

**MEDICIÓN Y MODELADO EMPÍRICO DEL CAUDAL A TRAVÉS DE
CAPILARES DE UN DISPOSITIVO DILUTOR EN FUNCIÓN DE PRESIÓN Y
TEMPERATURA**

LUCERO CHAVARRO DUARTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**MEDICIÓN Y MODELADO EMPÍRICO DEL CAUDAL A TRAVÉS DE
CAPILARES DE UN DISPOSITIVO DILUTOR EN FUNCIÓN DE PRESIÓN Y
TEMPERATURA**

LUCERO CHAVARRO DUARTE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Director

CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ

Ph.D en Ingeniería Química

Codirectora

ELIZABETH AYALA BLANCO

Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

*Por su infinito amor y esfuerzo
a mi madre, mi padre y mis hermanos.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y a los docentes de la escuela de Ingeniería Química por la educación brindada durante éste proceso de formación como ingeniera.

Al profesor Carlos García por permitirme hacer parte del Grupo de Investigación en Fluidos y Energías (GIFE), y por su orientación y colaboración durante el desarrollo del proyecto.

A Elizabeth Ayala por su dedicación, disposición y todo el conocimiento compartido para llevar a cabo éste proyecto, igualmente por sus enseñanzas y amistad. Al Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) por permitirme hacer parte de su equipo y brindarme esta experiencia para mi crecimiento profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. ANTECEDENTES.....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 DISPOSITIVO GENERADOR DE TRAZAS (TGD 2000).....	17
2.2 MODELADO EMPÍRICO.....	17
2.3 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	19
4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	20
4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS PRELIMINAR.....	21
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO PRELIMINAR.....	22
4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	23
4.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	24
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	26
5.1 RESULTADOS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	26
5.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DATOS EXPERIMENTALES.....	27
5.3 MODELAMIENTO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN Y LA TEMPERATURA.....	28
5.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
6. CONCLUSIONES.....	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos experimentales diseño preliminar	21
Tabla 2. Resumen diseño de experimentos preliminar	23
Tabla 3. Análisis de varianza diseño de experimentos preliminar.....	23
Tabla 4. ANOVA Capilar 50 μm	27
Tabla 5. ANOVA capilar 75 μm	28
Tabla 6. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 50 μm	29
Tabla 7. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 75 μm	29
Tabla 8. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 50 μm	31
Tabla 9. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 75 μm	31
Tabla 10. Significancia de los modelos para el capilar de 50 μm	31
Tabla 11. Significancia de los modelos para el capilar de 75 μm	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de metodología.....	20
Figura 2. Comparación del caudal en función de la caída de presión.....	22
Figura 3. Montaje experimental.....	25
Figura 4. Sistema de capilares.....	25
Figura 5. Valores promedio del caudal en función de ΔP y temperatura en el capilar 50 μm	26
Figura 6. Valores promedios del caudal en función de ΔP y temperatura en el capilar 75 μm	27

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: TABLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	42
ANEXO B: CÓDIGOS R	47
ANEXO C: ESTADÍSTICAS DE LAS REGRESIONES	49
ANEXO D: GRÁFICAS RESIDUALES DE LO MODELOS	61
ANEXO E: GRÁFICAS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DE LOS MODELOS	80

RESUMEN

TÍTULO: MEDICIÓN Y MODELADO EMPÍRICO DEL CAUDAL A TRAVÉS DE CAPILARES DE UN DISPOSITIVO DILUTOR EN FUNCIÓN DE PRESIÓN Y TEMPERATURA*

AUTOR: LUCERO CHAVARRO DUARTE**

PALABRAS CLAVES: Dilutor, capilares, caída de presión, temperatura, modelado empírico.

DESCRIPCIÓN: Los fluidos a escala microscópica se han estudiado durante varias décadas debido a que el comportamiento difiere cuando se cambia de la escala macroscópica a la microscópica. El CDT de Gas ha desarrollado un dispositivo generador de trazas (TGD 2000) para crear mezclas de gases de calibración (MGC) a partir de la dilución de un material de referencia gaseoso certificado (MRGC) en un gas matriz. El dilutor cuenta con un sistema de capilares que fueron objeto de estudio para conocer el comportamiento del caudal a través de éstos. Los modelos analíticos más comunes para el caudal a través de un capilar están basados en múltiples suposiciones, de modo que para predecir con menor error el caudal se propuso la creación de un modelo empírico específico para los capilares del dilutor. Se utilizó un diseño de experimentos factorial con dos factores (caída de presión y temperatura) para evaluar el efecto de los posibles factores, y con los datos obtenidos se propusieron diferentes modelos de regresión lineal múltiple para predecir el caudal. Finalmente se seleccionó el modelo más adecuado para cada capilar con base en los resultados de los análisis de varianza, los coeficientes de determinación y los residuales de cada una de las regresiones. Con este modelo obtenido, el dilutor puede ser usado a diferentes condiciones de caída de presión y temperatura, y así obtener una MGC que permita realizar la calibración de detectores.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D

ABSTRACT

TITLE: MEASUREMENT AND EMPIRICAL MODELING OF THE FLOW THROUGH THE CAPILLARIES OF A DILUTOR DEVICE IN FUNCTION OF PRESSURE AND TEMPERATURE*

AUTHOR: LUCERO CHAVARRO DUARTE**

KEYWORDS: Dilutor, capillaries, pressure drop, temperature, empirical modeling.

DESCRIPTION: Fluids on a microscopic scale have been studied for several decades because the behavior differs when changing from the macroscopic to the microscopic scale. The CDT de Gas has developed a trace generator device (TGD 2000) to create calibration gas mixtures (CGM) from the dilution of a certified gaseous reference material (CGRM) in a matrix gas. The dilutor has a system of capillaries that were studied to know the flow behavior through them. The most common analytical models for the flow through a capillary are based on multiple assumptions, so that to predict with less error the flow was proposed to create a specific empirical model for the capillaries of the dilutor. A factorial experiment design with two factors (pressure drop and temperature) was used to evaluate the effect of the possible factors, and with the obtained data, different models of multiple linear regression were proposed to predict the flow rate. Finally, the most appropriate model for each capillary was selected based on the results of variance analysis, the coefficients of determination and the residuals of each one of the regressions. With this model obtained, the dilutor can be used at different conditions of pressure drop and temperature, and thus obtain a CGM that allows the calibration of detectors.

* Bachelor Thesis

** Physicochemical Engineering Faculty, Chemical Engineering. Director: Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D

INTRODUCCIÓN

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) ha desarrollado un equipo para la generación de mezclas de gases de calibración (MGC) llamado Dispositivo Generador de Trazas (TGD 2000). Éste dispositivo emplea un método dinámico para la preparación de la MGC utilizando un material de referencia gaseoso certificado (MRGC) que contiene el analito de interés en una concentración reportada, y un gas matriz de dilución que puede ser aire o nitrógeno. Una MGC es una mezcla de gas cuya composición está suficientemente bien definida y estable para utilizarse como un patrón de trabajo de concentración [1], por lo cual es importante obtener una incertidumbre muy baja en la concentración al momento de generarla para poder ser usada en la calibración de detectores. El TGD 2000 tiene de un sistema de capilares por los cuales atraviesa el MRGC y el gas matriz para poder formar una MGC. El comportamiento de los gases a través de los capilares es el aspecto a evaluar durante el desarrollo de éste proyecto, para poder modelar el caudal en función de la temperatura y caída de presión y así obtener la concentración final de la MGC bajo diferentes circunstancias ambientales, ya que actualmente el TGD 2000 solo es usado en el laboratorio.

El comportamiento de los fluidos en fase gaseosa a escala microscópica difiere significativamente con respecto a la macroscópica, ya que a medida que disminuye la escala se deben tener en cuenta los efectos de no-equilibrio tales como la rarefacción, las interacciones gas-superficie, entre otros; además de los efectos de presión y temperatura que afectan un gas a escala macroscópica [2]. Actualmente se conocen ecuaciones propuestas mediante normas como la ISO 6145-5:2009 para poder calibrar dispositivos por medio de dilución dinámica [3] [4], que dependen de las características del capilar y el fluido como: la presión, viscosidad, diámetro, entre otros. Al ser gases los que atraviesan el capilar y debido a la escala, se debe evaluar los efectos de temperatura pues las ecuaciones ya propuestas no la tienen

en cuenta, por lo cual no se tiene certeza de obtener una baja incertidumbre sobre resultados si se usan dichas ecuaciones para modelar el caudal a través de los capilares, además de que el comportamiento puede variar y la ecuación no ser útil para todos los casos [5]. Al calcular el caudal con las ecuaciones ya propuestas se podría incurrir en un error significativo, generando que las MGC obtenidas en el TGD 2000 no sirvan como patrón de referencia para realizar la calibración de los detectores, cuando se requieren cambiar las condiciones de operación del dispositivo, y es por esta razón que se quiere modelar el caudal en función de la presión y temperatura, para así poder usar el TGD a diferentes condiciones.

Es necesario modelar empíricamente el caudal de los microfluidos través de los capilares para poder conocer mejor el comportamiento a través de éstos y así obtener un bajo error con respecto a la concentración final, la cual depende del caudal y es un parámetro clave para la calibración de los analizadores. De igual forma, el modelado se hace empíricamente debido a la practicidad que tiene el hacer análisis de los datos y a su vez, porque el modelo que se obtendrá incluiría todo el recorrido que realiza el gas a través del dilutor.

1. ANTECEDENTES

Los fluidos se han estudiado durante muchos siglos y actualmente se sigue haciendo, pero con los avances tecnológicos que se han presentado en los últimos años se ha requerido incursionar en el estudio a microescalas para conocer más acerca del comportamiento de los fluidos cuando la escala de operación disminuye y así comprobar si existen diferencias [6]. Las aplicaciones de los microcapilares empezaron a ser notorias en la década de los 90 cuando se usaron en sistemas de refrigeración de circuitos. Para poder avanzar en la creación de nuevos dispositivos con microcapilares, fue necesario empezar a estudiar los efectos que sufren los fluidos a escalas microscópicas, pues a ésta escala, los fluidos se ven más afectados por los gradientes de presión, y los efectos capilares como tensión superficial, efectos térmicos, eléctricos, entre otros [2].

La mayoría de los estudios que se han hecho actualmente están enfocados en mejorar las ecuaciones de Navier-Stokes para que se cumplan a diferentes condiciones y así poder conocer el comportamiento de los fluidos, proponiendo modelos extendidos en estado transitorio que tengan en cuenta la mayor cantidad de efectos y así modelar con bajos errores los caudales en los microcapilares [7]. Sin embargo, al disminuir los errores se incrementa la complejidad de la solución de las ecuaciones, lo que hace que en algunos casos sea muy difícil resolver analíticamente. Éstas ecuaciones se enfocan en la velocidad a través de los microcapilares y no en el caudal, por lo que los estudios buscan que se sigan cumpliendo las 3 suposiciones para las ecuaciones de Navier-Stokes: fluido newtoniano, aproximación de continuidad y equilibrio termodinámico [8].

Para poder satisfacer estas suposiciones se hacen variaciones en las aproximaciones de gas diluido (teoría cinética de los gases y el transporte de Boltzmann), y se plantean diferentes rangos para los números de Knudsen

dependiendo del diámetro de los átomos de los gases evaluados. Todas estas mejoras han sido útiles, pero no son las más adecuadas para todos los casos porque como antes se mencionaba, los efectos de rarefacción aumentan al disminuir la escala y se pueden llegar a invalidar las ecuaciones, además de que no calculan el caudal directamente [2] [8]. Adicionalmente se han propuesto diferentes formas de calcular en caudal a través de microcapilares, como el método de Lattice Boltzmann para simular los microfluidos y solucionar de forma numérica las complejas ecuaciones de Navier-Stokes, o variaciones de la ecuación de Hagen-Poiseuille que han resultado adecuadas en algunos casos [9] [10].

