

## CAPÍTULO 6

### EXPERIMENTOS DE SECADO

A continuación se describirá la metodología usada en este trabajo para realizar los experimentos de secado. También se mencionarán los resultados obtenidos en estos experimentos y se harán algunas observaciones con respecto a los mismos. Sin embargo, en el próximo capítulo se realizará un análisis más detallado tanto de los experimentos de secado como de fluidinámica.

Al igual que en los experimentos de fluidinámica, los experimentos de secado fueron realizados en la columna de fluidización construida por Patiño [5]. El vapor usado fue proporcionado por la sección de calderas de la Universidad.

Durante el proceso de secado es necesario mantener la velocidad del flujo de vapor, la temperatura en el lecho y la presión dentro de la columna constante. De esta forma los experimentos de secado pueden realizarse en condiciones estables.

#### **6.1 Condiciones Experimentales de las pruebas de secado.**

Con la finalidad de realizar una comparación entre varias condiciones y encontrar los parámetros más adecuados para hacer más eficiente el proceso de secado con vapor sobrecalentado, se desarrollaron primeramente nueve experimentos de secado al vacío. En estos primeros nueve experimentos se usaron tres presiones de vacío distintas con tres diferentes temperaturas para cada presión. Posteriormente se desarrollaron otros nueve experimentos en condiciones similares a los primeros pero con una velocidad del flujo del vapor distinta. De esta forma se estudiará también el efecto de la velocidad del flujo en el proceso de secado. Las partículas fueron humedecidas por 24 horas antes de cada experimento. Se humedeció aproximadamente 440 gramos de partículas secas en los experimentos de secado. Desgraciadamente la calidad del vapor que es recibido en planta

piloto para desarrollar los experimentos es muy baja. Constantemente es recibido agua en fase líquida junto con el vapor que es mandado desde la sección de calderas. Por esta razón se decidió mantener el calentador trabajando en todos los experimentos para que el agua en fase líquida sea evaporada por este. Por lo tanto, las tres temperaturas del vapor;  $T_{\text{vapor}}$ , usadas en estos experimentos fueron de aproximadamente 103°C, 110°C y 120°C. Esta temperatura fue monitoreada por el termómetro bimetalico ubicado en la parte superior del calentador. Sin embargo, fue difícil controlar las temperaturas al 100%, ya que el flujo de vapor que la sección de calderas enviaba no era siempre constante, pero sobre todo, la llegada de agua en fase líquida hizo variar constantemente la temperatura. Las tres presiones usadas en los experimentos fueron: 40kPa, 53kPa y 67kPa. (30cm de Hg., 20cm de Hg y 10cm de Hg respectivamente). La velocidad en la primera serie de experimentos trató de ser regulada en 3 m/s y la velocidad en la segunda serie en 3.8 m/s. con ayuda del manómetro de mercurio. Es recomendable tomar lectura tanto de las temperaturas del vapor, del lecho y de las alturas del manómetro de mercurio después de cada toma de muestra para llevar un mejor control de las condiciones de los experimentos.

## **6.2 Registro de datos de las pruebas de secado**

El registro de datos en estos experimentos consistió en tomar datos del equipo para calcular la velocidad de fluidización en el secado, el peso de las muestras húmedas y secas, y los tiempos en la toma de cada muestra.

Los datos que deben ser registrados directamente del equipo son primeramente las alturas del manómetro de mercurio. También es necesario registrar la temperatura del termómetro bimetalico que nos proporcionará la temperatura del vapor y la temperatura dentro de la columna. Para registrar las dos últimas temperaturas es necesario conectar los termopares conectados a la columna a una pantalla electrónica que nos mostrará las temperaturas que

los termopares registran. También es necesario registrar la presión que marca el manómetro de carátula ubicado a la derecha de la placa. Con estos datos será posible calcular la velocidad de fluidización en el lecho.

Para calcular la cantidad de humedad que el proceso es capaz de extraer es necesario medir la masa de las muestras después de que han sido extraídas de la columna y una vez que se encuentren totalmente secas. Para evitar que las muestras ganen o pierdan humedad es necesario colocarlas dentro de un desecador. Una vez que las muestras han sido pesadas recientemente extraídas de la columna, tendrán que ser colocadas en un horno a 60° C., durante un lapso de 24 horas con la finalidad de secar completamente cada muestra. Posteriormente a este lapso de tiempo las muestras deberán de ser nuevamente pesadas. Es necesario usar una balanza de alta precisión para medir los pesos de las muestras. Cabe mencionar que es necesario medir el peso de las charolas donde será colocado el producto muestra antes de iniciar los experimentos. Estas charolas deben estar completamente secas antes de cada experimento. Por lo tanto, es necesario colocarlas en el horno al menos 5 horas antes de iniciar el experimento. Es necesario introducir las pruebas dentro del desecador para transportarlas de un lugar a otro. Las tablas 6.2 y 6.3 nos muestran el formato usado para registrar los datos de la prueba de secado.





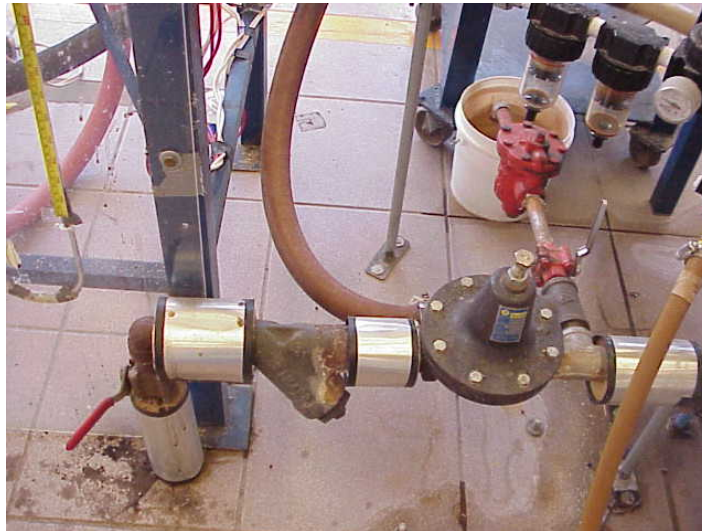
$dC/dt$  es la velocidad con la que se lleva a cabo el secado. Para la obtención de este valor se obtiene la relación de la diferencia de humedades relativas entre el lapso de tiempo en el cual se lleva a cabo el cambio de humedades. Finalmente, el porcentaje de pérdida de humedad se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\% \textit{ perdida} = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (6.3)$$

#### **6.4 Problemas con el sistema de secado e instalación de una sistema de purga continua.**

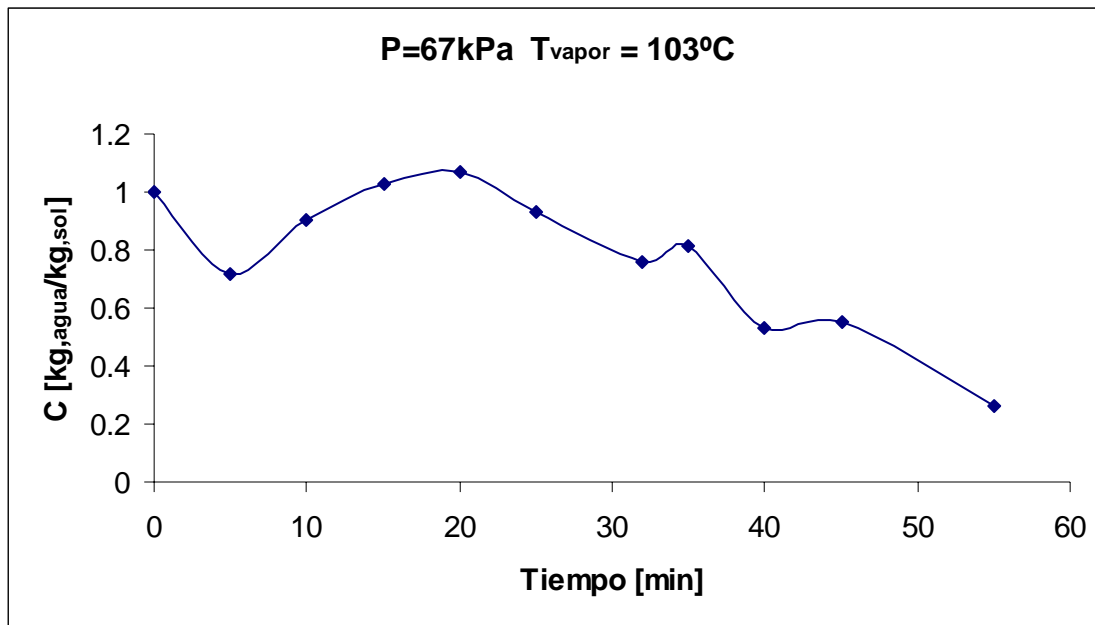
Desgraciadamente, las condiciones existentes en las instalaciones de la universidad no son las ideales. El problema principal que existe durante los experimentos de secado es el mal suministro de vapor. Mientras se realiza la experimentación con vapor sobrecalentado, existen muchas ocasiones en las cuales el vapor llega con enormes cantidades de agua en fase líquida en forma repentina. Este problema sucedió en muchas ocasiones cuando se llevaba a cabo algún experimento de secado.

Para tratar de resolver este problema, una trampa de vapor fue instalada antes de que el vapor llegara al calentador. Esta trampa proporciona un sistema de purga continua al equipo de secado. Con este sistema, se evita un poco la entrada de fase líquida al calentador y, por consiguiente, a la columna de fluidización. Sin embargo, cuando la cantidad de líquido que entra al sistema es muy grande, el sistema de purga es insuficiente, el calentador es incapaz de evaporar gran cantidad de agua y, por consiguiente, entra líquido a la columna de fluidización. La figura 6.1 muestra el sistema de purga continua colocada cerca de la válvula de entrada del vapor al sistema.



**Figura 6.1** Sistema de purga constante

Cuando se trabaja con temperaturas mayores a  $100^{\circ}\text{C}$  en el termómetro bimetálico, es posible detectar la entrada de agua al sistema fácilmente, ya que la temperatura desciende rápidamente a menos de  $100^{\circ}\text{C}$  la aguja del manómetro junto a la placa oscilará demasiado y pequeñas cantidades de vapor aparecen en la parte superior del calentador. Cuando se trabaja a temperaturas menores o iguales a  $100^{\circ}\text{C}$  en el termómetro bimetálico, es difícil detectar la entrada de agua al sistema. La entrada de agua en el sistema se reflejará en los resultados como lo muestra la figura 6.2.



**Figura 6.2** Ejemplo de experimento fallido debido a la entrada excesiva de agua al sistema. Puede observarse en la figura 6.2 como la entrada de agua repentinamente al sistema aumenta la humedad en la partícula dando como resultado una gráfica sin sentido.

Es muy recomendable establecer una constante comunicación con el personal de mantenimiento de calderas de la universidad para que la caldera como la línea de suministro sea constantemente inspeccionada y así detectar y arreglar las constantes fallas que aparecen. También es necesario realizar la primera purga al menos por media hora y usar la segunda purga al menos 20 minutos más. Esto es con la finalidad de eliminar toda la condensación que se encuentra en la línea de suministro del vapor.

Al realizar la primera purga debe cerrarse la válvula del sistema de purga constante. Al terminar esta purga, debe abrirse la válvula antes mencionada y mantenerse abierta durante todo el experimento.

Finalmente, es muy recomendable usar el intercambiador de calor descrito en el capítulo 2 durante todos los experimentos, ya que sin el es posible trabajar con la presión constante



hasta 35 minutos. Después de este lapso de tiempo la eficiencia de la bomba disminuye enormemente.

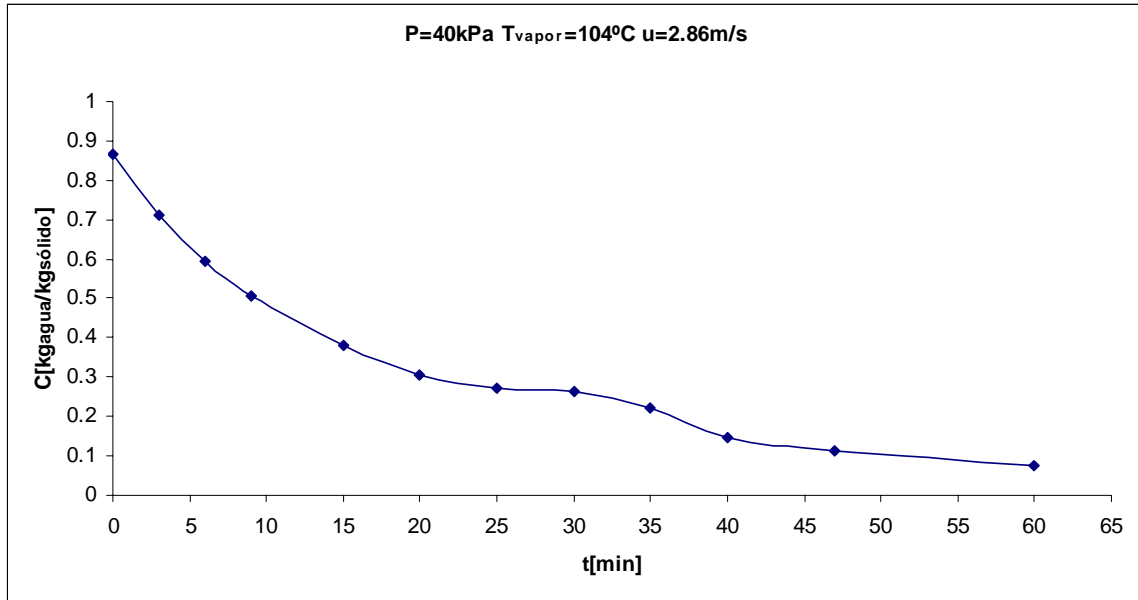
### 6.5 Gráfica de curvas de secado.

