capacidad máxima, entonces se puede proceder a realizar pruebas “dinámicas” en columna piloto con diámetro igual o mayor a 2”. En dicha columna piloto, la altura de la cama de carbón debe ser la misma que tendrá a escala industrial.

MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR

ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

**NORMA ASTM D3860-98
(Reaprobada 2014)**


La ASTM tiene publicado un método experimental para obtener isotermas de adsorción en su norma D3860-98. Esta norma menciona que aplica a carbón activado virgen o reactivado con los que se busque retener compuestos indeseables del agua. No obstante, la metodología no se limita a esta aplicación y puede ser una buena guía para cualquier aplicación de CA en fase líquida.

El carbón se pulveriza hasta que el 95% pase la malla 325



Iniciando con el método, primero se debe pulverizar la muestra del CA hasta que el 95% de ella pase la malla 325. Esto tiene como objetivo disminuir el tiempo necesario para alcanzar la saturación o equilibrio. Cabe mencionar que es difícil pulverizar carbones activados (especialmente los de mayor resistencia mecánica, como son los de concha de coco) y lograr que el 95% del material pase la malla 325. Si no se logra este porcentaje, obtendremos resultados falso positivos, ya que lo primero en pulverizarse será el material menos resistente, que es el que tiene mayor grado de activación. Es decir, obtendremos pulverizada la parte más activada del carbón, que no representa la capacidad promedio del mismo.

Es necesario secar la muestra de carbón que se va a utilizar. Normalmente es suficiente si se coloca en un horno de laboratorio durante 3h a 150°C.



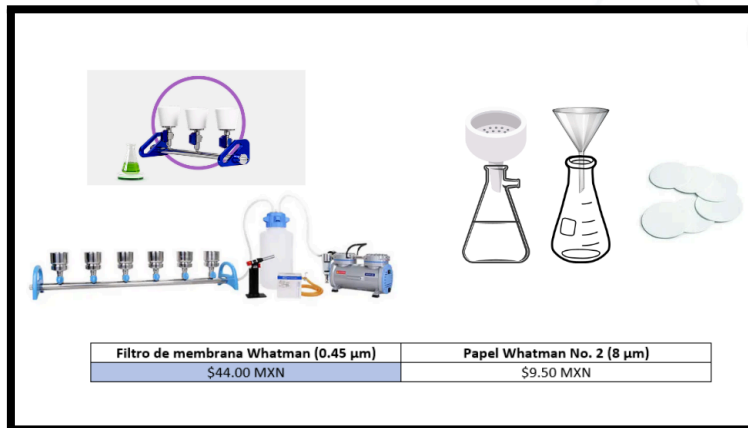
Concentración probable de compuestos adsorbibles, mg/L	Volumen de la solución, ml	Peso sugerido de carbón, g
<10	500	0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 y 0.05
10 a 100	100	0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.0, 2.0 y 4.0
>100	100	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 y 10.0

Después de pulverizado el carbón se elige un volumen de líquido a colocar por matraz. La tabla que se presenta en la diapositiva sugiere el volumen de solución dependiendo de la concentración esperada de compuestos adsorbibles. La elección del número de matraces dependerá del número de puntos que queramos en nuestra curva. Suelen ser entre cinco o diez. A mayor número, mayor número de puntos y mayor probabilidad de obtener la gráfica que represente la realidad con mayor cercanía (siempre fallan algunos puntos, por errores de manipulación y análisis). La misma tabla nos sugiere la cantidad de carbón a colocar en cada matraz. Las cantidades de carbón deben ser tales que se logre la remoción de entre un 10 y un 85% del o de los adsorbatos (fuera de este rango, los resultados no son de utilidad). La dosis de carbón elegida se añade a cada matraz excepto a uno de ellos que se utilizará como control. Después de añadir el carbón activado pulverizado en cada matraz, estos se agitan ligeramente con la mano para que el carbón se humedezca y se integre a la solución.