Por otro lado, la preparación de gases estándar usados como referencia se empezó a desarrollar hace varios años, en donde en 1981 se plantearon diferentes formas de preparación por Barrat, clasificadas en dos grandes grupos: estáticas y dinámicas [11] [12]. Con el tiempo las necesidades planteadas desde ese entonces como calibrar instrumentos cromatográficos o dispositivos de monitoreo de calidad del aire, han hecho que todavía se sigan realizando diferentes investigaciones alrededor de estas temáticas para poder cumplir con las legislaciones impuestas, especialmente en la parte ambiental [13] [14].

Actualmente el CDT de Gas ha enfocado parte de sus investigaciones en conocer el comportamiento de los microflujos en el dilutor, en donde se caracterizó el sistema de capilares a temperatura constante y se realizaron pruebas experimentales para estudiar el efecto de la temperatura y caída de presión sobre la concentración de la MGC obtenida en el dilutor, obteniendo resultados donde dichos factores afectan la concentración final de la mezcla [15].

2. MARCO TEÓRICO

2.1 DISPOSITIVO GENERADOR DE TRAZAS (TGD 2000)

El TGD 2000 es un dispositivo que tiene como finalidad generar MGC empleando un método de dilución dinámico. El dispositivo dilutor cuenta con un sistema de capilares por los cuales atraviesa el MRGC y el gas matriz de dilución para generar una MGC que contiene el MRGC en una proporción menor, llegando a los niveles de concentración requeridos para la calibración de detectores de contaminantes. Actualmente el dispositivo utiliza como gas matriz nitrógeno o aire y como MRGC monóxido de carbono. El dilutor tiene la capacidad de mezclar en una relación hasta de 2000:1 entre el gas matriz y el MRGC respectivamente, generando micro caudales entre 2.5 y 1000 $\mu\text{g/s}$ [15] [16].

2.2 MODELADO EMPÍRICO

Existen situaciones en las cuales los procesos no pueden ser explicados de la mejor manera con las ecuaciones ya planteadas, entonces se debe recurrir a otros métodos para explicar los fenómenos que ocurren en el proceso [17]. En estos casos, lo que se busca es entender la respuesta de una variable ante diferentes regresores, para lograr interpretar los efectos tienen sobre la variable estudiada. Cuando se realiza un modelo empírico, se parte de datos experimentales para entender el comportamiento de la variable salida, y al igual que en un modelado teórico existente tres principales etapas: definición del problema, formulación del modelo y la validación del modelo. Por medio del modelado empírico se busca comprender el comportamiento de los datos experimentales para obtener un modelo en función de las variables independientes y lograr una mejor respuesta que con una ecuación ya planteada y que puede no funcionar en todas las situaciones. Es una alternativa de solución bastante útil en la actualidad [7] [18].

2.3 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Un modelo de regresión es usado para entender y analizar datos experimentales cuando las situaciones son difíciles de observar o predecir por modelos analíticos. Con un modelo de regresión múltiple se plantea estudiar el comportamiento de una variable dependiente en función de dos o más variables independientes lineales [18]. Un modelo de regresión lineal múltiple puede ser escrito de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \dots + \varepsilon \quad (1)$$

Donde ε es el error aleatorio y los β_i son los coeficientes de regresión, siendo el método de mínimos cuadrados el más usado para hallarlos. Los residuales de una regresión lineal múltiple son la diferencia entre el valor observado o experimental (Y_i) y el valor estimado por el modelo (\hat{Y}_i) y pueden ser considerados como el error aleatorio observado. Estos sirven para determinar diferentes suposiciones en las que se basa el ajuste del modelo: si la relación entre la variable dependiente e independiente es lineal, si se cumple la hipótesis de que la varianza de los datos en el modelo es constante (propiedad de homocedasticidad) y si hay normalidad en los errores. También existen otras formas de comprobar que el modelo de regresión lineal es adecuado y significativo como los análisis de varianza y los coeficientes de determinación. La finalidad de la regresión lineal múltiple es encontrar el modelo más apropiado que explique el comportamiento de los datos en función de varias variables [18] [19].

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar empíricamente en función de la presión y temperatura el caudal a través de los capilares de un dispositivo dilutor en el cual se obtiene una mezcla de gases de calibración.

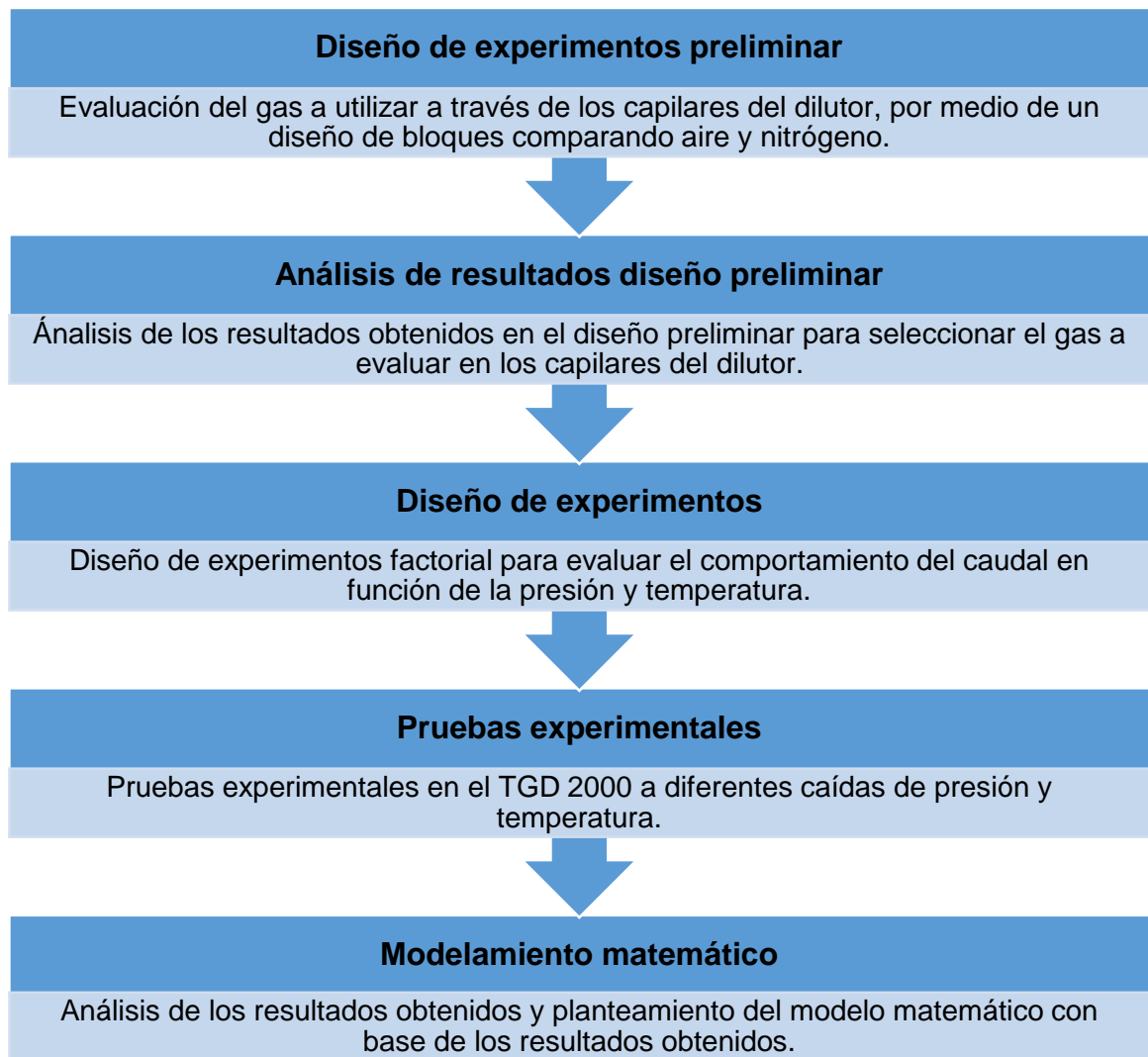
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Evaluar el efecto de la presión y temperatura de los caudales en los capilares por medio de diseño de experimentos, en el intervalo de temperatura de 10 °C a 40°C y caídas de presión de 30 psi a 78 psi para dispositivo generador de trazas (TGD 2000) desarrollado por el CDT de Gas.
- Modelar empíricamente el caudal a través de los capilares para conocer la concentración final de la mezcla de gases de calibración que se usará como material de referencia.
- Predecir el comportamiento de la mezcla de gases de calibración en el dispositivo por medio del modelado matemático empírico obtenido para poder decidir si es adecuado implementar el dispositivo a condiciones diferentes a las del laboratorio.

4. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Las etapas en las cuales se llevó a cabo el desarrollo del proyecto se muestran a continuación en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de metodología



4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS PRELIMINAR

El capilar de 250 μm es por el cual va el flujo del gas matriz de dilución, y actualmente en el dilutor se usan dos gases matrices: nitrógeno y aire. Antes de realizar el diseño de experimentos factorial se comparó si el comportamiento de los gases era diferente o similar, pues si el caudal del capilar de 250 μm variaba se generaría un efecto sobre la concentración final de la MGC, entonces se debía decidir si era necesario realizar las pruebas con ambos gases en el caso de diferir el comportamiento, o si era similar escoger uno de los dos para llevar a cabo las pruebas experimentales.

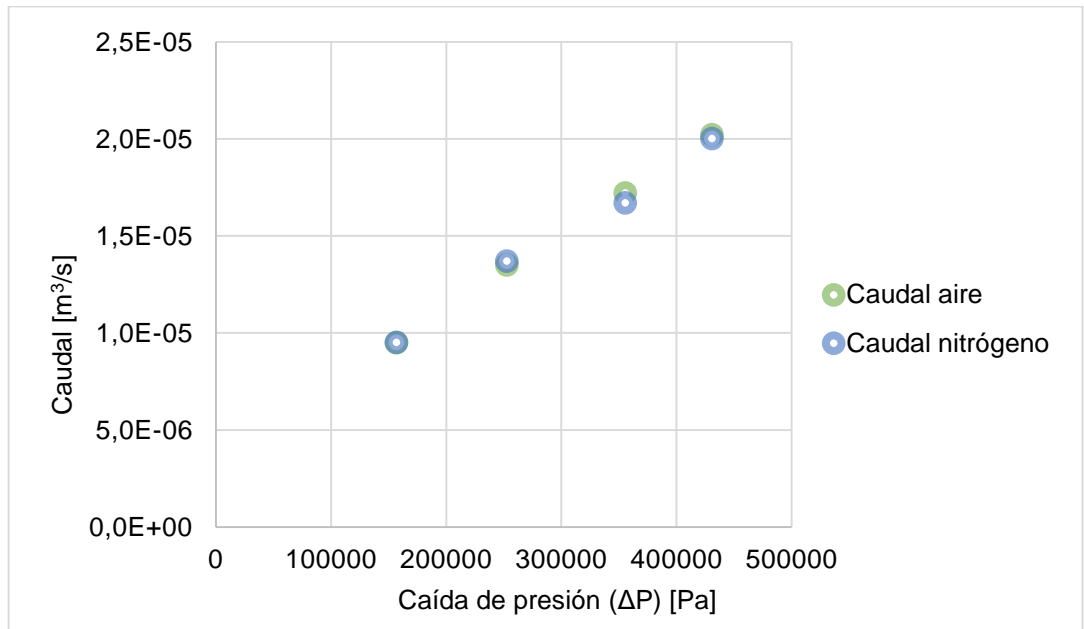
Se realizó un diseño de experimentos por bloques con una réplica para 4 caídas de presión en el intervalo de 144 790 Pa a 551 581 Pa (21 psi a 80 psi) manteniendo la temperatura constante a 293.15 K (20 °C). En la tabla 1 se presentan los datos experimentales para las 4 caídas de presión a las cuales se evaluó el caudal en el capilar de 250 μm .