En las figuras 6.3 a 6.38 se presentan las curvas de secado representadas como contenido de humedad frente a tiempo y velocidad de remoción de la humedad frente a humedad en función de las variables estudiadas.

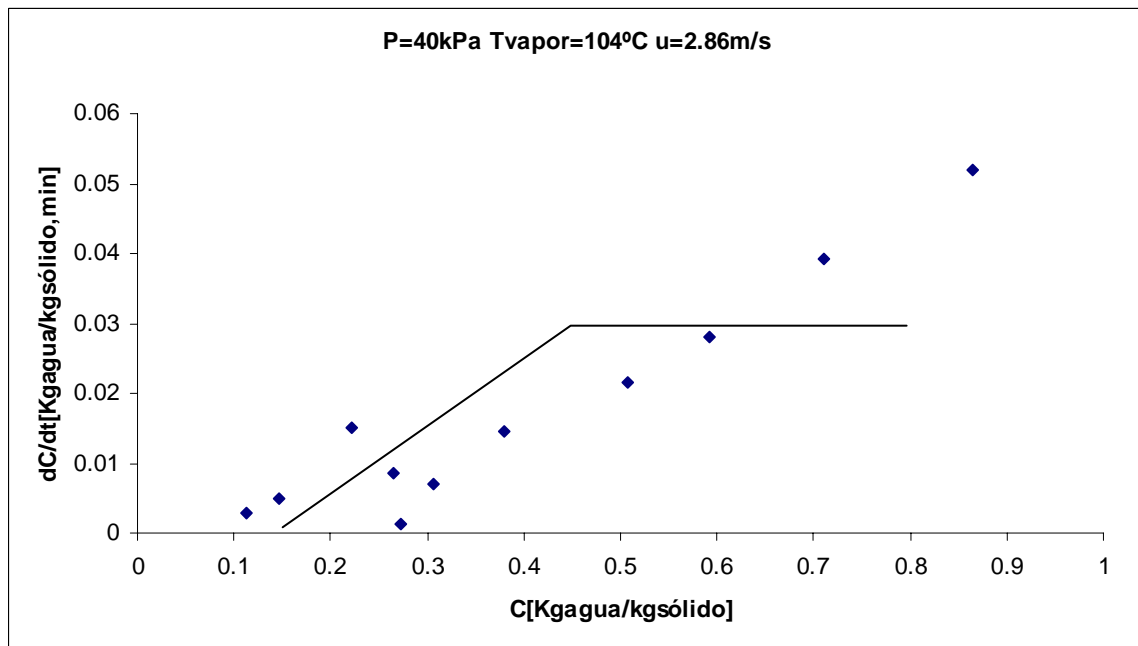
La relación existente entre las velocidades usadas en estos experimentos y las velocidades mínimas de fluidización son las mostradas en la siguiente tabla:

**Tabla 6.4** Comparación de velocidad usada en los experimentos con la velocidad mínima de fluidización calculada con ecuación 12

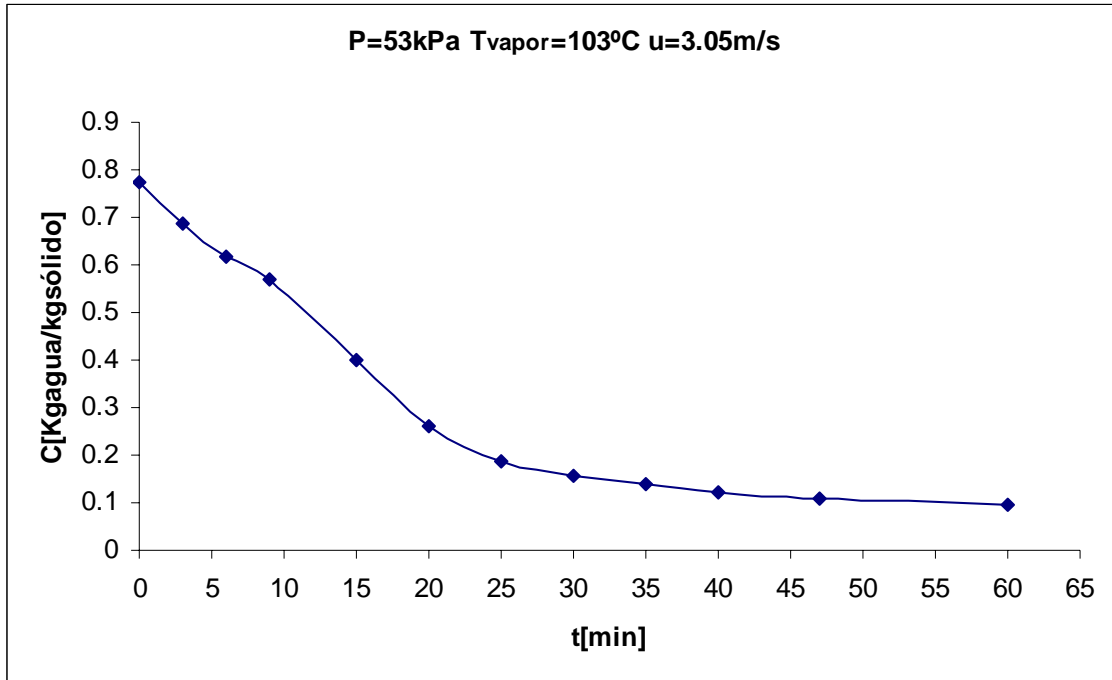
P [kPa]	T[°C]	$U_{mf}$ [m/s]	$U_{experimento}$ [m/s]	relación
40	103	2.442	2.86	1.171
40	110	2.460	3.17	1.289
40	120	2.484	3.02	1.216
53	103	2.141	3.05	1.425
53	110	2.157	2.93	1.358
53	120	2.180	2.98	1.367
67	103	1.916	2.98	1.555
67	110	1.931	2.8	1.450
67	120	1.952	3.04	1.557



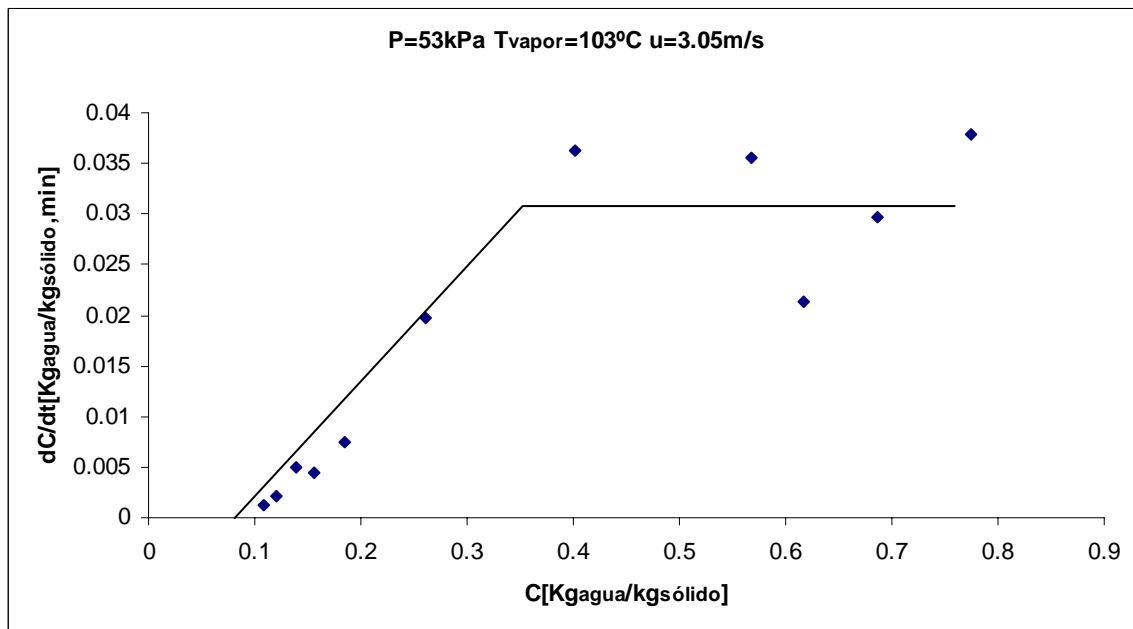
**Figura 6.3** Temperatura promedio en el lecho =  $83.1^{\circ}\text{C}$



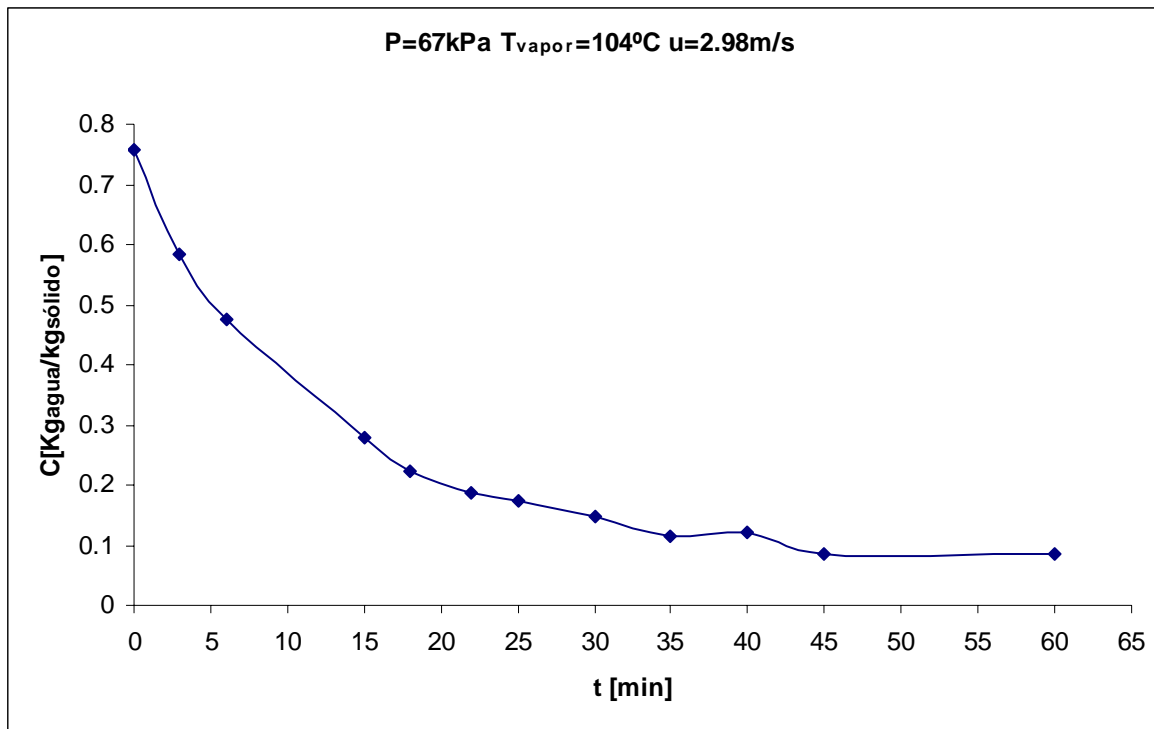
**Figura 6.4**



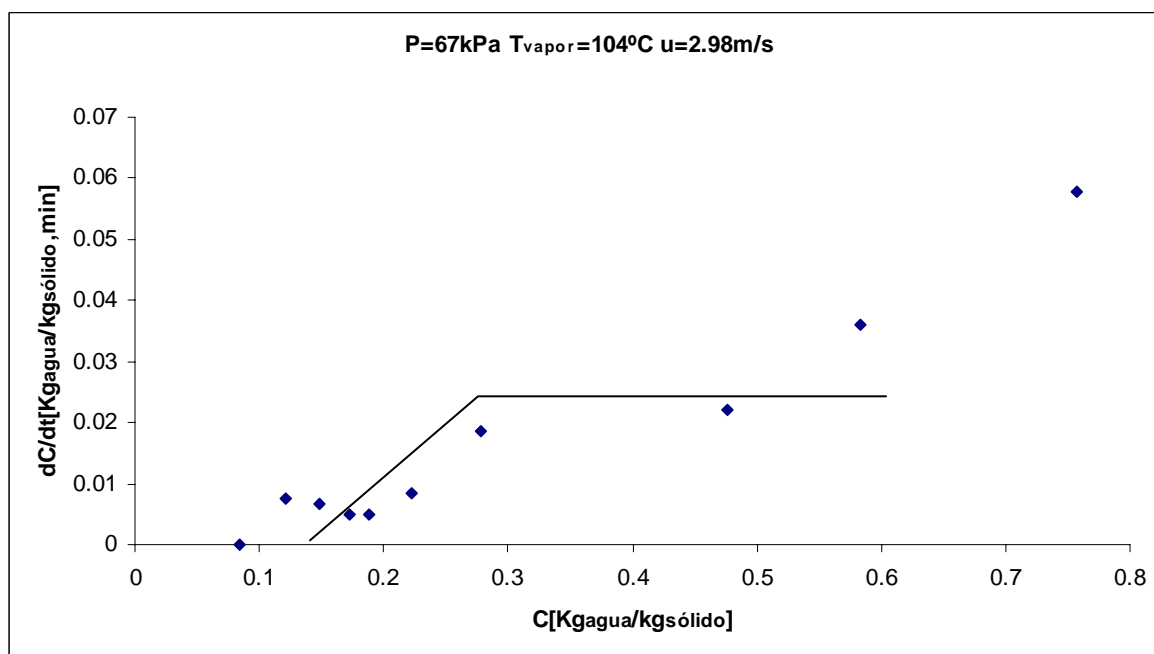
**Figura 6.5** Temperatura promedio en el lecho =  $90.1^{\circ}\text{C}$