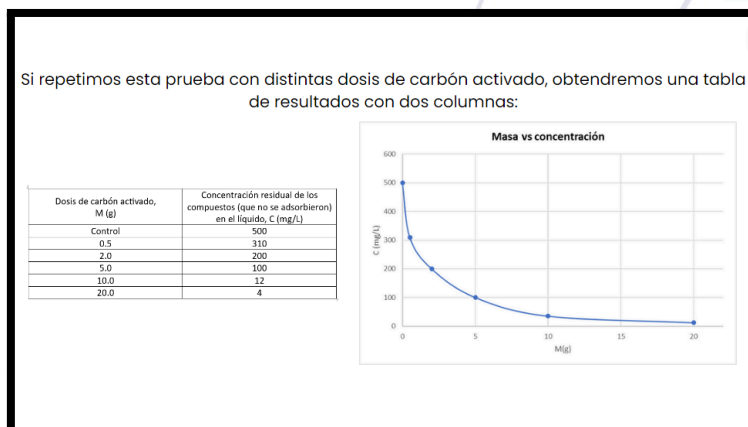
Agitación durante 2 horas



Los matraces se colocan en el agitador. El equilibrio (la saturación del carbón) se suele alcanzar en media hora. No obstante, el método señala que hay que agitar 2 horas, para no correr el riesgo (si no se alcanza el equilibrio, los resultados de la prueba no tienen ninguna utilidad). Como ya se comentó anteriormente, durante la prueba se debe de mantener una temperatura constante. El método menciona que los matraces deben colocarse en un baño de agua que los mantenga a una temperatura constante. Lo mejor es que dicha temperatura sea la que prevalecerá a nivel industrial. Si la agitación se realiza en un lugar y horario en el que no cambie sustancialmente la temperatura, no se requiere del baño de agua. Basta con registrar la temperatura y reportarla con los resultados.



Inmediatamente después de cumplido el tiempo de agitación, se filtra el contenido de cada matraz. El método menciona que deben usarse filtros de membrana, de 0.40 a 0.45 micrómetros. Para fines industriales, las pruebas laboratoriales de dosificación de CA en polvo en líquidos utilizan papel filtro Whatman No. 2, que tiene aberturas nominales de 8 micrómetros y que son suficientemente cerrados para retener las partículas de carbón visibles. Este último papel cuesta menos del 25% de lo que cuesta el filtro de membrana de la misma marca. La filtración en papel Whatman del No. 2 puede hacerse a gravedad o a vacío.



Si repetimos esta prueba con distintas dosis de carbón activado, obtendremos una tabla de resultados con dos columnas, como se presenta en la imagen, en la que hemos escrito valores de un ejemplo. Con estos resultados podemos hacer una gráfica de C vs. M. Si vamos a aplicar el carbón activado en forma de polvo, a partir de la tabla o de la gráfica, podemos elegir la dosis de carbón con la que logramos el resultado deseado. Si vamos a aplicar el carbón activado en forma de polvo, a partir de la tabla o de la gráfica, podemos elegir la dosis de carbón con la que logramos el resultado deseado.

Freundlich:

$$X = C_0 V - CV$$

X = cantidad de los compuestos adsorbidos (mg).

C_0 = concentración del compuesto antes del tratamiento con el carbón (mg/l).

C = concentración del compuesto después del tratamiento con el carbón (mg/l).

V = es el volumen de la muestra de agua (l).

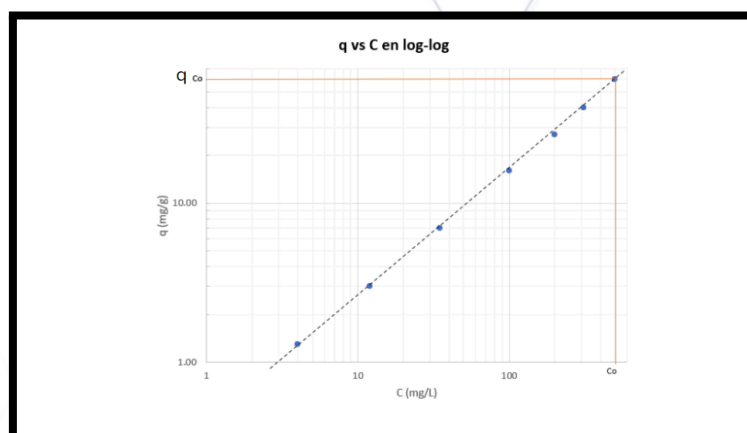
$$q = X/M = \frac{C_0 V - CV}{M}$$

M = masa de carbón (g)

Investigadores que han estudiado el fenómeno de adsorción, han encontrado que este se puede representar matemáticamente de una mejor manera si se expresan las variables involucradas en las isotermas de una manera particular. Uno de dichos investigadores es Freundlich, quien propuso las expresiones que se muestran en la imagen. X es la cantidad de compuestos adsorbidos en el carbón activado, en mg, y q es lo mismo que X , en términos de concentración en la superficie del carbón activado, en mg/g.