Tabla 1. Datos experimentales diseño preliminar

Presión entrada [Pa]	Presión salida [Pa]	Diferencial de presión (ΔP) [Pa]	Caudal aire [m ³ /s]	Caudal nitrógeno [m ³ /s]
524 093	93 102	430 991	2.02E-5	2.0E-5
448 274	92 574	355 701	1.72E-5	1.67E-5
344 761	91 999	252 762	1.35E-5	1.37E-5
248 303	91 493	156 810	9.48E-6	9.5E-6

A cada diferencial de presión que se presenta anteriormente se registró el caudal para los gases matrices nitrógeno y aire, y así comparar su comportamiento a través del capilar. Por medio de la figura 2 se pueden observar los datos registrados en la tabla 1 y donde se evidenció que el comportamiento del caudal en función de la caída de presión es directamente proporcional. De igual forma, gráficamente el caudal presenta bastante similitud para los dos gases matrices de dilución.

Figura 2. Comparación del caudal en función de la caída de presión



4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO PRELIMINAR

Para conocer el comportamiento de los caudales presentados en la tabla 1, se realizó un análisis de varianza de un factor, que para éste caso el diferencial de presión (ΔP) a través del capilar, planteándose una prueba de hipótesis como se presenta a continuación:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

H_0 : Los caudales se comportan igual al variar el gas matriz de dilución.

H_1 : Los caudales se comportan diferente al variar el gas matriz de dilución.

Por medio de la herramienta Análisis de Datos de Microsoft Office Excel 2016 se realizó el análisis de varianza que se presenta en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Resumen diseño de experimentos preliminar

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Aire	4	6.04E-05	1.51E-05	2.15E-11
Nitrógeno	4	5.99E-05	1.50E-05	1.99E-11

Tabla 3. Análisis de varianza diseño de experimentos preliminar

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón-F	Valor-P	Valor crítico para F
Entre grupos	2.88E-14	1	2.88E-14	0.0014	0.971	5.987
Dentro de los grupos	1.24E-10	6	2.07E-11			
Total	1.24E-10	7				

Con los resultados presentados en la tabla 3 se verificó el comportamiento que tienen los gases en el capilar, obteniéndose como resultado que se falla en rechazar la hipótesis nula, es decir, no hay evidencia de que los caudales se comporten diferente al variar el gas matriz de dilución, como lo representa un valor alto para P de 0.971, y la Razón F al ser menor que el valor crítico de F con una significancia de $\alpha=0.05$. Con base en los resultados del análisis de varianza, se decidió utilizar como gas matriz nitrógeno para realizar las pruebas experimentales debido a que no difiere el caudal si se usa nitrógeno o aire, además de que económicamente tienen un costo similar.

4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Las pruebas experimentales para evaluar el comportamiento del caudal se llevaron a cabo en los capilares de 50 μm y 75 μm utilizando gas nitrógeno. Se planteó un diseño de experimentos factorial, con dos factores de estudio: caída de presión y temperatura, partiendo de la suposición de que la caída de presión tiene un efecto significativo en el caudal al igual que la temperatura, lo que se traduce en un cambio en la concentración final de la MGC. Para la caída de presión se seleccionaron 3

niveles: 103 421 Pa, 275 790 Pa y 551 581 Pa (15 psi, 40 psi y 80 psi); y para la temperatura 4 niveles: 283.15 K, 293.15 K, 303.15 K y 313.15 K (10 °C, 20 °C ,30 °C y 40 °C). Se realizaron 3 réplicas para un total de 72 pruebas, 36 pruebas para cada capilar.

4.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES

El procedimiento durante los experimentos consistió en permitir que el flujo de gas atravesara un capilar del dilutor, es decir, se abría solo la válvula del capilar al cual se le iba a medir el caudal mientras las otras permanecían cerradas. Durante las pruebas se fijó la temperatura y se varió la caída de presión a través del capilar, y para disminuir o aumentar la temperatura de los capilares de forma controlada se usó una incubadora. Se empezó por la temperatura y caída de presión más baja, y cuando se evaluaban los 3 niveles de la caída de presión se aumentaba la temperatura y se repetía el procedimiento hasta completar todos los niveles de temperatura.

El montaje experimental se puede observar en la figura 2, en donde el sistema de capilares del dilutor se colocó en la incubadora 23IC de la marca BEAR, la caída de presión fue controlada por el software del dilutor. Para la medición del caudal, se utilizó un medidor de flujo de gas de la marca MKS Instruments, junto con su fuente de energía y un calibrador de presión PC-507 marca Presys, como indicador. El sistema de capilares se observa en la figura 3 dentro de la incubadora, así como el medidor y el calibrador de presión.

Figura 3. Montaje experimental

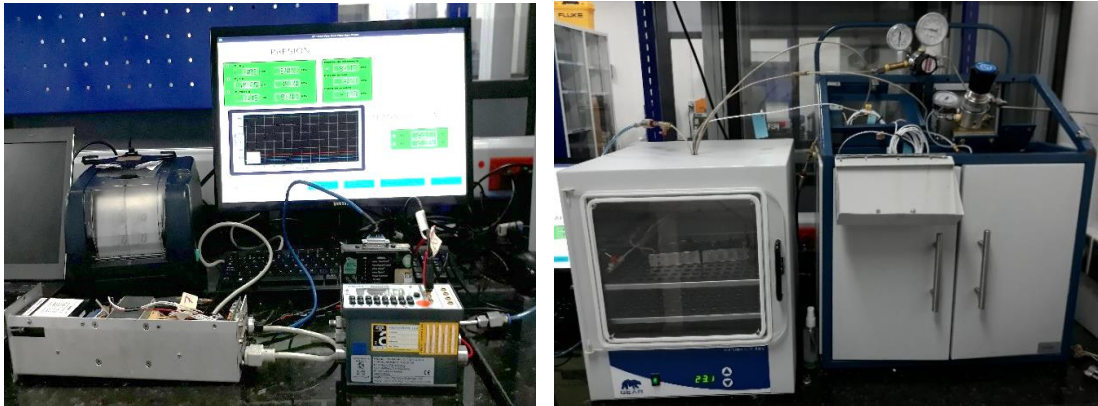
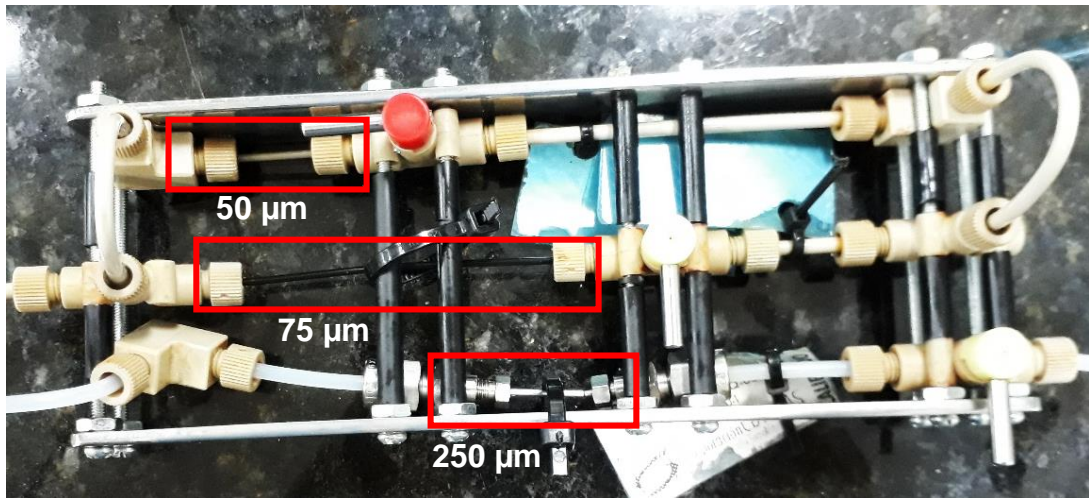


Figura 4. Sistema de capilares



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 RESULTADOS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Los resultados presentados en este capítulo corresponden a los capilares de 50 y 75 μm evaluados utilizando gas nitrógeno. En el anexo A se presentan las tablas con los datos experimentales obtenidos. Al realizar las pruebas se fijó la temperatura (283.15 K, 293.15 K, 303.15 K y 313.15 K) y se varió la caída de presión a través del capilar (103 421 Pa, 275 790 Pa y 551 581 Pa). En las figuras 4 y 5 se graficó el caudal en función de la temperatura y la caída de presión para cada capilar, donde se observó que los dos factores evaluados tienen efectos significativos sobre el caudal para los dos capilares. Éstas gráficas evidencian que el efecto de la caída de presión es mucho más significativo que el de la temperatura, además del comportamiento que tiene el caudal al variar cada factor. Cuando se aumenta la caída de presión a través del capilar el caudal incrementa, mientras que cuando se aumenta la temperatura el caudal disminuye.

Figura 5. Valores promedio del caudal en función de ΔP y temperatura en el capilar 50 μm

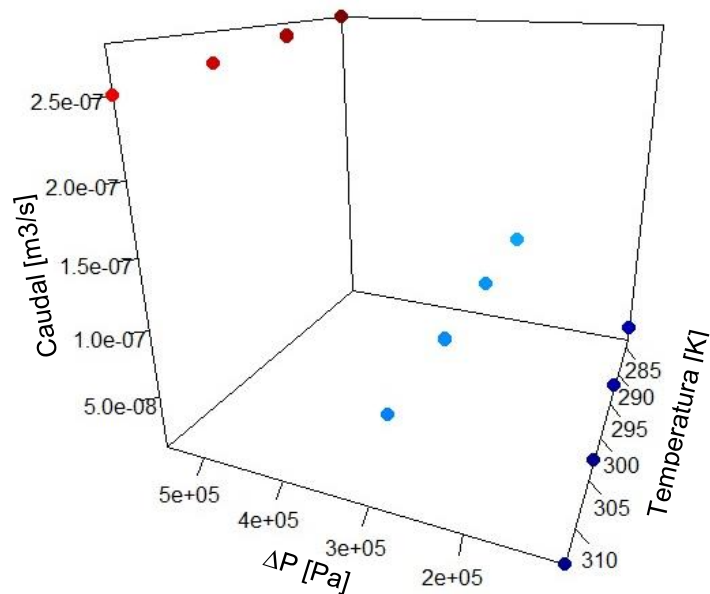
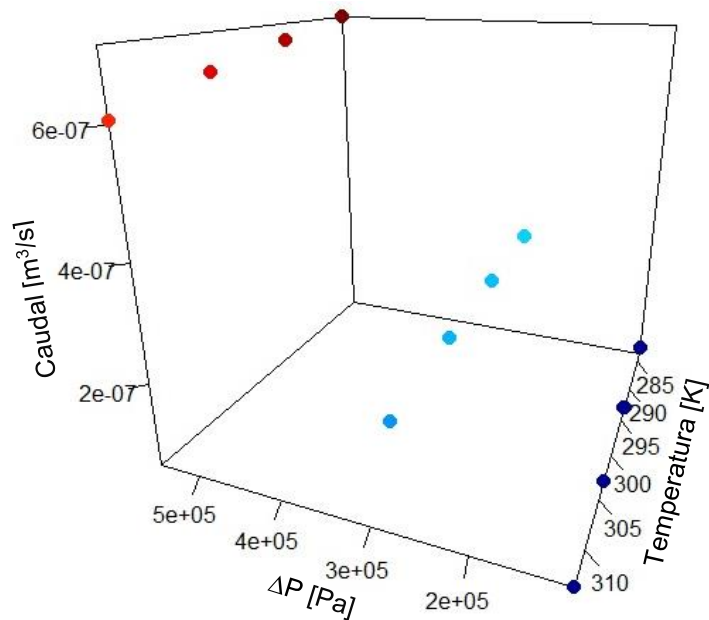


Figura 6. Valores promedio del caudal en función de ΔP y temperatura en el capilar 75 μm



5.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DATOS EXPERIMENTALES

Se realizó el análisis de varianza de los datos obtenidos para los capilares de 50 y 75 μm respectivamente como se presentan en las tablas 4 y 5, evaluando los factores de temperatura y caída de presión y la interacción entre ellos. Para realizar los análisis de varianza se usó el software R que tiene licencia libre.