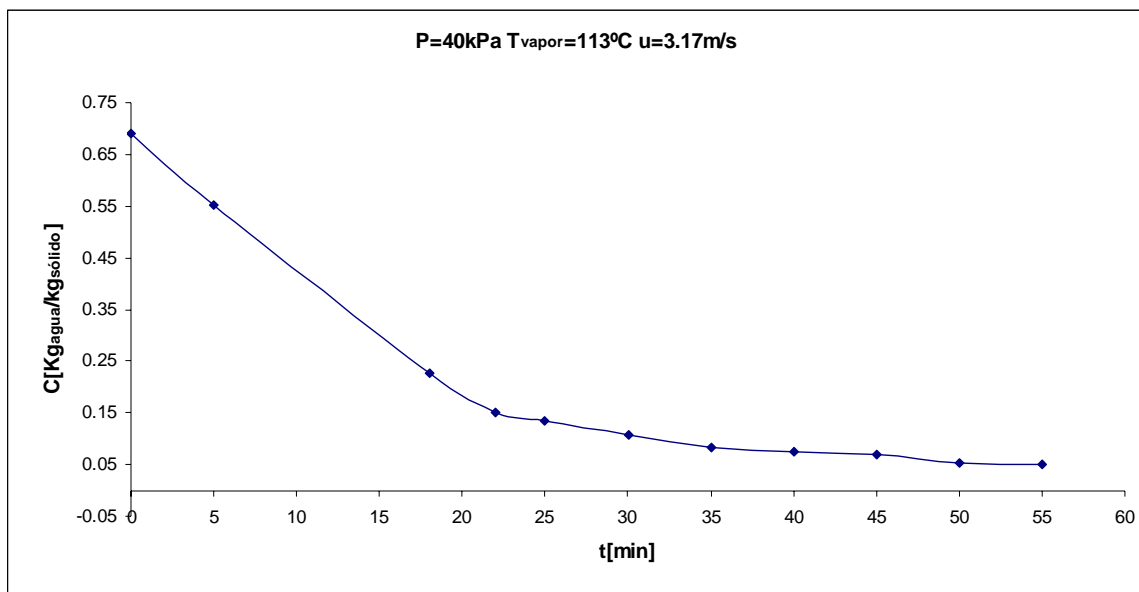
**Figura 6.6**



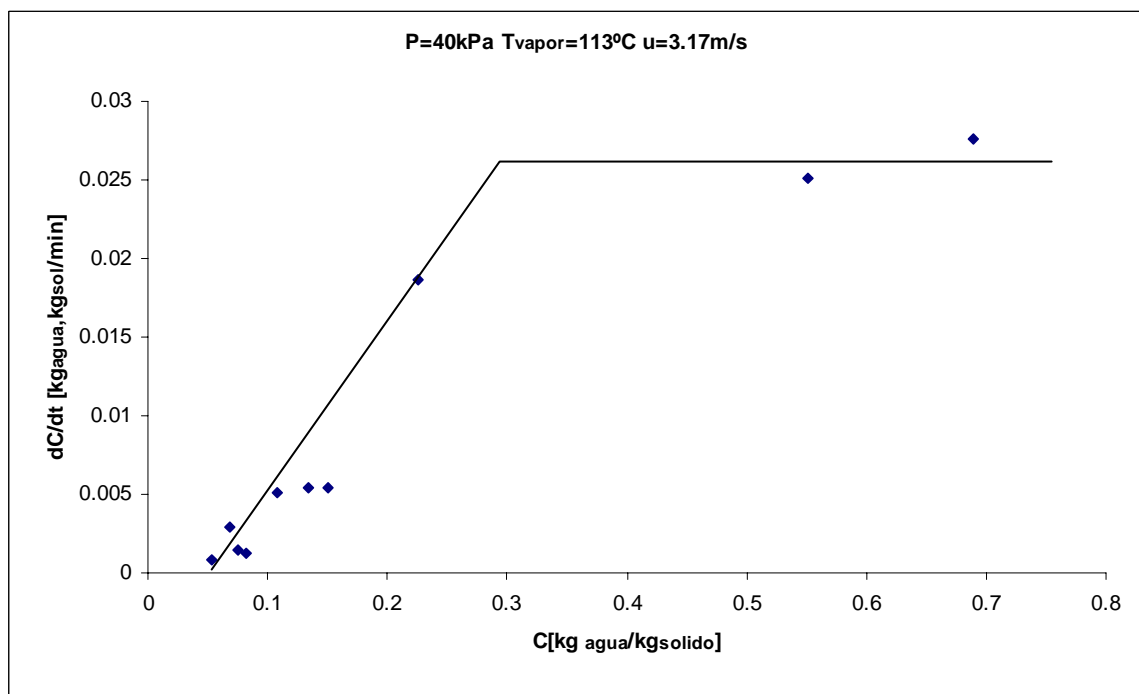
**Figura 6.7** Temperatura promedio en el lecho =  $95^\circ\text{C}$



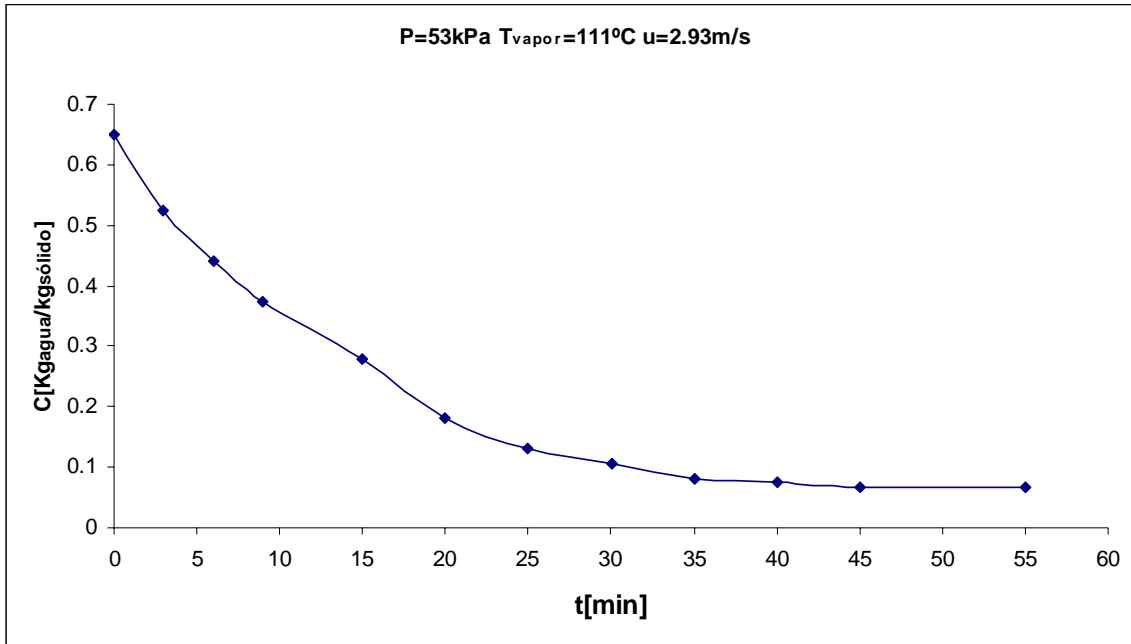
**Figura 6.8**



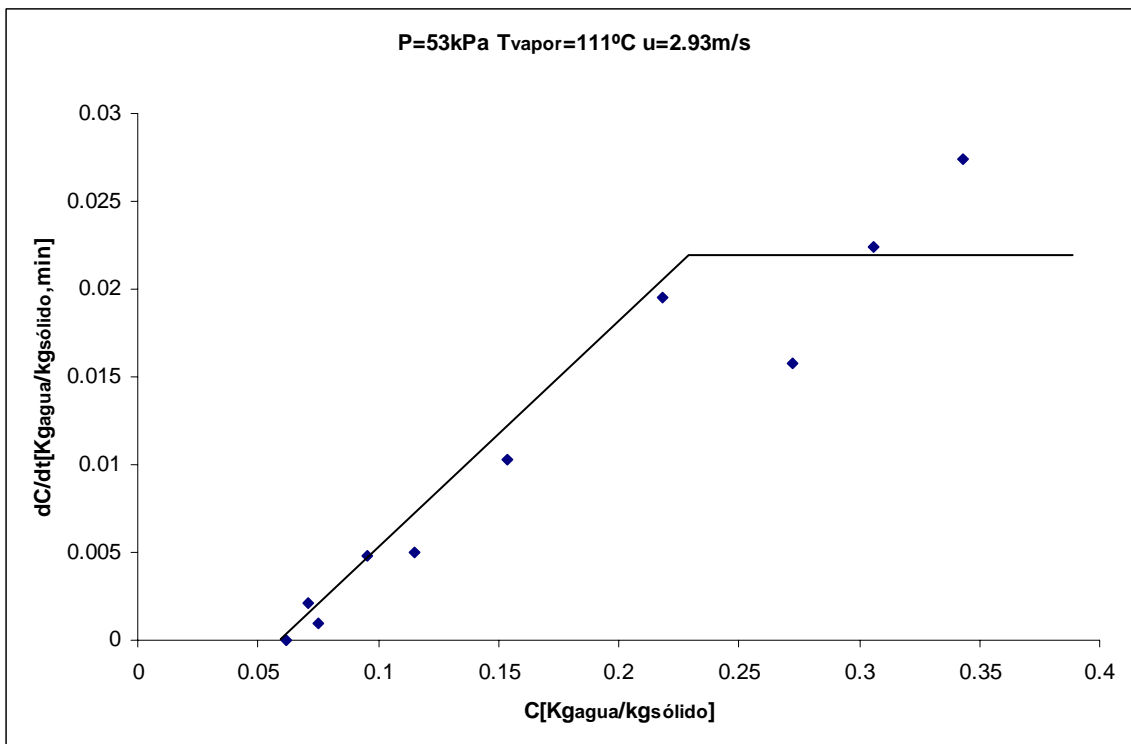
**Figura 6.9** Temperatura promedio en el lecho =  $99^{\circ}\text{C}$