Matraz	M (g)	C (mg/l)	X (mg)	q = X/M (mg/g)
Control	0	500	-	-
1	0.5	310	19	38
2	1	200	30	15
3	2.0	100	40	8
4	5.0	35	46.5	9.3
5	10.0	12	48.8	4.88
6	20.0	4	49.6	2.48

Si calculamos el valor de X y el de q para cada matraz, se llena una tabla como la que muestra la imagen (con los resultados del ejemplo de la isoterma que mostramos en imágenes anteriores).



Si graficamos q vs. C en papel log-log, en muchos casos obtenemos una recta como la que se muestra en la imagen. En esta gráfica, el valor de q que corresponde a la concentración original del líquido a tratar con carbón activado granular, C_0 , expresa la máxima capacidad de adsorción que tendría dicho carbón (q_{c0}) si alcanzara la saturación.

Freundlich encontró que en la mayoría de los casos de adsorción en líquidos, obedece a la siguiente ecuación:

$$q = K_F C^n$$

K_F = constante de Freundlich.

n = exponente de Freundlich.

q = concentración del soluto en la superficie del adsorbente (mg/g).

C = concentración del soluto en el líquido (mg/l) después de la adsorción.

El que haya resultado una recta, se debe a que muchos casos de adsorción se comportan de acuerdo con la ecuación mostrada en la imagen, a la que se denomina "de Freundlich". Hay que recordar que q es la concentración del soluto en la superficie del adsorbente (mg/g) y C es la concentración del soluto en el líquido (mg/l); ambos, cuando se ha alcanzado el equilibrio. Podemos observar que la relación entre la concentración de los compuestos adsorbibles en el líquido y la concentración de los mismos en la superficie del carbón activado, es exponencial.

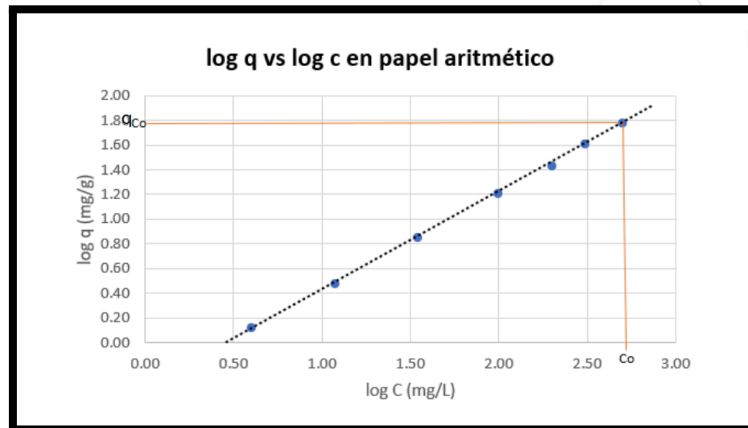
Cuando tenemos una ecuación exponencial como la anterior, se obtiene una recta si sacamos logaritmo de ambas partes de la igualdad:

$$\log q = \log K_F + n \log C$$

$$\underbrace{\log q}_{y} = \underbrace{n \log C}_{m x} + \underbrace{\log K_F}_{b}$$

log C (mg/L)	log q (mg/L)
2.70	1.78
2.49	1.60
2.30	1.43
2.00	1.20
1.54	0.85
1.08	0.48
0.60	0.11

Cuando tenemos una ecuación exponencial como la anterior, si sacamos logaritmo de ambas partes de la igualdad, obtenemos la ecuación de una recta. En nuestro caso, $\log q$ es una variable, y $\log C$ es la otra. Por su parte, $\log K_F$ y n son las constantes de la ecuación de la recta.



Si graficamos $\log q$ vs $\log C$ en una escala aritmética, obtenemos la recta que corresponde a la gráfica de q vs. C en la escala log-log de una de las imágenes anteriores. En esta última gráfica, también encontramos la máxima capacidad que tendría un carbón activado granular, q_{Co} , si alcanzara la saturación (lo que, como hemos visto, se lograría si conectamos en serie un número suficiente de columnas). No debemos olvidar que en muchos casos no se obtiene una línea recta. Hay muchas razones por las que no se obtiene dicha recta. La más típica es que la familia de compuestos adsorbibles esté formada por moléculas muy distintas, que difieren mucho en su comportamiento a lo largo del proceso de adsorción. En caso de no obtener una recta, hay que intentar trazar la curva que de manera suavizada (movimientos redondeados y no en forma de picos) se acerque a la mayoría de los puntos obtenidos. Con dicha curva, se puede leer el valor de q correspondiente a cada valor de C . Y, como se ha dicho, el valor de q correspondiente a Co (q_{Co}) es la capacidad que tendría el CA si se aplicara en forma granular y alcanzara la saturación.