Tabla 4. ANOVA Capilar 50 μm

Efectos principales	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P (>F)
ΔP	2	3.992E-13	1.996E-13	5096352	<2E-16
Temperatura	3	1.500E-15	4.900E-16	12534	<2E-16
Interacción					
ΔP :Temperatura	6	4.000E-16	6.000E-17	1595	<2E-16
Residuos	24	4.011E-13	2.002E-13		

Tabla 5. ANOVA capilar 75 μm

Efectos principales	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P (>F)
ΔP	2	2.249E-12	1.124E-12	16000775	<2E-16
Temperatura	3	1.160E-14	3.900E-15	54976	<2E-16
Interacción					
ΔP :Temperatura	6	7.200E-15	1.200E-15	17155	<2E-16
Residuos	24	2.268E-12	1.129E-12		

En las tablas 4 y 5 se observa que los valores de P para los dos factores (temperatura y caída de presión) son muy bajos al igual que para la interacción entre ambos, lo que demostró que los factores y la interacción tienen un efecto significativo en el caudal para los dos capilares; esto también se puede evidenciar en las figuras 4 y 5.

5.3 MODELAMIENTO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN Y LA TEMPERATURA

Con los resultados obtenidos en las tablas ANOVA se propusieron los siguientes modelos de regresión lineal múltiple que incluyen los dos factores y la interacción entre ellos:

$$\text{Modelo 1: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T \quad (2)$$

$$\text{Modelo 2: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T \quad (3)$$

$$\text{Modelo 3: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T \quad (4)$$

Donde:

$Q \rightarrow$ Caudal (m^3/s)

$\Delta P \rightarrow$ Caída de presión (Pa)

$T \rightarrow$ Temperatura (K)

Los modelos obtenidos para cada capilar se presentan a continuación:

- Modelos lineales capilar 50 μm

$$Q = -1.378x10^{-8} + 9.813x10^{-13} * \Delta P - 1.363x10^{-10} * T - 1.392x10^{-15} * \Delta P * T \quad (5)$$

$$Q = 1.15x10^{-7} + 5.663x10^{-13} * \Delta P - 5.681x10^{-10} * T \quad (6)$$

$$Q = -5.441x10^{-8} + 1.078x10^{-12} * \Delta P - 1.716x10^{-15} * \Delta P * T \quad (7)$$

- Modelos lineales capilar 75 μm

$$Q = -2.457x10^{-7} + 3.373x10^{-12} * \Delta P + 5.008x10^{-10} * T - 6.781x10^{-15} * \Delta P * T \quad (8)$$

$$Q = 3.816x10^{-7} + 1.352x10^{-12} * \Delta P - 1.603x10^{-9} * T \quad (9)$$

$$Q = -9.637x10^{-8} + 3.018x10^{-12} * \Delta P - 5.588x10^{-15} * \Delta P * T \quad (10)$$

Los valores de R^2 ajustado para cada modelo del capilar de 50 y 75 μm se presentan en las tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 50 μm

Modelo	R^2 ajustado
1	0.9838
2	0.9835
3	0.9843

Tabla 7. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 75 μm

Modelo	R^2 ajustado
1	0.9962
2	0.9930
3	0.9961

A cada modelo se le realizó un análisis de varianza de la regresión lineal múltiple para conocer la significancia del modelo, así como las gráficas de los residuales del caudal en función de cada factor y función del caudal estimado para observar la linealidad del modelo, si existen datos atípicos y determinar si el modelo es

apropiado para los datos. En el anexo C se presentan las tablas ANOVA y las pruebas de significancia, en el anexo D las gráficas de residuales para todos los modelos de cada capilar y el en anexo E las gráficas de los residuales estandarizados. En las figuras D3, D6 y D9 se observó que el comportamiento del caudal para los modelos 1, 2 y 3 no corresponde a uno lineal, por lo cual se analizó las gráficas de residuales para cada factor, en donde se encontró que el factor de caída de presión no tenía comportamiento lineal sino cuadrático como se evidencia en las figuras D1, D4 y D7. Debido al comportamiento de la caída de presión se procedió a plantear los siguientes modelos en donde éste factor se eleva al cuadrado para saber si los datos se ajustan más a algún modelo propuesto.

$$\text{Modelo 4: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T \quad (11)$$

$$\text{Modelo 5: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T \quad (12)$$

$$\text{Modelo 6: } Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T \quad (13)$$

Los modelos obtenidos para cada capilar se presentan a continuación:

- Modelos para el capilar 50 μm

$$Q = 9.67x10^{-8} + 1.488x10^{-18} * \Delta P^2 - 2.827x10^{-10} * T - 2.190x10^{-21} * \Delta P^2 * T \quad (14)$$

$$Q = 1.818x10^{-7} + 8.355x10^{-19} * \Delta P^2 - 5.681x10^{-10} * T \quad (15)$$

$$Q = 1.241x10^{-8} + 1.823x10^{-18} * \Delta P^2 - 3.313x10^{-21} * \Delta P^2 * T \quad (16)$$

- Modelos para el capilar 75 μm

$$Q = 1.56x10^{-7} + 4.949x10^{-18} * \Delta P^2 - 3.020x10^{-10} * T - 9.982x10^{-21} * \Delta P^2 * T \quad (17)$$

$$Q = 5.439x10^{-7} + 1.972x10^{-18} * \Delta P^2 - 1.603x10^{-9} * T \quad (18)$$

$$Q = 6.6x10^{-8} + 5.306x10^{-18} * \Delta P^2 - 1.118x10^{-15} * \Delta P^2 * T \quad (19)$$

Los valores de R^2 ajustado para cada modelo del capilar de 50 y 75 μm se presentan en las tablas 8 y 9 respectivamente.

Tabla 8. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 50 μm

Modelo	R^2 ajustado
4	0.9964
5	0.9956
6	0.9961

Tabla 9. R^2 ajustado para los modelos del capilar de 75 μm

Modelo	R^2 ajustado
4	0.9847
5	0.9818
6	0.9861

A continuación, en las tablas 10 y 11 se presenta un resumen de la significancia de los factores para cada modelo del capilar de 50 y 75 μm , en donde +++ es alta significancia, ++ media y + baja. El – representa que no tiene significancia y la x que ese factor no se incluye en el modelo.

Tabla 10. Significancia de los modelos para el capilar de 50 μm

Modelo	Caída de presión (ΔP)	Temperatura (T)	Interacción ($\Delta P \cdot T$)
1	+++	++	-
2	+++	++	x
3	+++	x	++
4	+++	+++	++
5	+++	+++	x
6	+++	x	+++

Tabla 11. Significancia de los modelos para el capilar de 75 μm

Modelo	Caída de presión (ΔP)	Temperatura (T)	Interacción ($\Delta P \cdot T$)
1	+++	+++	+++
2	+++	+++	X
3	+++	X	+++
4	+++	++	+
5	+++	++	X
6	+++	X	+++

Los datos presentados en las tablas 10 y 11 sirvieron para confirmar lo antes mencionado acerca del factor de la caída de presión, en donde éste es el más significativo en todos los modelos tanto para el capilar de 50 como para el de 75 μm . Con los resultados expuestos aquí y en los anexos se procedió a hacer el respectivo análisis y la selección del modelo que mejor se ajusta a los datos.

5.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El comportamiento respecto a la caída de presión observado en los datos experimentales coincide con el descrito en la ecuación para determinar el caudal a través de un capilar de la norma ISO 6145-5:2009, en donde el caudal es directamente proporcional a la caída de presión. Con respecto al factor de temperatura, no hay una ecuación en la que se tenga en cuenta directamente, por lo cual se hizo una analogía con la viscosidad dinámica de la ecuación de la norma ISO para tener un estimado de que el comportamiento de la temperatura con respecto al caudal era el más adecuado.

Se encontró que por medio de las propiedades críticas del gas se puede calcular la viscosidad a diferentes temperaturas, y que para gases como el nitrógeno se pueden usar gráficas en función de la temperatura reducida y presión reducida que ayudan a predecir el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura del gas, siendo éstas directamente proporcionales [20]. Conociendo que la temperatura es directamente proporcional a la viscosidad en los gases para las

condiciones de operación del dilutor, se verifica que el comportamiento obtenido en los datos experimentales es el más adecuado, pues la viscosidad es inversamente proporcional al caudal según la ecuación se la norma, por lo cual la temperatura va a ser inversamente proporcional al caudal y esto es lo que se evidenció en las figuras 4 y 5 de los datos experimentales.

Los resultados obtenidos por medio de los análisis de varianza permitieron identificar que los dos factores y su interacción tenían efecto sobre el caudal a través de los capilares, y que la caída de presión es el factor más significativo. Por medio de las gráficas de residuales y residuales estandarizados presentadas en los anexos D y E se evidenció mejor el comportamiento del caudal en función de cada factor, y con las tablas ANOVA y los valores de R^2 ajustado se seleccionó cual modelo es el más adecuado para el caudal de cada capilar.

Para el capilar de 50 μm el modelo con mejor R^2 ajustado (0.9964) y más significancia en los factores de la regresión múltiple fue el modelo 4, mientras que para el capilar de 75 μm el modelo con mejor R^2 ajustado (0.9962) y una significancia alta en los factores y su interacción fue el modelo 1. Los modelos escogidos se presentan a continuación:

- Modelo capilar 50 μm

$$Q = 9.67x10^{-8} + 1.488x10^{-18} * \Delta P^2 - 2.827x10^{-10} * T - 2.190x10^{-21} * \Delta P^2 * T \quad (14)$$

- Modelo capilar 75 μm

$$Q = -2.457x10^{-7} + 3.373x10^{-12} * \Delta P + 5.008x10^{-10} * T - 6.781x10^{-15} * \Delta P * T \quad (8)$$

Los modelos seleccionados para el caudal tienen un R^2 y una significancia en las tablas ANOVA bastante alto, por lo cual se espera que el error al momento de

calcular el caudal sea bajo para así poder obtener una concentración final de la MGC con valores confiables.

6. CONCLUSIONES

El modelamiento empírico del caudal permitió entender el comportamiento de éste cuando varían los factores estudiados (caída de presión y temperatura) y la interacción entre ellos, para así poder predecir mediante los modelos que mejor se ajustaron a los datos, el caudal para diferentes situaciones en las que se necesite utilizar el dispositivo dilutor.

Los efectos de los factores de estudio se comprobaron por medio de los análisis de varianza, resultados de significancia y residuales de los modelos, donde se determinó que el factor de caída de presión es el que más afecta al caudal en comparación con la temperatura y la interacción entre éstos. Así mismo, con las pruebas experimentales se pudo evidenciar el comportamiento del caudal para cada factor, en donde el caudal es directamente proporcional a la caída de presión, e inversamente proporcional a la temperatura.