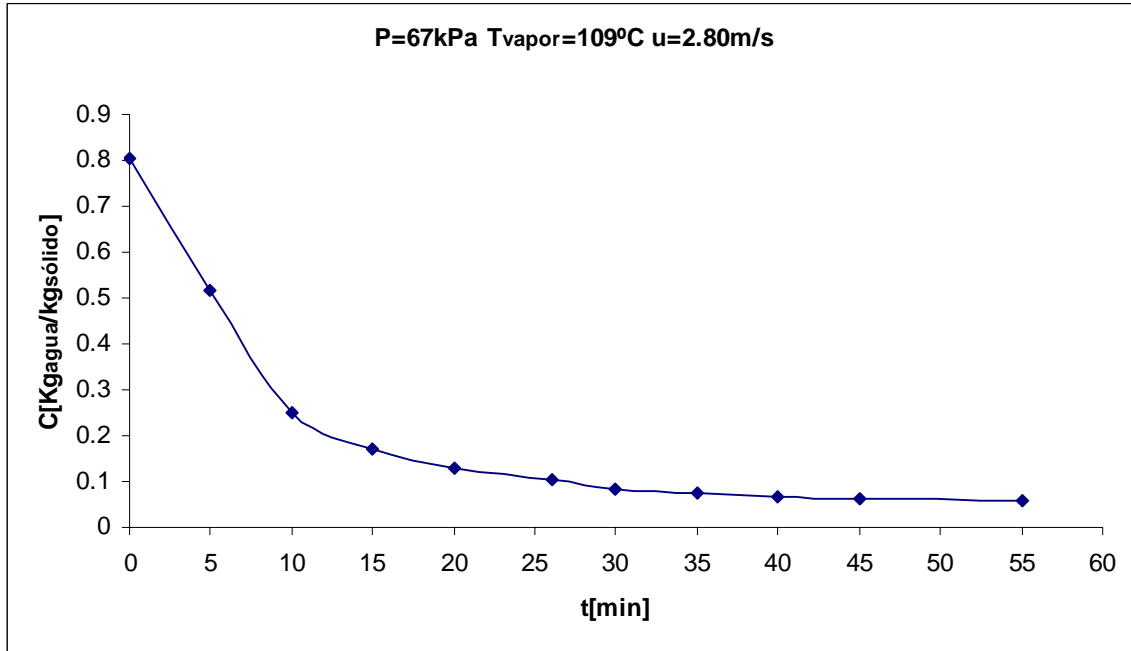
**Figura 6.10**



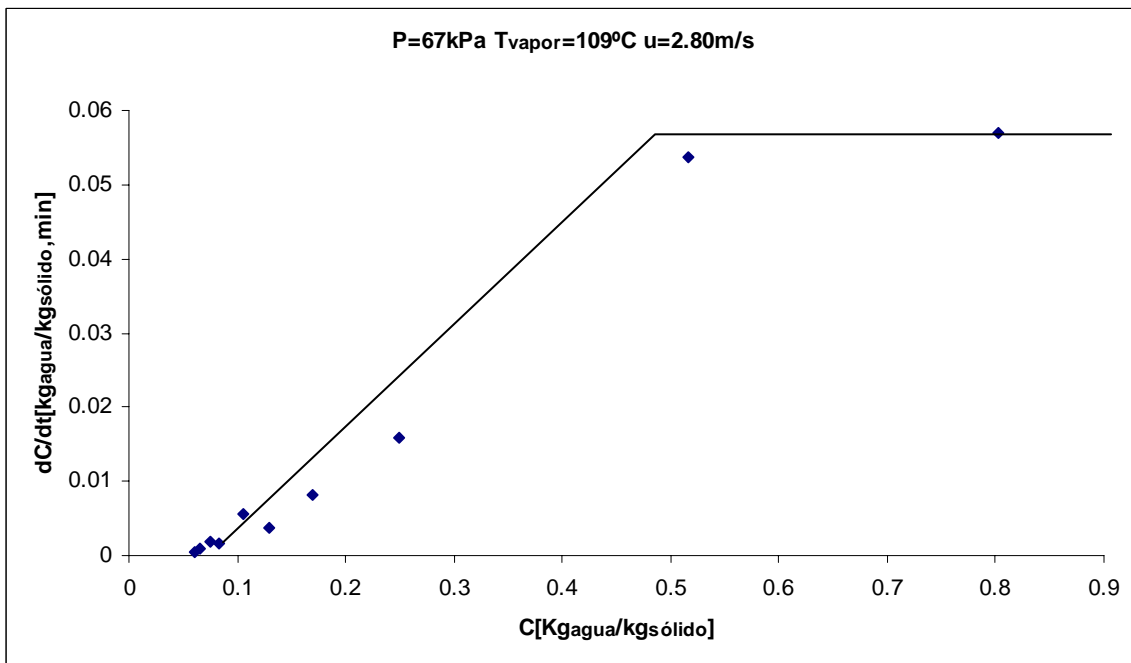
**Figura 6.11** Temperatura promedio en el lecho =  $95.4^\circ\text{C}$



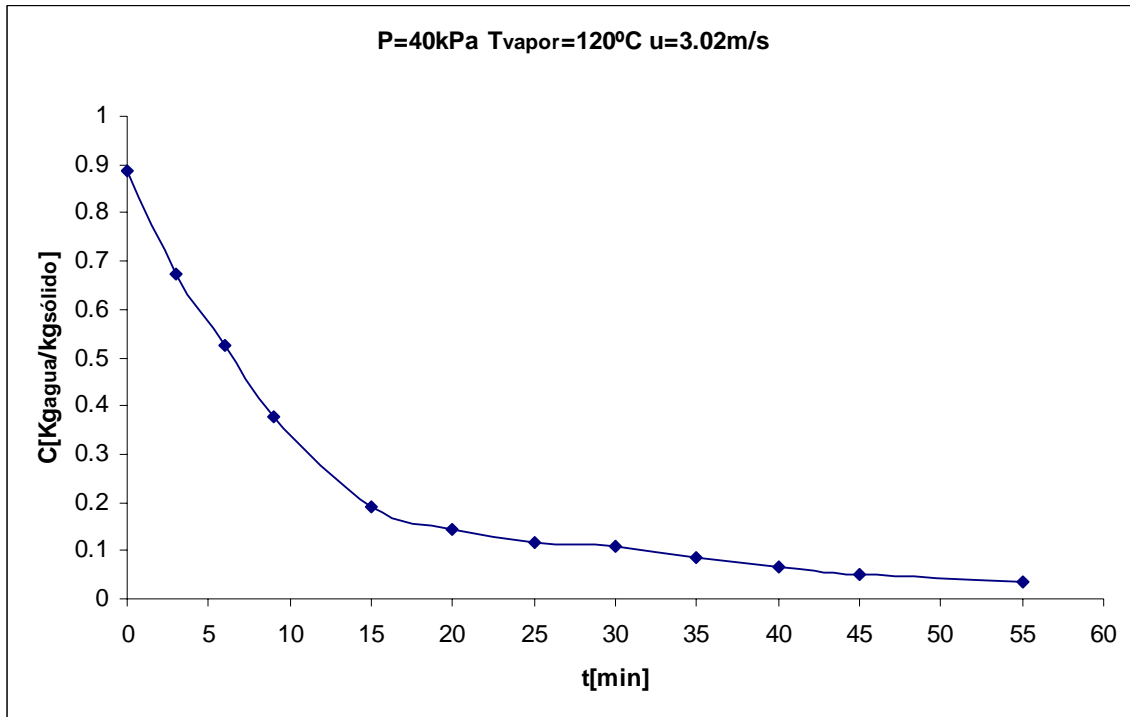
**Figura 6.12**



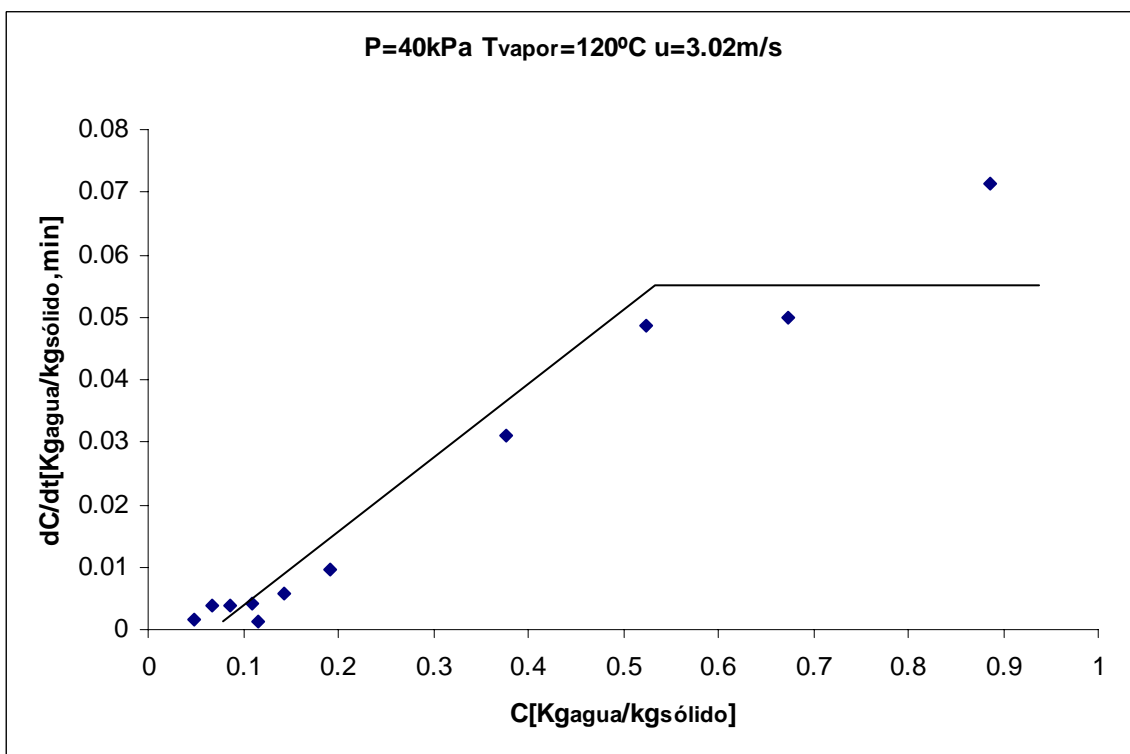
**Figura 6.13** Temperatura promedio en el lecho =  $105.6^\circ\text{C}$