Por medio de los modelos seleccionados como los más adecuados para cada capilar se puede predecir el comportamiento del caudal, y obtener valores de concentración de MGC con alta confiabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Gas analysis - Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures. ISO 6143:2001. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2007. 39 p.
- [2] BARBER, Robert W. y DAVID R. Emerson. Challenges in modeling gas-phase flow in microchannels: From slip to transition. *Heat Transfer Engineering*. 2006, vol. 27, nº 4. pp. 3-12.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 1: Methods of calibration. ISO 6145-1:2003. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2008. 39 p.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 5: Capillary calibration devices. ISO 6145-5:2009. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2011. 20 p.
- [5] HARLEY, John C y YUFENG, Huang. Gas flow in micro-channels. *Journal of Fluid Mechanics*. 1995, vol. 284. pp. 257-274.
- [6] SATISH G, Kandlikar, *et al.* Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. 1ra ed. Estados Unidos: Elsevier, 2006. 574 p.
- [7] ROY, Subrata, *et al.* Modeling gas flow through microchannels and nanopores. *Journal of Applied Physics*. 2003, vol. 93, nº 8. pp. 4870-4879.

- [8] KARNIADAKIS, George y NARYAN Aluru. Microflows and Nanoflows: Fundamentals and simulation. Estados Unidos: S.S. Antman, 2005. 774 p.
- [9] GIOVACCHINI, Juan ; ORTIZ ,Omar E y SACCO, Carlos. El método de Lattice Boltzmann con condiciones de borde en geometrías arbitrarias no regulares. *Mecánica computacional*. 2012, vol. XXXI. pp. 165-183.
- [10] CHEN, Shiyi y DOOLEN, Gary D. Lattice Boltzmann Method for fluids flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998, vol. 30. pp. 329-364.
- [11] BARRATT, R. S. The preparation of standard gas mixtures. *Analyst*. 1981, vol. 106, n° 1265. pp. 817-849.
- [12] UCHIYAMA, H, *et al.* The technique of producing reference-standard gas by the flow-measuring method. *National Research Laboratory of Metrology*. 1983, vol. 1, n° 4. pp. 172-176.
- [13] SŁOMIŃSKA, Marta; KONIECZKA, Piotr y NAMIEŚNIK, Jacek. Standard gas mixtures - indispensable reference materials in the analysis of gaseous media. *TrAC - Trends Analytical Chemistry*. 2010, vol. 29, n.º 5. pp. 419-429.
- [14] ANGELY, Lysiane *et al.* General method to prepare standard samples for detector calibration in gas chromatographic analysis of gases. *Analytical chemistry*. 1969, vol 41, n° 11. pp. 1446-1449.
- [15] MORENO, Brayan S y VALDERRAMA, Jose L. Caracterización y modelado matemático de microflujos de diferentes mezclas CO/N₂ a través de capilares en un dispositivo generados de trazas desarrollado por el CDT de Gas. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucarmanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2016. 77 p.

- [16] PEDRAZA, Wilmer Alonso y GARCÍA, Luis Eduardo. Generación de microcaudales másicos para la preparación de materiales de calibración gaseosos. *Met & Flu.* 2015, vol. 11, pp. 26-35.
- [17] LENORMAND, Roland, TOUBOUL, Eric y ZARCONI, Cesar. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics.* 1988, vol. 189. pp. 165-187.
- [18] MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos, 2ª ed. México: Limusa Wiley, 2004. 692 p.
- [19] GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 2008. 564 p.
- [20] BIRD, Robert. Fenómenos de transporte. 2ª ed. México: Limusa Wiley, 2006. 1062 p.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELY, Lysiane *et al.* General method to prepare standard samples for detector calibration in gas chromatographic analysis of gases. *Analytical chemistry*. 1969, vol 41, n° 11. pp. 1446-1449.

BARBER, Robert W. y DAVID R. Emerson. Challenges in modeling gas-phase flow in microchannels: From slip to transition. *Heat Transfer Engineering*. 2006, vol. 27, n° 4. pp. 3-12.

BARRATT, R. S. The preparation of standard gas mixtures. *Analyst*. 1981, vol. 106, n° 1265. pp. 817-849.

BIRD, Robert. Fenómenos de transporte. 2a ed. México: Limusa Wiley, 2006. 1062 p.

CHEN, Shiyi y DOOLEN, Gary D. Lattice Boltzmann Method for fluids flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998, vol. 30. pp. 329-364.

GIOVACCHINI, Juan ; ORTIZ ,Omar E y SACCO, Carlos. El método de Lattice Boltzmann con condiciones de borde en geometrías arbitrarias no regurales. *Mecánica computacional*. 2012, vol. XXXI. pp. 165-183.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2008. 564 p.

HARLEY, John C y YUFENG, Huang. Gas flow in micro-channels. *Journal of Fluid Mechanics*. 1995, vol. 284. pp. 257-274.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Gas analysis - Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures. ISO 6143:2001. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2007. 39 p.

------. Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 1: Methods of calibration. ISO 6145-1:2003. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2008. 39 p.

------. Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 5: Capillary calibration devices. ISO 6145-5:2009. 2ª ed. Madrid, España: AENOR, 2011. 20 p.

KARNIADAKIS, George y NARYAN Aluru. Microflows and Nanoflows: Fundamentals and simulation. Estados Unidos: S.S. Antman, 2005. 774 p.

LENORMAND, Roland, TOUBOUL, Eric y ZARCONE, Cesar. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*. 1988, vol. 189. pp. 165-187.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos, 2a ed. México: Limusa Wiley, 2004. 692 p.

MORENO, Brayan S y VALDERRAMA, José L. Caracterización y modelado matemático de microflujos de diferentes mezclas CO/N₂ a través de capilares en un dispositivo generados de trazas desarrollado por el CDT de Gas. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Químicas, 2016. 77 p.

PEDRAZA, Wilmer Alonso y GARCÍA, Luis Eduardo. Generación de microcaudales máxicos para la preparación de materiales de calibración gaseosos. *Met & Flu.* 2015, vol. 11, pp. 26-35.

ROY, Subrata, *et al.* Modeling gas flow through microchannels and nanopores. *Journal of Applied Physics.* 2003, vol. 93, n° 8. pp. 4870-4879.

SATISH G, Kandlikar, *et al.* Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. 1ra ed. Estados Unidos: Elsevier, 2006. 574 p.

SŁOMIŃSKA, Marta; KONIECZKA, Piotr y NAMIEŚNIK, Jacek. Standard gas mixtures - indispensable reference materials in the analysis of gaseous media. *TrAC - Trends Analytical Chemistry.* 2010, vol. 29, n° 5. pp. 419-429.

UCHIYAMA, H, *et al.* The technique of producing reference-standard gas by the flow-measuring method. *National Research Laboratory of Metrology.* 1983, vol. 1, n° 4. pp. 172-176.

ANEXOS

ANEXO A: TABLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla A1. Datos experimentales para el capilar de 50 μm

		Caudal [m^3/s]			
		Temperatura [K]			
		283.15	293.15	303.15	313.15
ΔP [Pa]	103421	2.15E-08	1.68E-08	1.25E-08	9.83E-09
		2.15E-08	1.68E-08	1.25E-08	9.83E-09
		2.13E-08	1.68E-08	1.25E-08	9.83E-09
	275790	9.02E-08	8.42E-08	8.17E-08	7.98E-08
		9.02E-08	8.42E-08	8.13E-08	7.97E-08
		9.02E-08	8.45E-08	8.12E-08	8.00E-08
	551581	2.80E-07	2.69E-07	2.59E-07	2.51E-07
		2.80E-07	2.69E-07	2.59E-07	2.51E-07
		2.80E-07	2.70E-07	2.59E-07	2.51E-07

Figura A1. Valores promedio del caudal en función de ΔP y T para el capilar de 50 μm en 3D

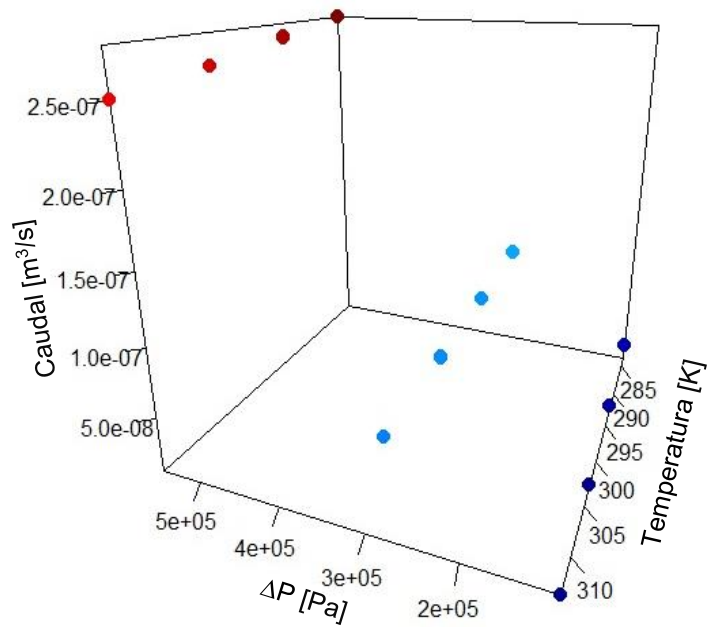


Figura A2. Valores promedio del caudal en función de ΔP y T para el capilar de 50 μm en 2D

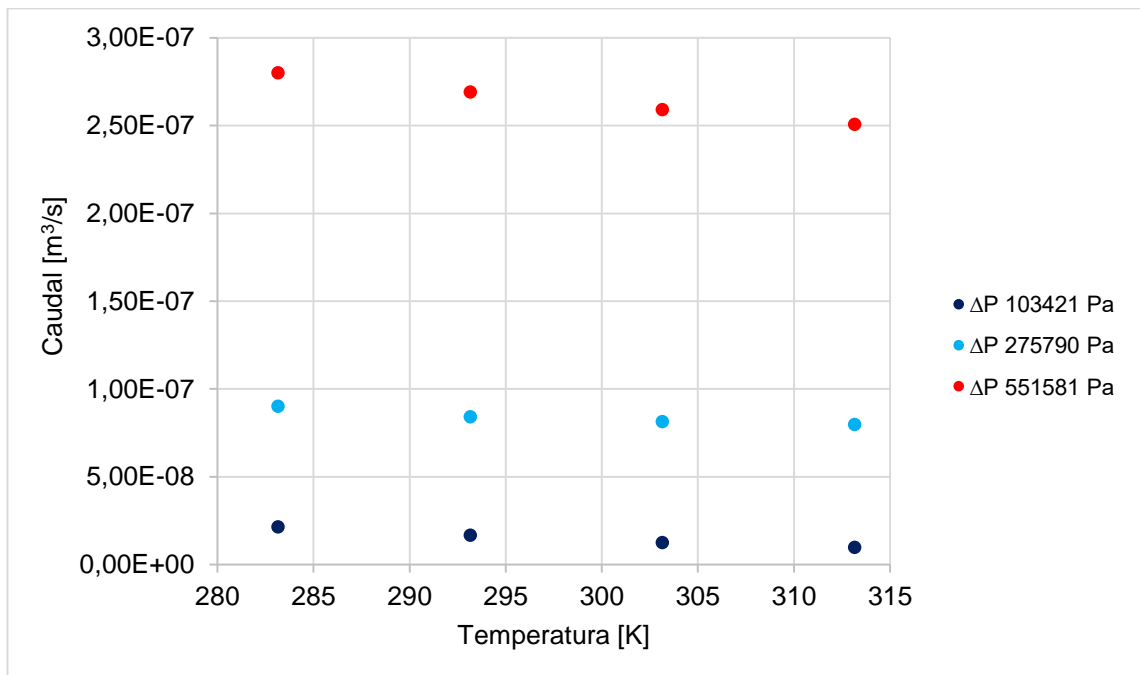


Tabla A2. Datos experimentales para el capilar de 75 μm

		Caudal [m^3/s]			
		Temperatura [K]			
		283.15	293.15	303.15	313.15
ΔP [Pa]	103421	6.32E-08	5.48E-08	5.42E-08	5.27E-08
		6.30E-08	5.48E-08	5.37E-08	5.27E-08
		6.30E-08	5.45E-08	5.35E-08	5.28E-08
ΔP [Pa]	275790	2.73E-07	2.62E-07	2.52E-07	2.37E-07
		2.73E-07	2.62E-07	2.52E-07	2.37E-07
		2.73E-07	2.61E-07	2.52E-07	2.37E-07
ΔP [Pa]	551581	7.05E-07	6.75E-07	6.44E-07	6.05E-07
		7.05E-07	6.75E-07	6.44E-07	6.05E-07
		7.05E-07	6.75E-07	6.43E-07	6.05E-07