**Figura 6.14**

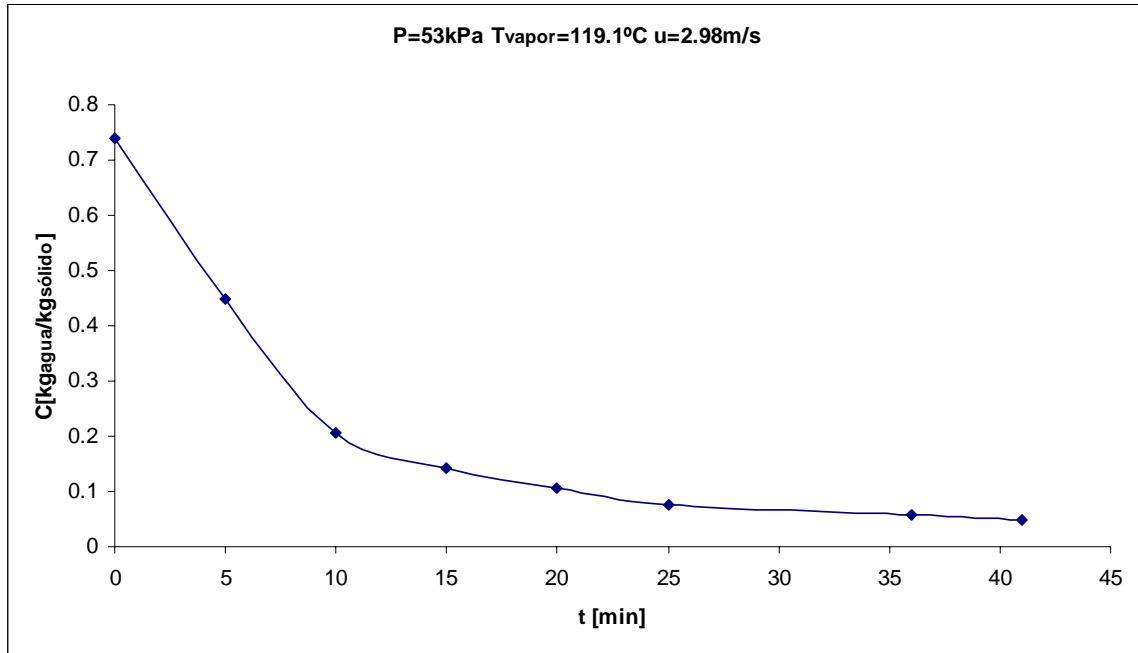


**Figura 6.15** Temperatura promedio en el lecho =  $110.5^\circ\text{C}$

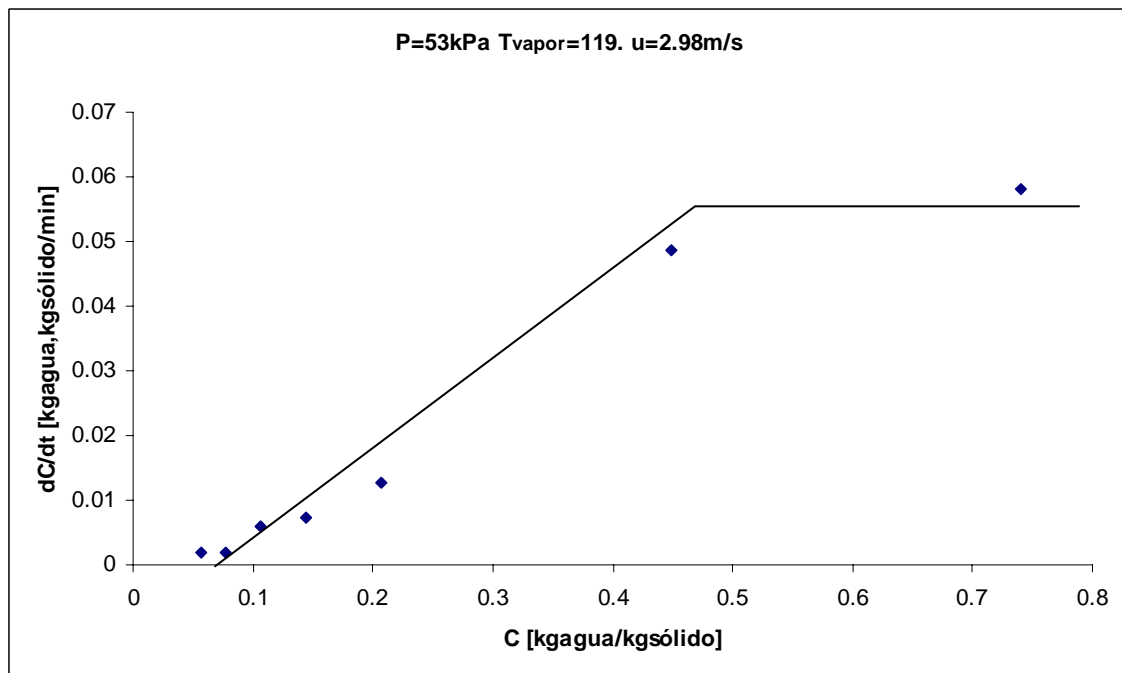


**Figura 6.16**

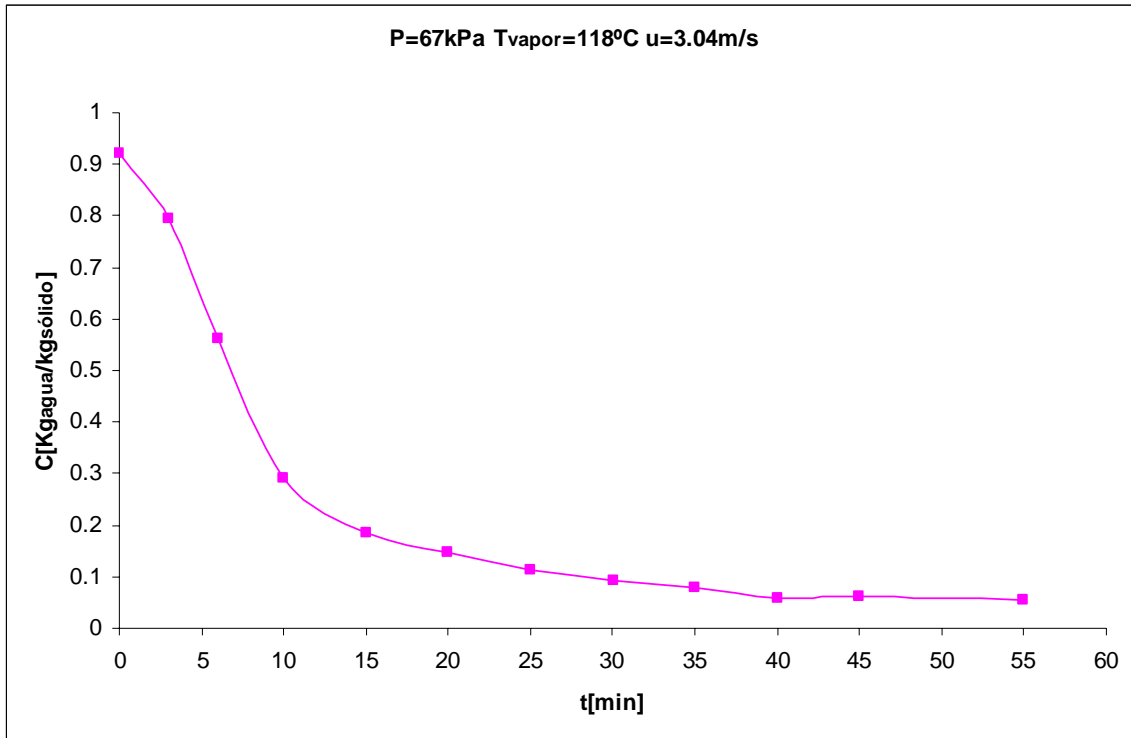




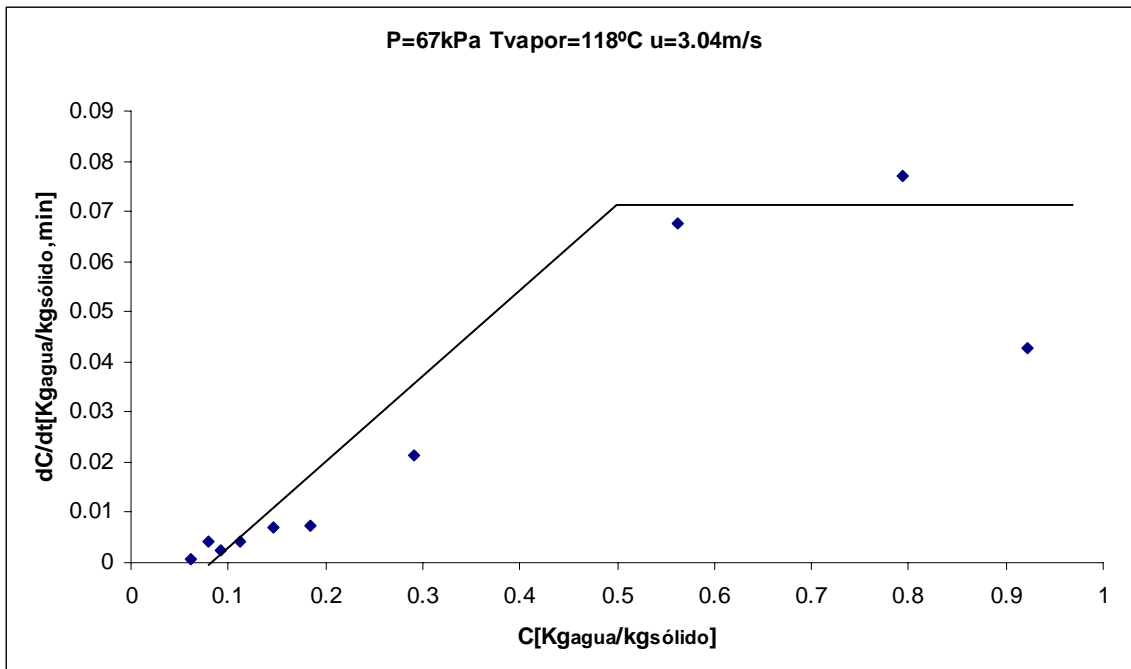
**Figura 6.17** Temperatura promedio en el lecho =  $109^{\circ}\text{C}$



**Figura 6.18**



**Figura 6.19** Temperatura promedio en el lecho =  $114.6^\circ\text{C}$



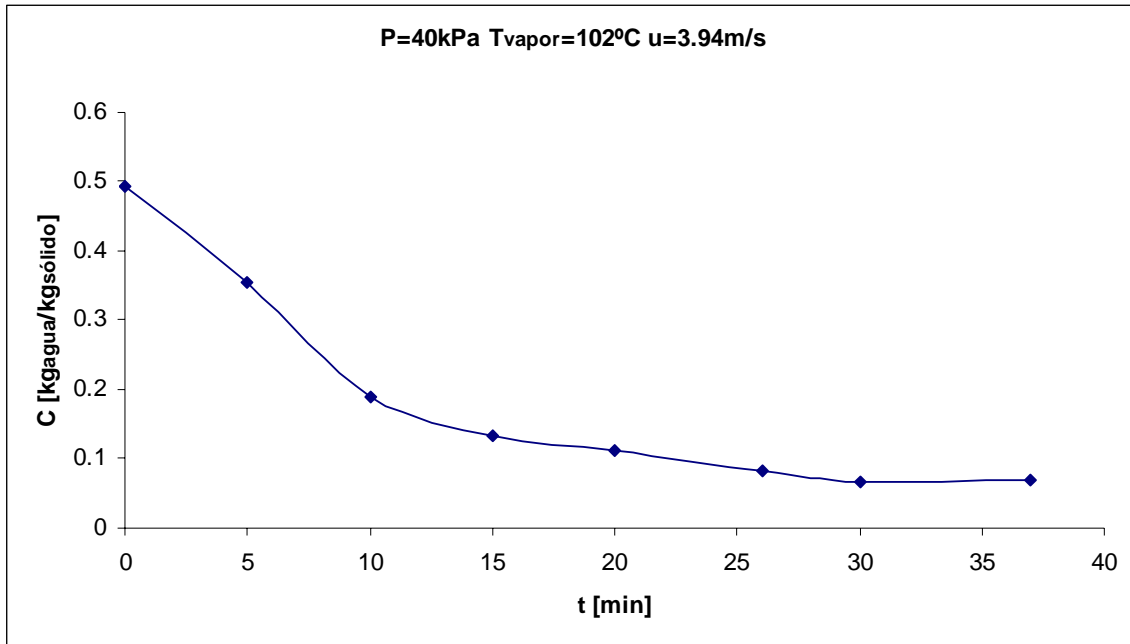
**Figura 6.20**

Los experimentos anteriores muestran las tendencias de secado a presiones y temperaturas distintas. A continuación se presentan otra serie de experimentos aproximadamente bajo las mismas condiciones de presión y temperatura pero a una velocidad de fluidización mayor. En el capítulo se desarrollará un análisis detallado de las curvas de secado bajo estas condiciones.

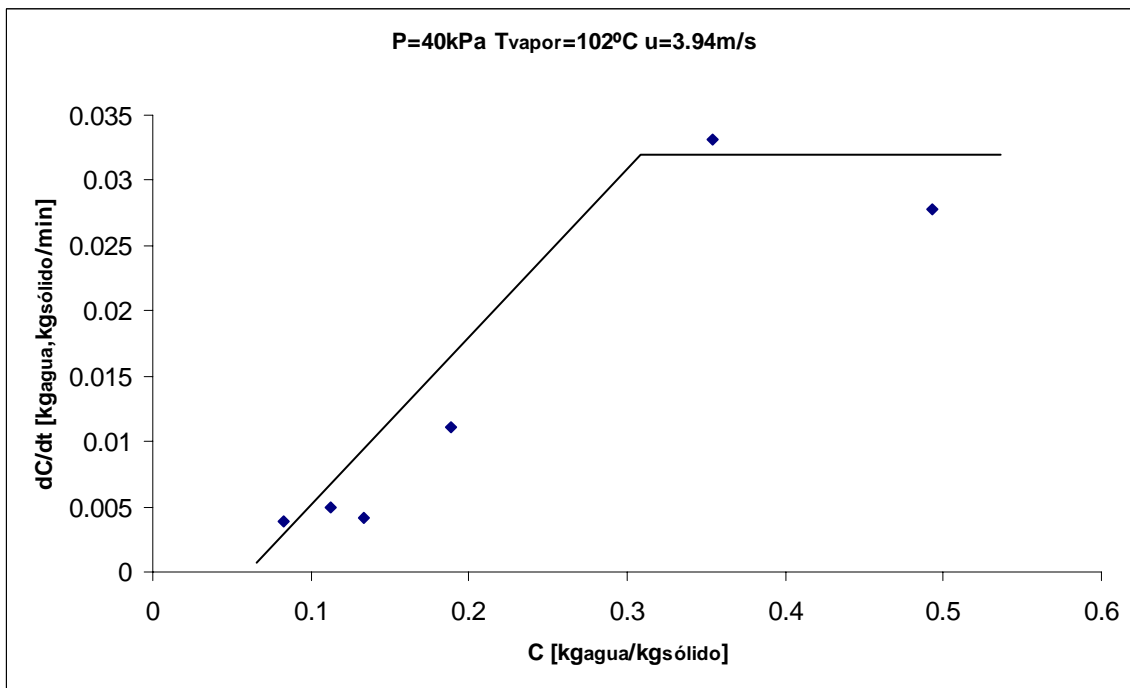
La relación existente entre las velocidades usadas en estos experimentos y las velocidades mínimas de fluidización son las mostradas en la siguiente tabla:

**Tabla 6.5** La velocidad mínima de fluidización teórica fue calculada con la ecuación 12

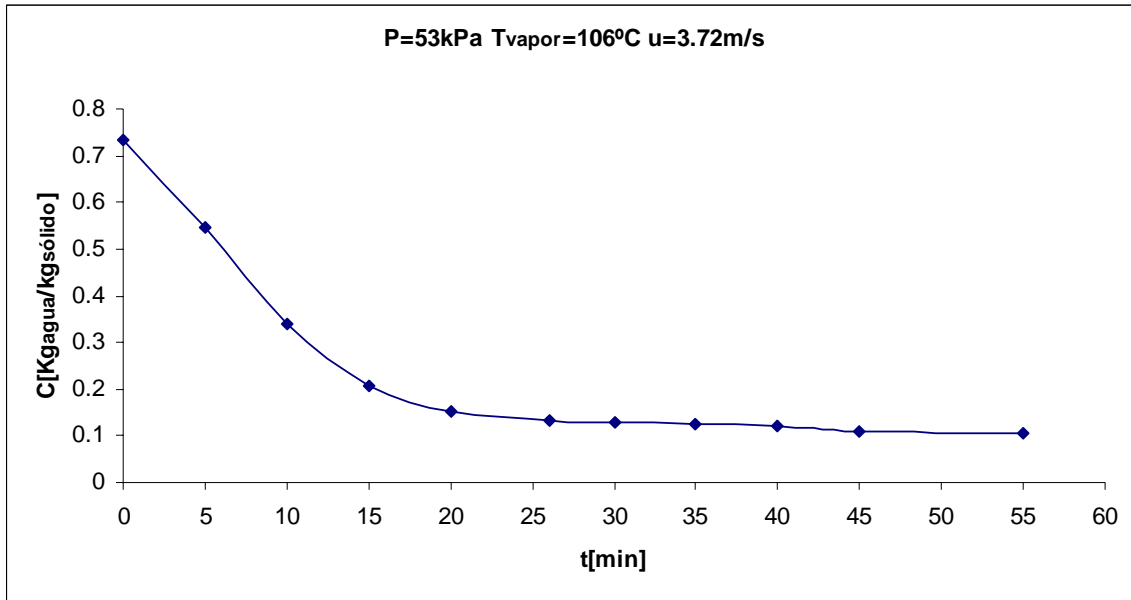
P [kPa]	T[°C]	U mf	Uexperimento	relación
40	103	2.442	3.94	1.613
40	110	2.460	4.25	1.728
40	120	2.484	3.85	1.550
53	103	2.141	3.72	1.737
53	110	2.157	3.8	1.762
53	120	2.180	4.14	1.899
67	103	1.916	3.6	1.879
67	110	1.931	3.48	1.802
67	120	1.952	3.48	1.783



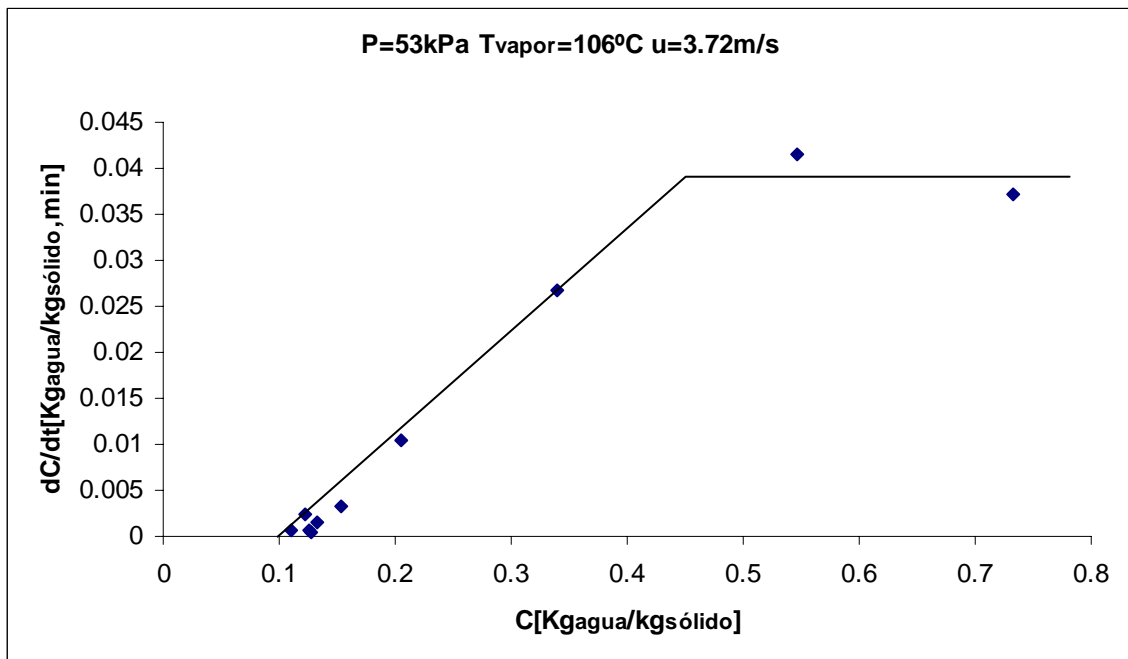
**Figura 6.21** Temperatura promedio en el lecho =  $91^\circ\text{C}$



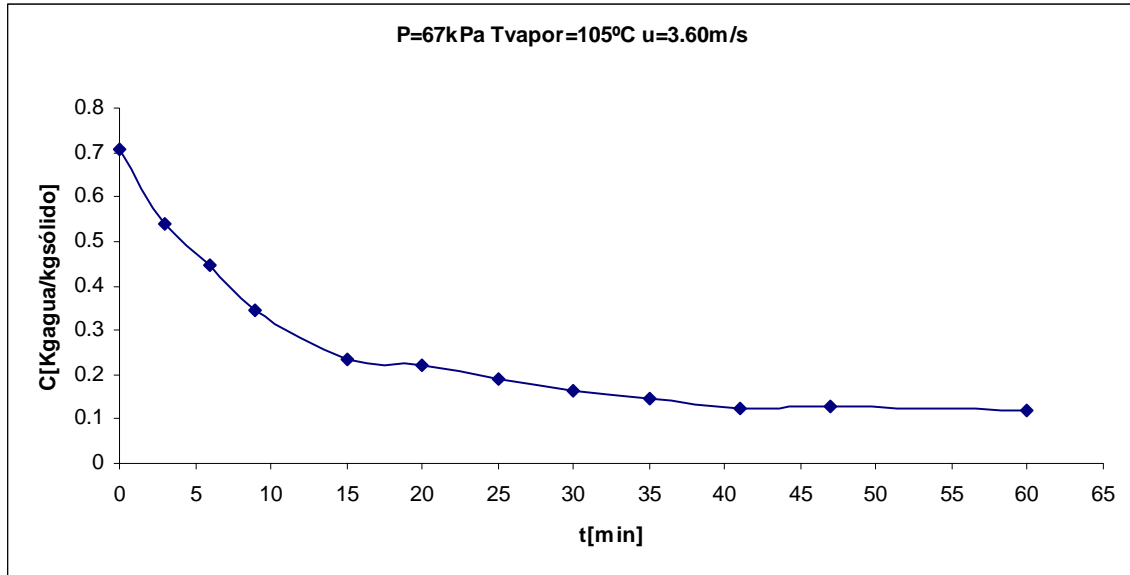
**Figura 6.22**



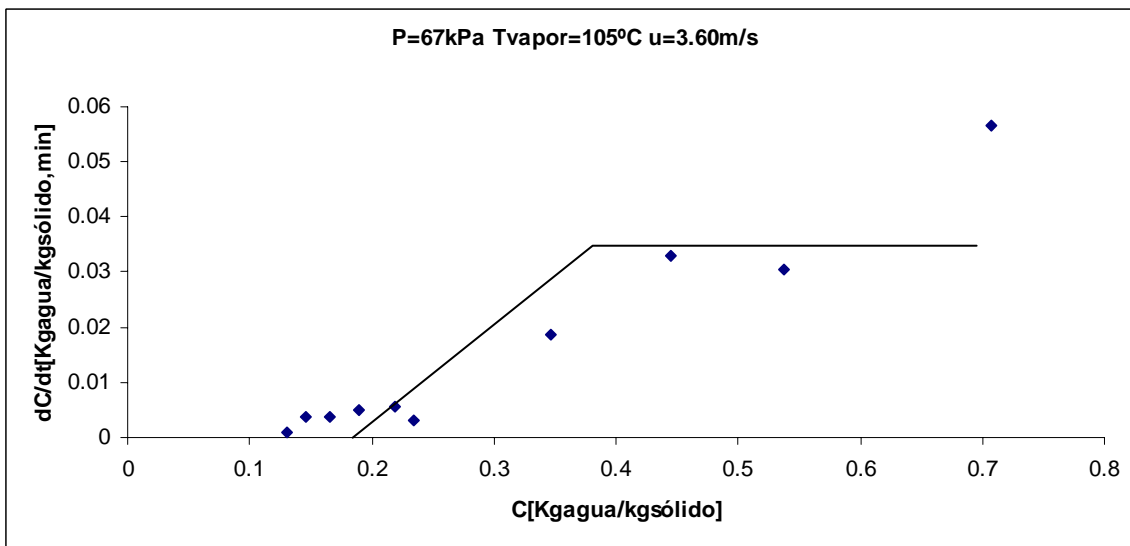
**Figura 6.23** Temperatura promedio en el lecho =  $94.7^\circ\text{C}$



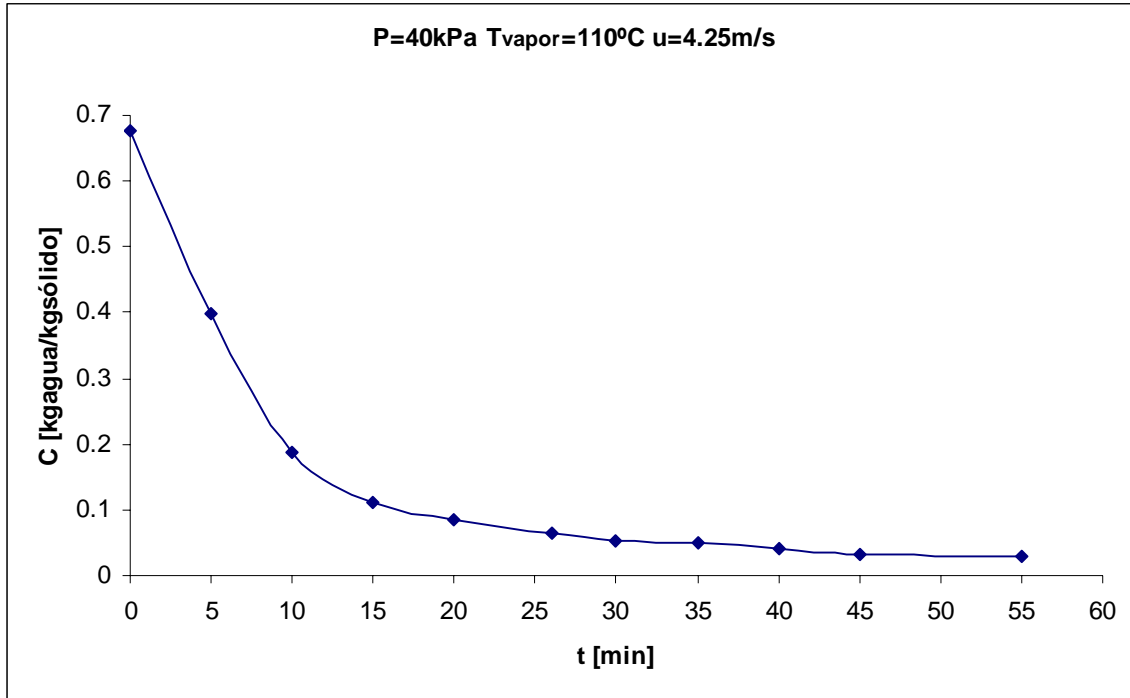
**Figura 6.24**



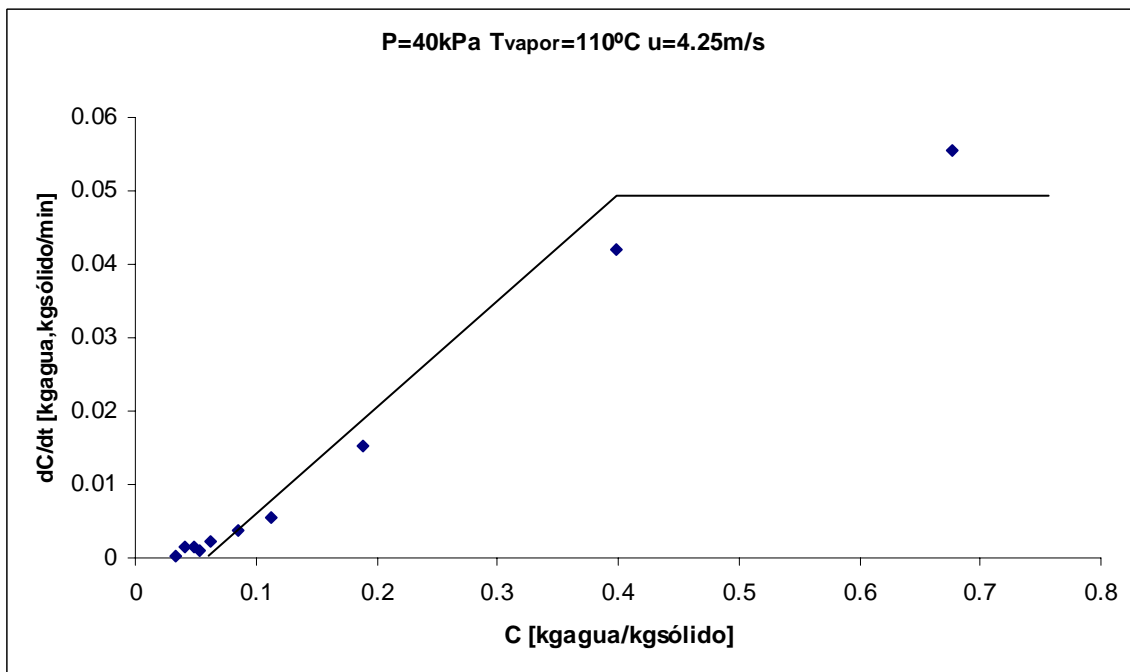
**Figura 6.25** Temperatura promedio en el lecho =  $96.1^\circ\text{C}$