Figura A3. Valores promedio del caudal en función de ΔP y T para el capilar de 75 μm en 3D

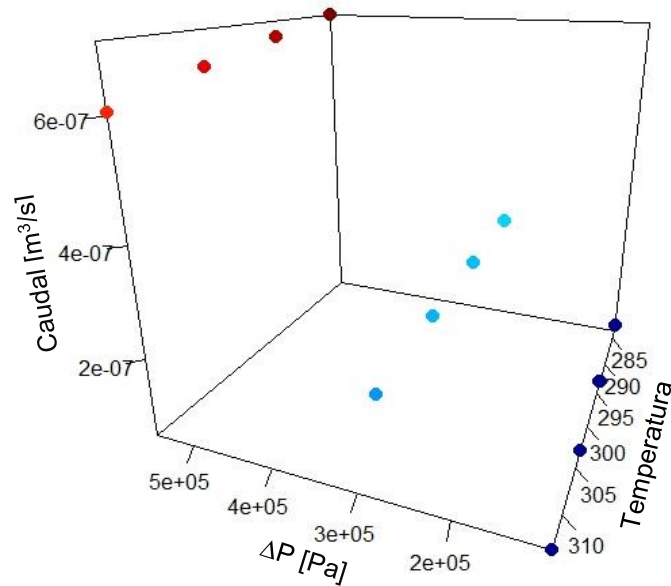
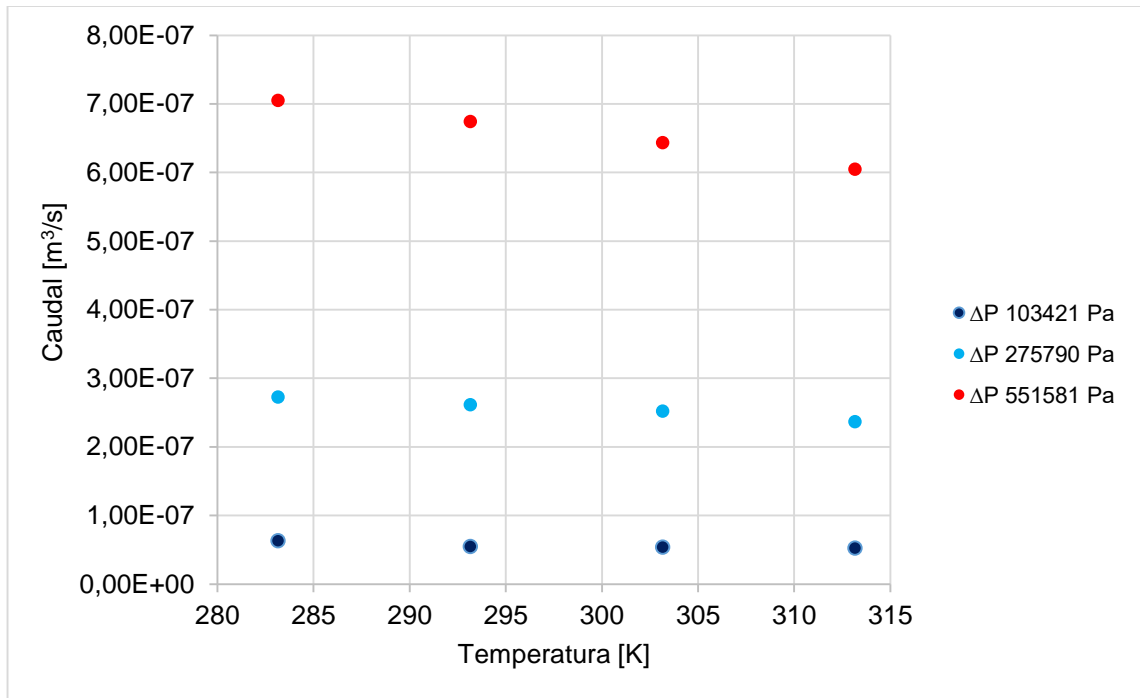


Figura A4. Valores promedio del caudal en función de ΔP y T para el capilar de 75 μm en 2D



ANEXO B: CÓDIGOS R

CÓDIGO PARA TABLA ANOVA DATOS EXPERIMENTALES

```
setwd("ubicación archivo")
datos= read.csv ("archivo.csv" , header=TRUE)
datos
attach(datos)
names(datos)
class(Caudal)
class(dP)
class(Temp)
dP<-as.factor(dP)
Temp<-as.factor(Temp)
class(dP)
levels(dP)
class(Temp)
levels(Temp)
anova=ao(Caudal~dP+Temp+dP:Temp)
summary(anova)
```

Los códigos aquí presentados se realizan para cada modelo planteado por aparte.

CÓDIGO REGRESIÓN MODELO EXPERIMENTAL Y ANOVA DE LA REGRESIÓN

```
setwd("ubicación archivo")
datos= read.csv ("archivo.csv" , header=TRUE)
datos
attach(datos)
names(datos)
```

```
class(Caudal)
class(dP)
class(Temp)
modelo=lm(Caudal~dP+Temp+dP:Temp)
summary(modelo)
residuales <- residuals(modelo)
plot(datos$Temp,residuales,ylab="Residuales", xlab="Temperatura
[K]",col=2,pch=1)
win.graph()
plot(datos$dP,residuales,ylab="Residuales", xlab="P [Pa]",col=12,pch=1)
win.graph()
caudal.ajustados<-fitted(modelo)
plot(caudal.ajustados,residuales, ylab="Residuales", xlab="Caudal ajustado
[m3/s]",col=3,pch=1)
anova(modelo)
```

ANEXO C: ESTADÍSTICAS DE LAS REGRESIONES

CAPILAR 50 μm

- Modelo 1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Tabla C1: Estadísticas regresión modelo 1 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-2.399E-08	-1.793E-08	8.338E-09	1.096E-08	1.675E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	-1.378E-08	1.184E-07	-0.116	0.90811	
ΔP	9.813E-13	3.281E-13	2.991	0.00532	
Temperatura	-1.363E-10	3.970E-10	-0.343	0.73364	
ΔP :Temperatura	-1.392E-15	1.100E-15	-1.266	0.21474	
Error residual estándar	1.362E-08	Coeficiente determinación R ²	0.9852	R ² ajustado	0.9838
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	3.9338E-13	3.9338E-13	2121.8	<2.2E-16
Temperatura	1	1.4500E-15	1.4500E-15	7.8348	0.00861
ΔP :Temperatura	1	3.0000E-16	3.0000E-16	1.6021	0.21473
Residuales	32	5.9300E-15	1.9000E-16		

- Modelo 2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Tabla C2: Estadísticas regresión modelo 2 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-2.042E-08	-1.448E-08	6.030E-09	1.015E-08	1.419E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	1.150E-07	6.123E-08	1.878	0.06927	
ΔP	5.663E-13	1.241E-14	45.649	<2E-16	
Temperatura	-5.681E-10	2.048E-10	-2.774	0.00904	
ΔP :Temperatura	-	-	-	-	
Error residual estándar	1.374E-08	Coefficiente determinación R ²	0.9845	R ² ajustado	0.9835
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	3.9338E-13	3.9338E-13	2083.8	<2.2E-16
Temperatura	1	1.4500E-15	1.4500E-15	7.6944	0.00904
ΔP :Temperatura	-	-	-	-	-
Residuales	33	6.2300e-15	1.9000E-16		

- Modelo 3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Tabla C3: Estadísticas regresión modelo 3 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-1.995E-08	-1.566E-08	7.231E-09	8.557E-09	1.468E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	-5.441E-08	4.379E-09	-12.426	5.41E-14	
ΔP	1.078E-12	1.658E-13	6.501	2.22E-07	
Temperatura	-	-	-	-	
ΔP :Temperatura	-1.716E-15	5.547E-16	-3.094	0.004	
Error residual estándar	1.343E-08	Coefficiente determinación R^2	0.9852	R^2 ajustado	0.9843
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	3.9338E-13	3.9338E-13	2180.1	<2.2E-16
Temperatura	-	-	-	-	-
ΔP :Temperatura	1	1.7330E-15	1.7300E-15	9.5751	0.00400
Residuales	33	5.9500E-15	1.8000E-16		

- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Tabla C4: Estadísticas regresión modelo 4 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-7.311E-09	-4.994E-09	-1.375E-09	6.596E-09	1.078E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	9.670E-08	4.108E-08	2.354	0.02489	
ΔP^2	1.488E-18	2.268E-19	6.564	2.14E-07	
Temperatura	-2.827E-10	1.377E-10	-2.053	0.04829	
ΔP^2 :Temperatura	-2.190E-21	7.600E-22	-2.881	0.00701	
Error residual estándar	6.416E-09	Coefficiente determinación R^2	0.9967	R^2 ajustado	0.9964
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	3.9795E-13	3.9795E-13	9668.4	<2.2E-16
Temperatura	1	1.4500E-15	1.4500E-15	35.290	1.28E-06
ΔP^2 :Temperatura	1	3.4000E-16	3.4000E-16	8.3025	0.00701
Residuales	32	1.3200E-15	4.0000E-17		

- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Tabla C5: Estadísticas regresión modelo 5 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-8.564E-09	-6.273E-09	-1.720E-09	5.708E-09	1.257E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	1.818E-07	3.156E-08	5.761	1.95E-06	
ΔP^2	8.355E-19	9.391E-21	88.975	<2E-16	
Temperatura	-5.681E-10	1.057E-10	-5.376	6.09E-06	
ΔP^2 :Temperatura	-	-	-	-	
Error residual estándar	7.09E-09	Coefficiente determinación R^2	0.9959	R^2 ajustado	0.9956
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	3.9795E-13	3.9795E-13	7916.6	<2.2E-16
Temperatura	1	1.4500E-15	1.4500E-15	28.896	6.09E-06
ΔP^2 :Temperatura	-	-	-	-	-
Residuales	33	1.6600E-15	5.0000E-17		

- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Tabla C6: Estadísticas regresión modelo 6 capilar 50 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-1.098E-08	-3.166E-09	-1.111E-09	6.984E-09	1.046E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	1.241E-08	1.613E-09	7.692	7.39E-09	
ΔP^2	1.823E-18	1.651E-19	11.041	1.28E-12	
Temperatura	-	-	-	-	
ΔP^2 :Temperatura	-3.131E-21	5.530E-22	-5.990	9.94E-07	
Error residual estándar	7.09E-09	Coefficiente determinación R^2	0.9959	R^2 ajustado	0.9956
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	3.9795E-13	3.9795E-13	8809.8	<2.2E-16
Temperatura	-	-	-	-	-
ΔP^2 :Temperatura	1	1.6200E-15	1.6200E-15	35.88	9.935E-07
Residuales	33	1.4900E-15	5.0000E-17		