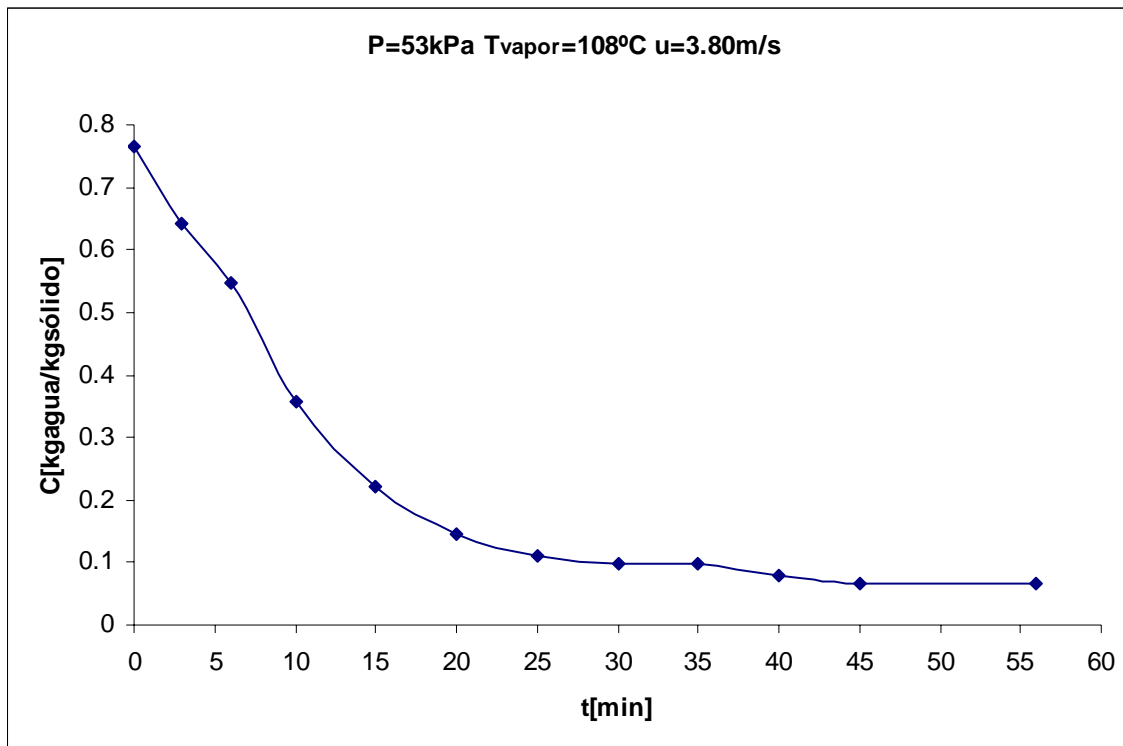
**Figura 6.26**



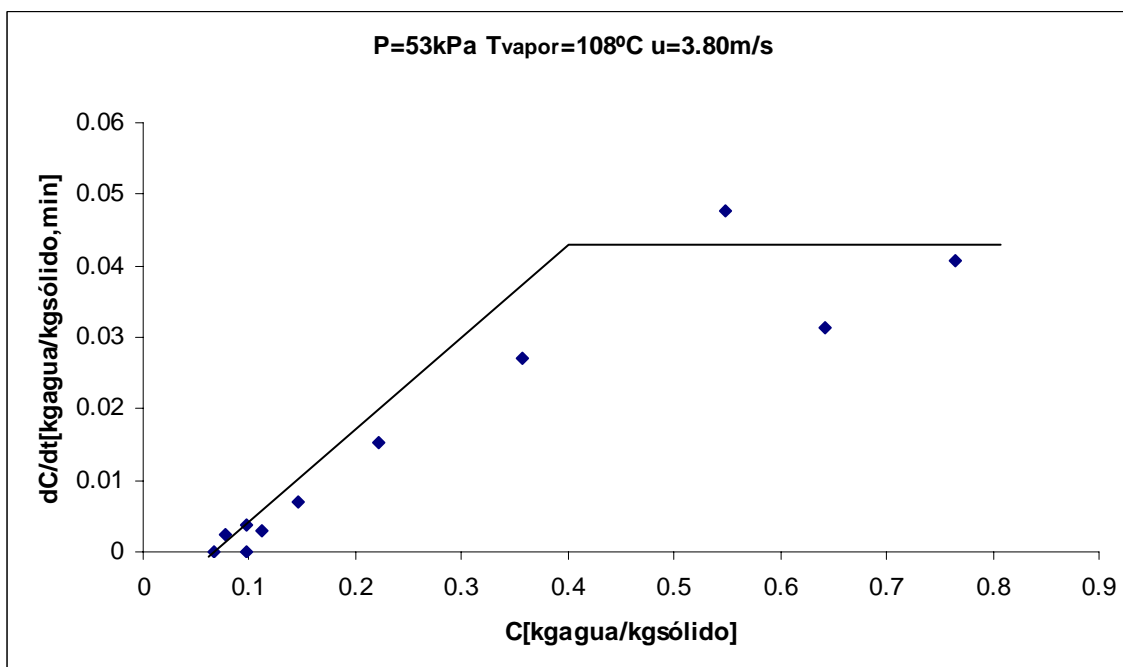
**Figura 6.27** Temperatura promedio en el lecho =  $95.2^\circ\text{C}$



**Figura 6.28**

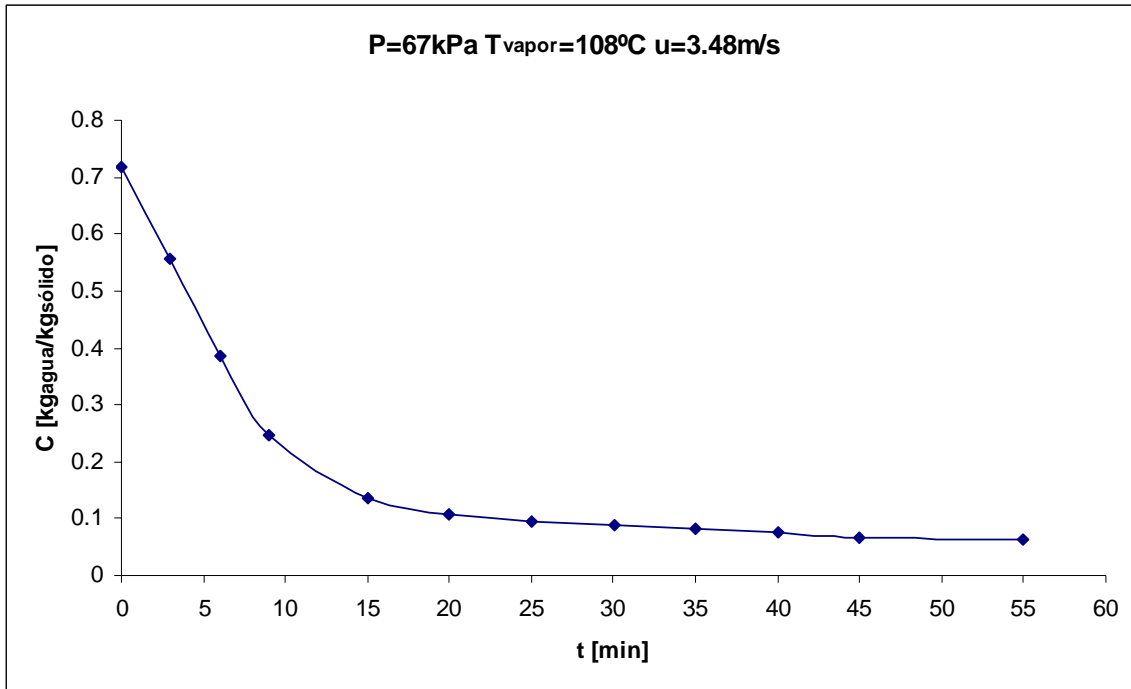


**Figura 6.29** Temperatura promedio en el lecho =  $98.6^{\circ}\text{C}$

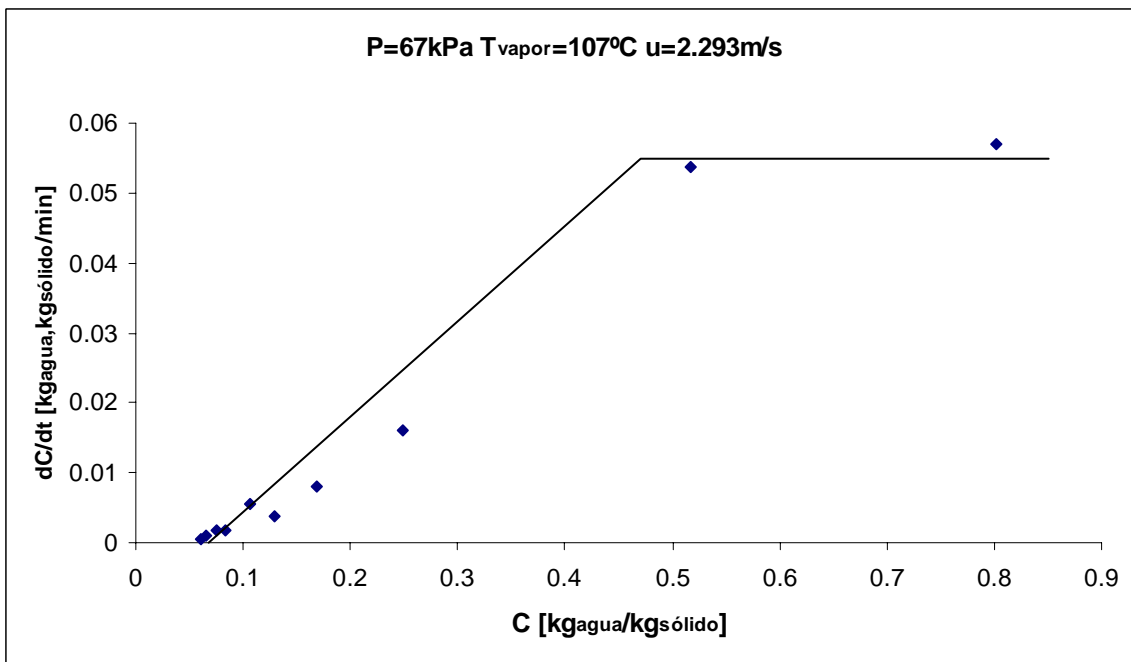


**Figura 6.30**

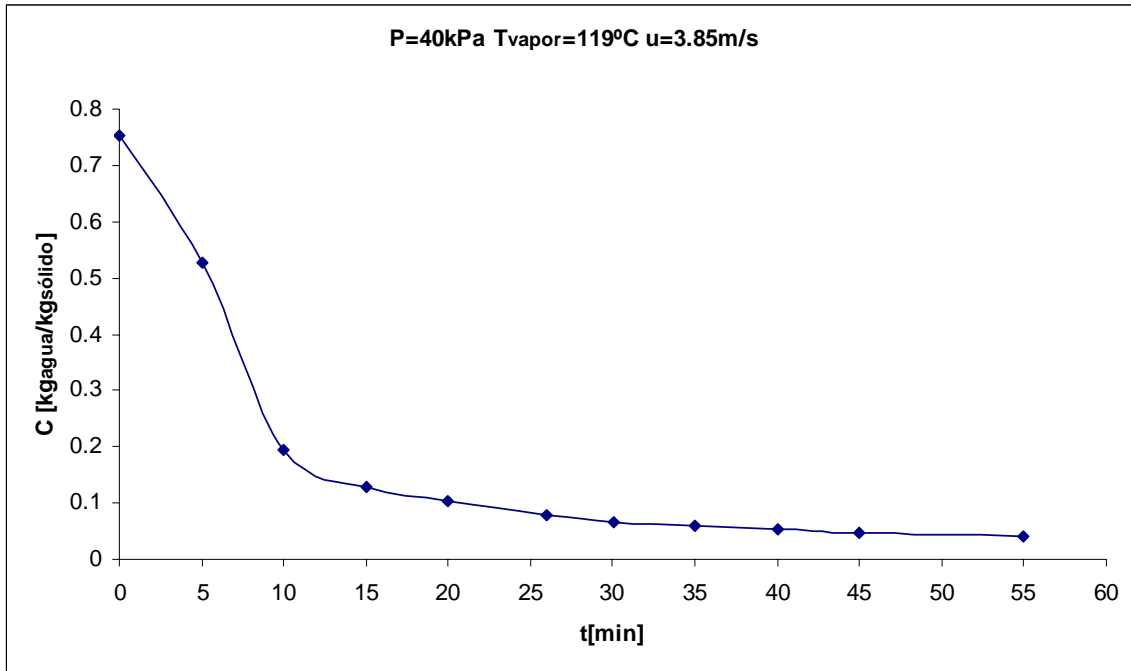




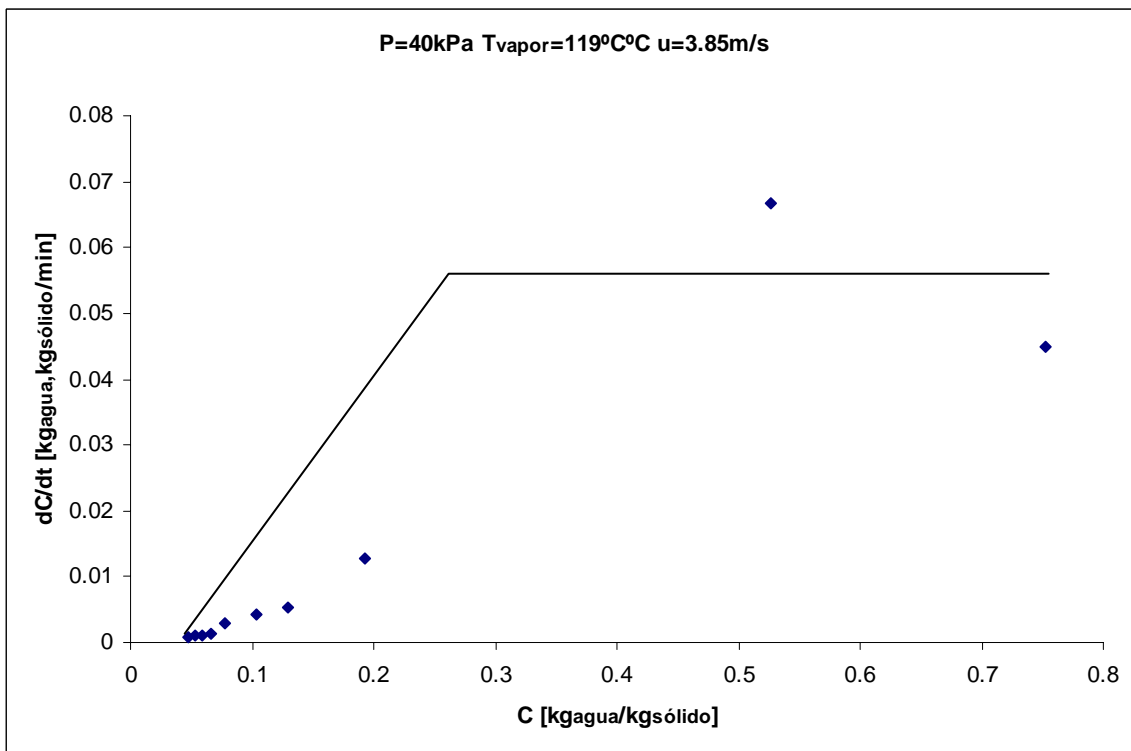
**Figura 6.31** Temperatura promedio en el lecho =  $102.7^{\circ}\text{C}$



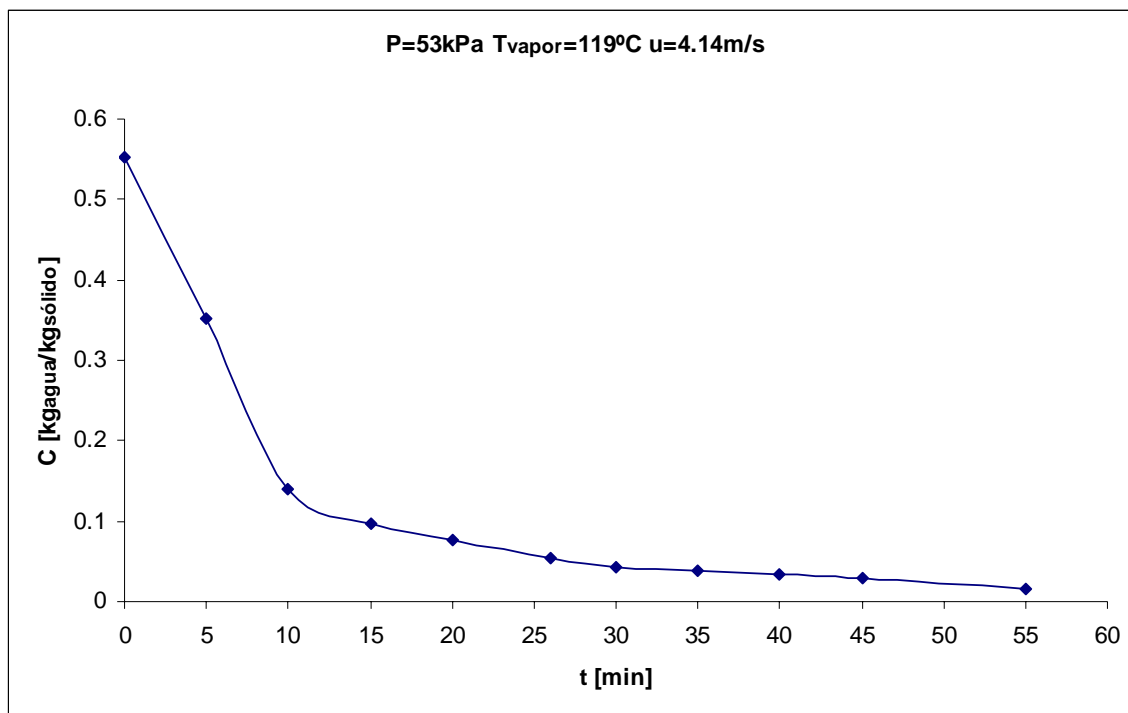
**Figura 6.32**



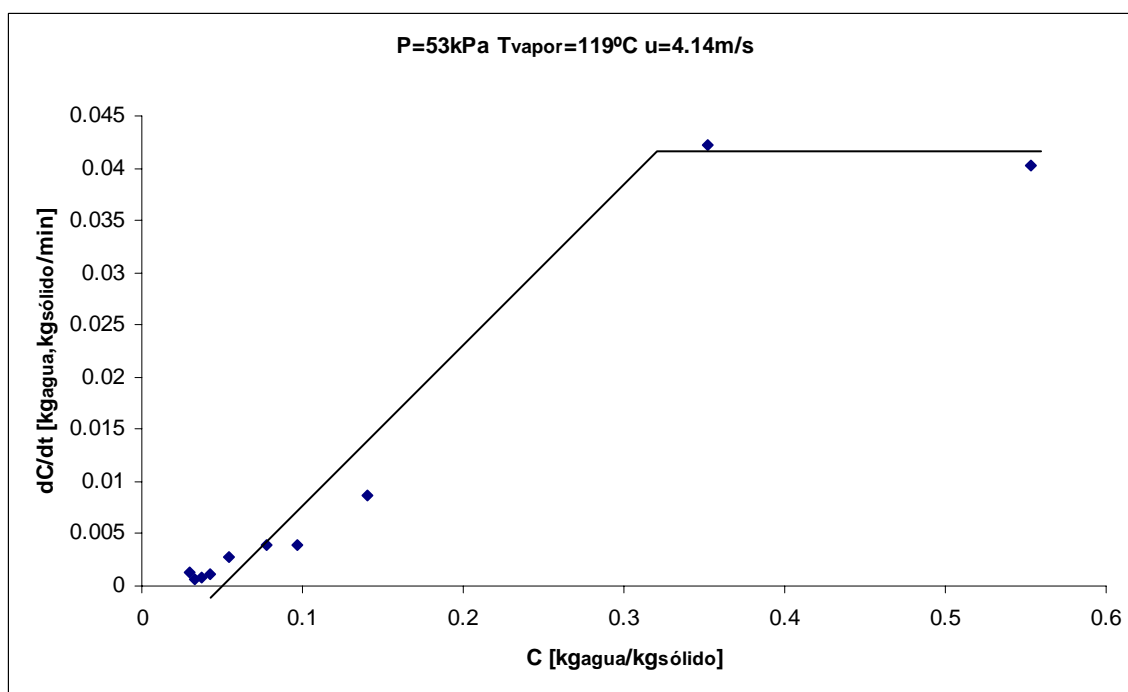
**Figura 6.33** Temperatura promedio en el lecho = 108.6°C



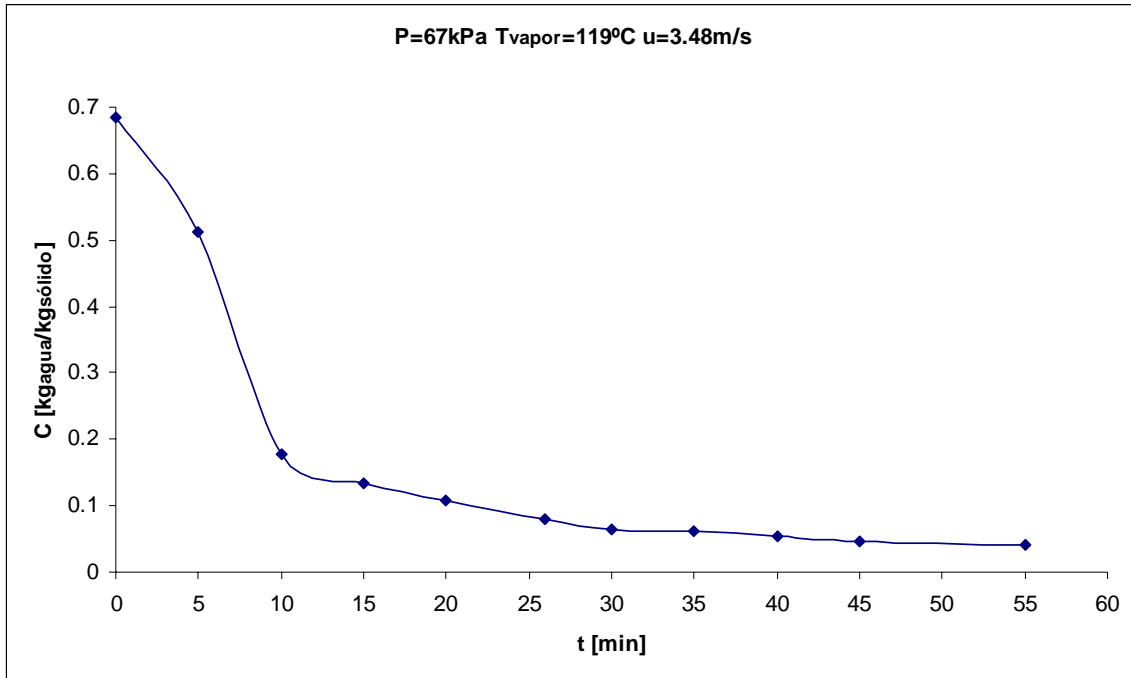
**Figura 6.34**



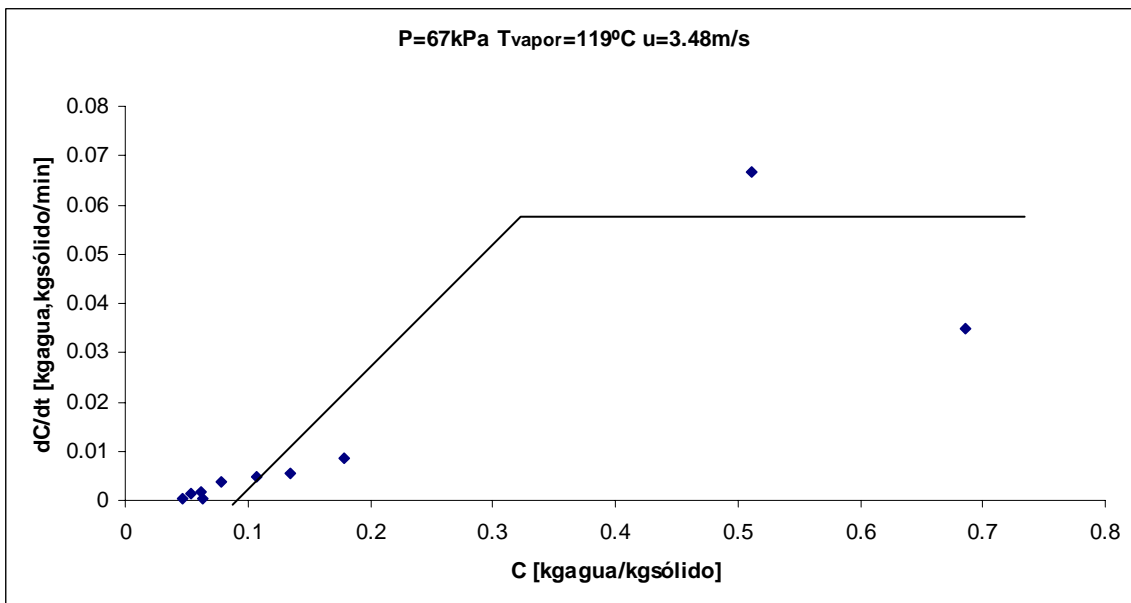
**Figura 6.35** Temperatura promedio en el lecho = 111.7°C



**Figura 6.36**



**Figura 6.37** Temperatura promedio en el lecho =  $115.6^{\circ}\text{C}$



**Figura 6.38**