CAPILAR 75 μm

- Modelo 1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Tabla C7: Estadísticas regresión modelo 1 capilar 75 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-2.399E-08	-1.793E-08	8.338E-09	1.096E-08	1.675E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	-2.457E-07	1.370E-07	-1.793	0.0824	
ΔP	3.373E-12	3.795E-13	8.888	3.73E-10	
Temperatura	5.008E-10	4.592E-10	1.090	0.2837	
ΔP :Temperatura	-6.781E-15	1.272E-15	-5.330	7.60E-06	
Error residual estándar	1.575E-08	Coefficiente determinación R^2	0.9965	R^2 ajustado	0.9962
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	2.2413E-12	2.2413E-12	9034.5	<2.2E-16
Temperatura	1	1.1560E-14	1.1560E-14	46.611	1.01E-07
ΔP :Temperatura	1	7.0500E-15	7.0500E-15	28.413	7.59E-06
Residuales	32	7.9400E-15	2.5000E-16		

- Modelo 2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Tabla C8: Estadísticas regresión modelo 2 capilar 75 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-2.749E-08	-1.738E-08	-1.269E-09	1.781E-08	3.341E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	3.816E-07	9.497E-08	4.018	0.00032	
ΔP	1.352E-12	1.924E-14	70.250	<2E-16	
Temperatura	-1.603E-09	3.177E-10	-5.046	1.61E-05	
ΔP :Temperatura	-	-	-	-	
Error residual estándar	2.131E-08	Coefficiente determinación R ²	0.9934	R ² ajustado	0.9930
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	2.2413E-12	2.2413E-12	4935.1	<2.2E-16
Temperatura	1	1.1560E-14	1.1560E-14	25.461	1.61E-05
ΔP :Temperatura	-	-	-	-	-
Residuales	33	1.4990E-14	4.5000E-16		

- Modelo 3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Tabla C9: Estadísticas regresión modelo 3 capilar 75 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-2.657E-08	-1.643E-08	8.807E-09	1.046E-08	1.803E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	-9.637E-08	5.149E-09	-18.715	< 2E-16	
ΔP	3.018E-12	1.950E-13	15.478	< 2E-16	
Temperatura	-	-	-	-	
ΔP :Temperatura	-5.588E-15	6.522E-16	-8.568	6.68E-10	
Error residual estándar	1.58E-08	Coefficiente determinación R ²	0.9964	R ² ajustado	0.9961
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP	1	2.2413E-12	2.2413E-12	8983.1	<2.2E-16
Temperatura	-	-	-	-	-
ΔP :Temperatura	1	1.8320E-14	1.8320E-14	73.414	6.67E-10
Residuales	33	8.2300E-15	2.5000E-16		

- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Tabla C10: Estadísticas regresión modelo 4 capilar 75 μ m

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-3.464E-08	-2.870E-08	-9.357E-09	3.760E-08	4.130E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	1.560E-07	2.017E-07	0.773	0.4450	
ΔP^2	4.949E-18	1.114E-18	4.444	9.93E-05	
Temperatura	-3.020E-10	6.762E-10	-0.447	0.6582	
ΔP^2 :Temperatura	-9.982E-21	3.732E-21	-2.674	0.0117	
Error residual estándar	3.151E-08	Coefficiente determinación R^2	0.9860	R^2 ajustado	0.9847
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	2.2174E-12	2.2174E-12	2233.7	<2E-16
Temperatura	1	1.1560E-14	1.1560E-14	11.648	0.00176
ΔP^2 :Temperatura	1	7.1000E-15	7.1000E-15	7.1528	0.01169
Residuales	32	3.1770E-14	9.9000E-16		

- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Tabla C11: Estadísticas regresión modelo 5 capilar 75 μ m

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-4.814E-08	-2.844E-08	-4.658E-09	3.395E-08	4.503E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	5.439E-07	1.528E-07	3.561	0.00115	
ΔP^2	1.972E-18	4.545E-20	43.390	<2E-16	
Temperatura	-1.603E-09	5.116E-10	-3.133	0.00361	
ΔP^2 :Temperatura	-	-	-	-	
Error residual estándar	3.432E-08	Coefficiente determinación R^2	0.9829	R^2 ajustado	0.9818
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	2.2174E-12	2.2174E-12	1882.7	<2.2E-16
Temperatura	1	1.1560E-14	1.1560E-14	9.818	0.003613
ΔP^2 :Temperatura	-	-	-	-	-
Residuales	33	3.8870E-14	1.1800E-15		

- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Tabla C12: Estadísticas regresión modelo 6 capilar 75 μm

REGRESIÓN MÚLTIPLE					
Residuales					
Mín	1Q	Medio	3Q	Máx	
-3.319E-08	-2.749E-08	-9.043E-09	3.537E-08	4.423E-08	
Coefficientes					
	Estimado	Error estándar	Valor-t	Valor crítico t	
Intersección	6.600E-08	7.468E-09	8.838	3.25E-10	
ΔP^2	5.306E-18	7.646E-19	6.939	6.26E-08	
Temperatura	-	-	-	-	
ΔP^2 :Temperatura	-1.118E-20	2.561E-21	-4.366	0.000118	
Error residual estándar	3.112E-08	Coefficiente determinación R^2	0.9859	R^2 ajustado	0.9851
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio cuadrados	Razón-F	Valor-P
ΔP^2	1	2.2174E-12	2.2174E-12	2289.3	<2.2E-16
Temperatura	-	-	-	-	-
ΔP^2 :Temperatura	1	1.8470E-14	1.8470E-14	19.064	0.000117
Residuales	33	3.1960E-14	9.7000E-16		

ANEXO D: GRÁFICAS RESIDUALES DE LO MODELOS

CAPILAR 50 μm

- Modelo 1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura D1: Residuales vs ΔP modelo 1 capilar 50 μm

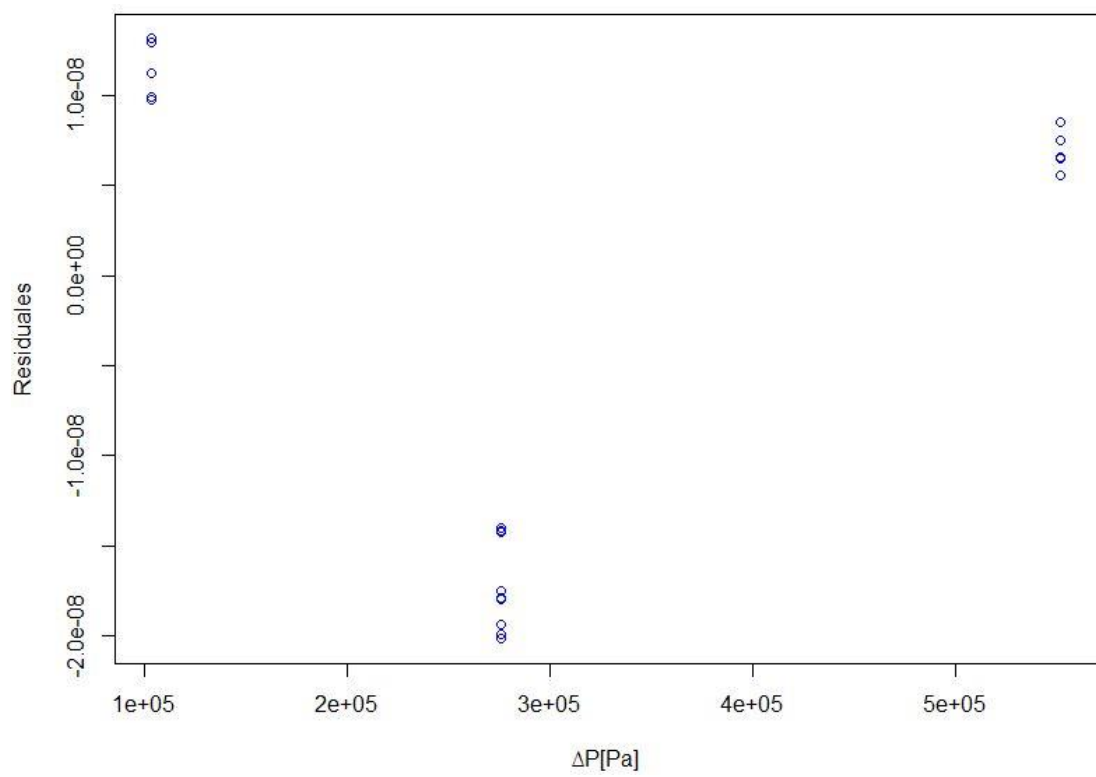


Figura D2: Residuales vs Temperatura modelo 1 capilar 50 μm

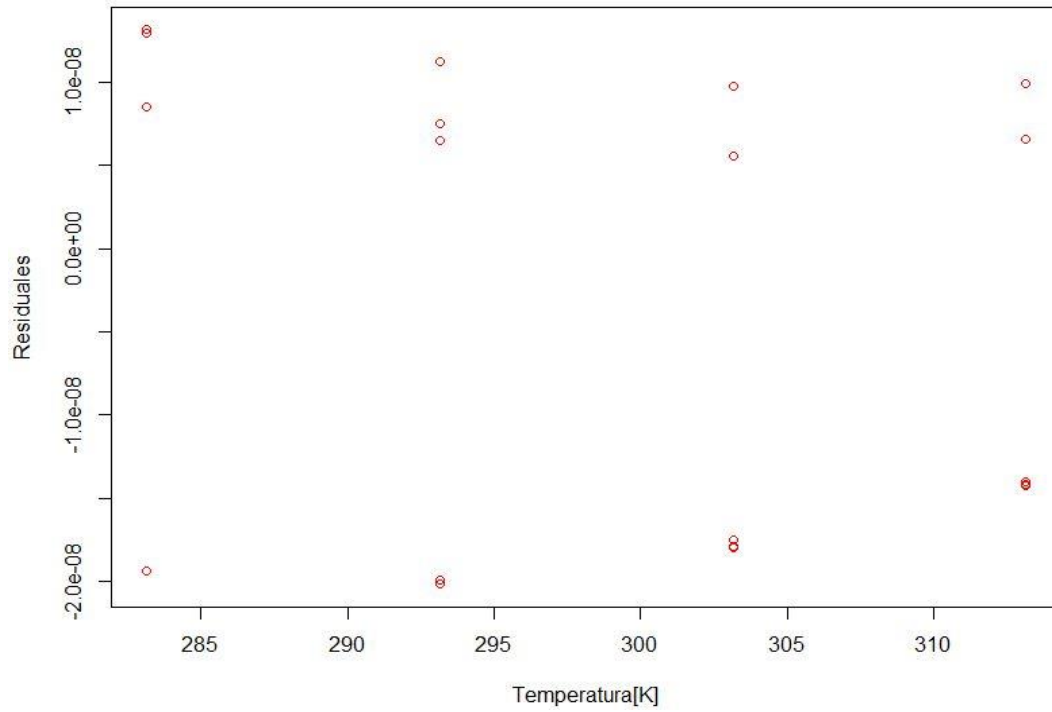
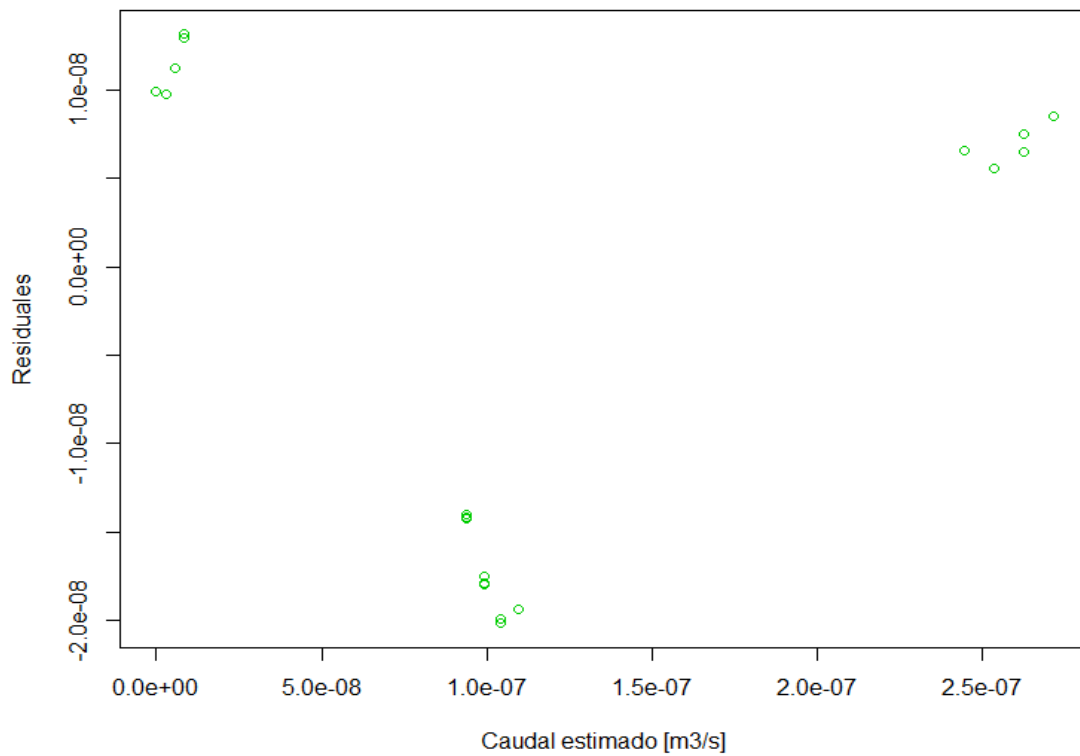


Figura D3: Residuales vs Caudal estimado modelo 1 capilar 50 μm



- Modelo 2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Figura D4: Residuales vs ΔP modelo 2 capilar 50 μm

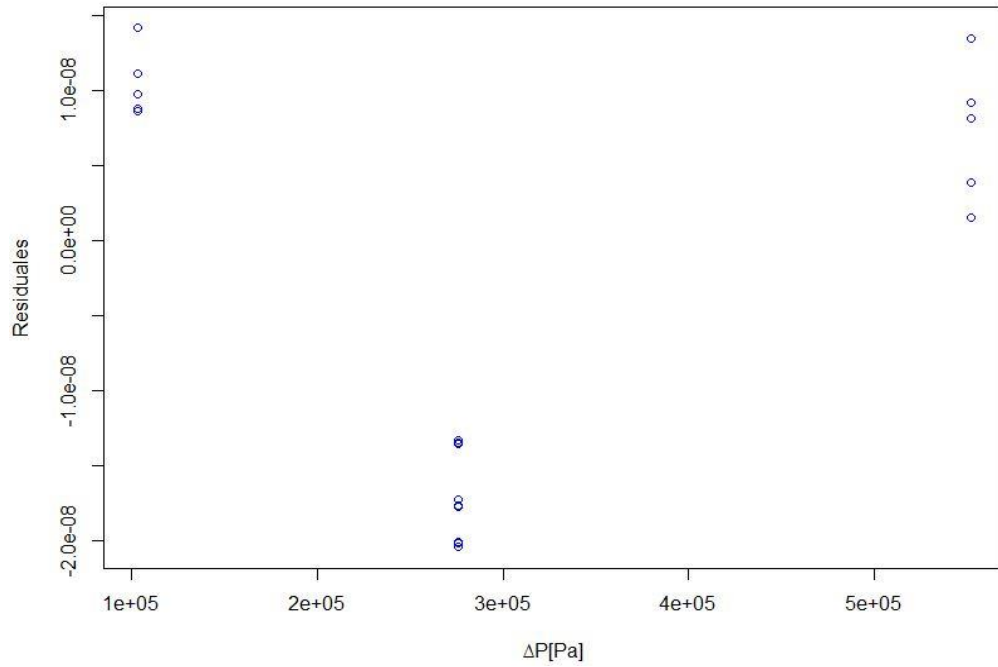


Figura D5: Residuales vs Temperatura modelo 2 capilar 50 μm

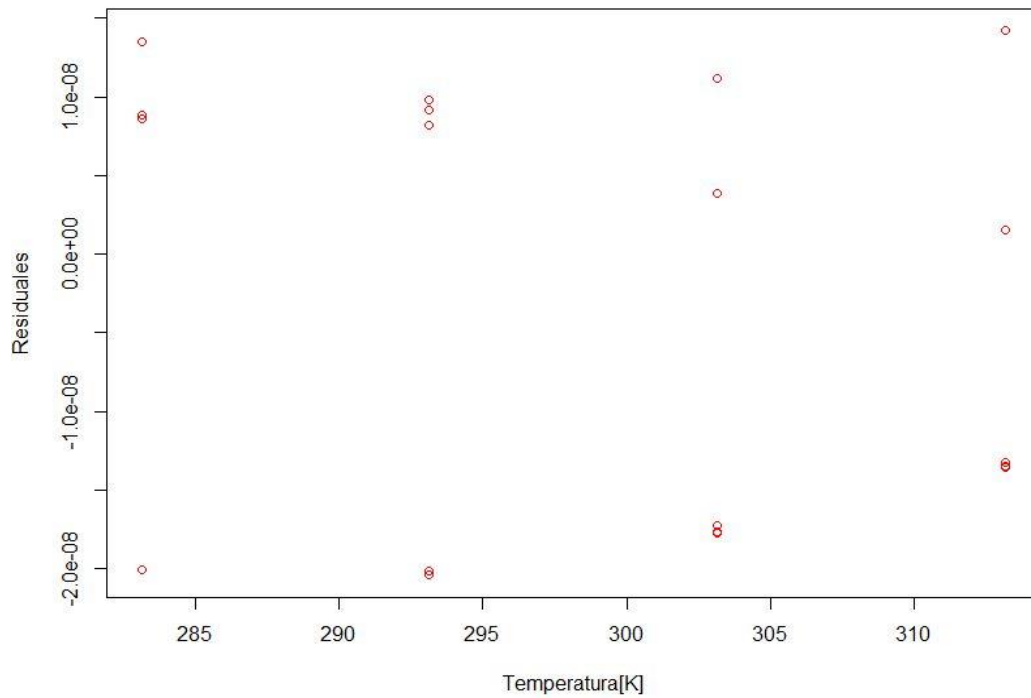
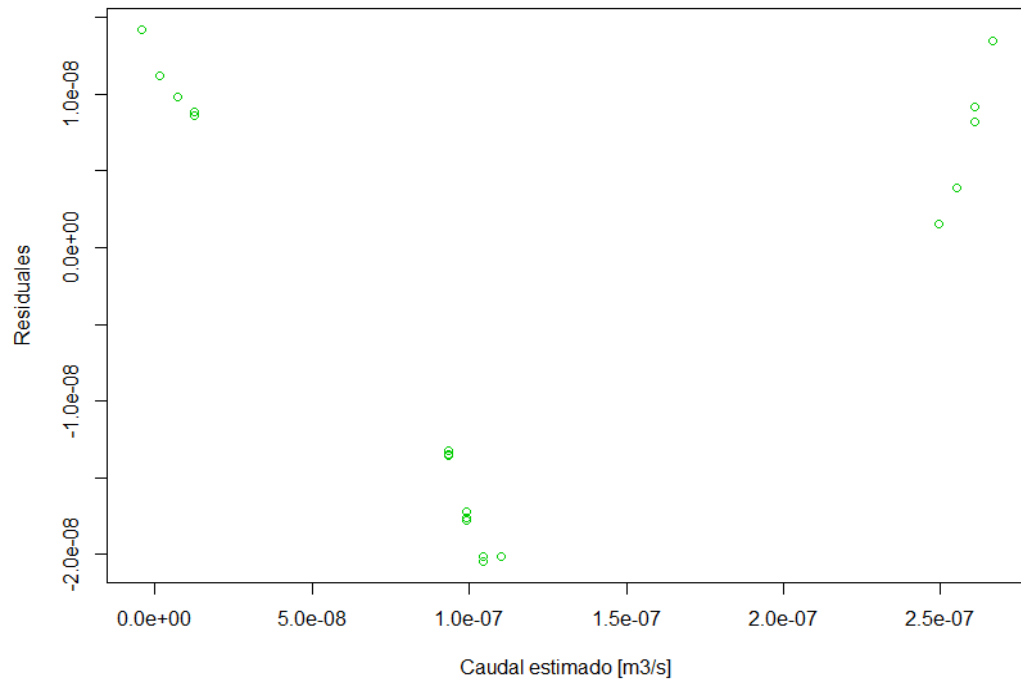


Figura D6: Residuales vs Caudal estimado modelo 2 capilar 50 μm



- Modelo 3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura D7: Residuales vs ΔP modelo 3 capilar 50 μm

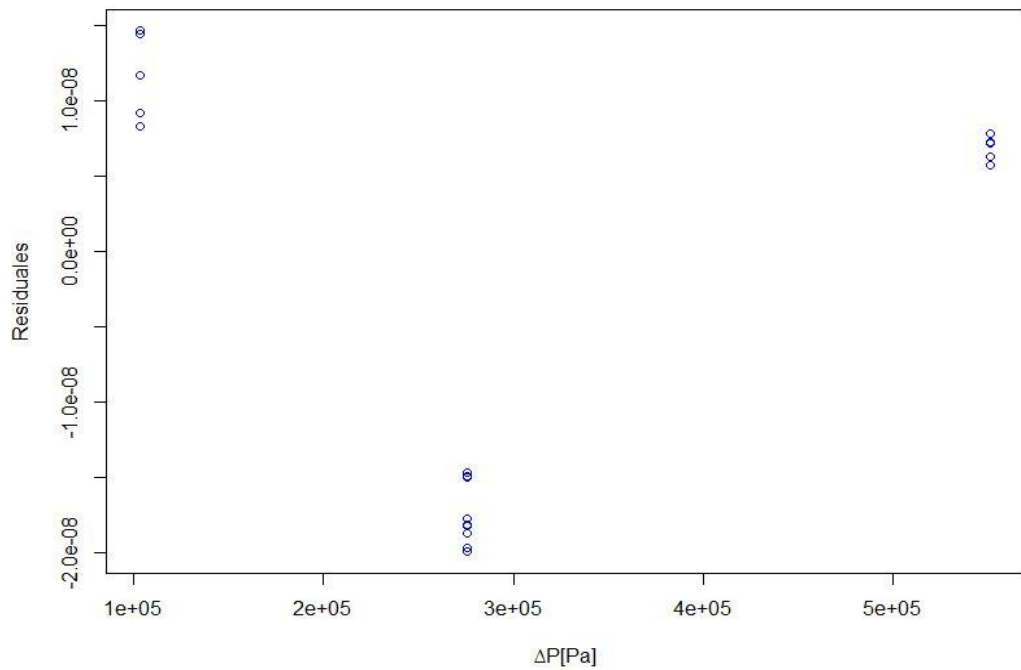


Figura D8: Residuales vs Temperatura modelo 3 capilar 50 μm

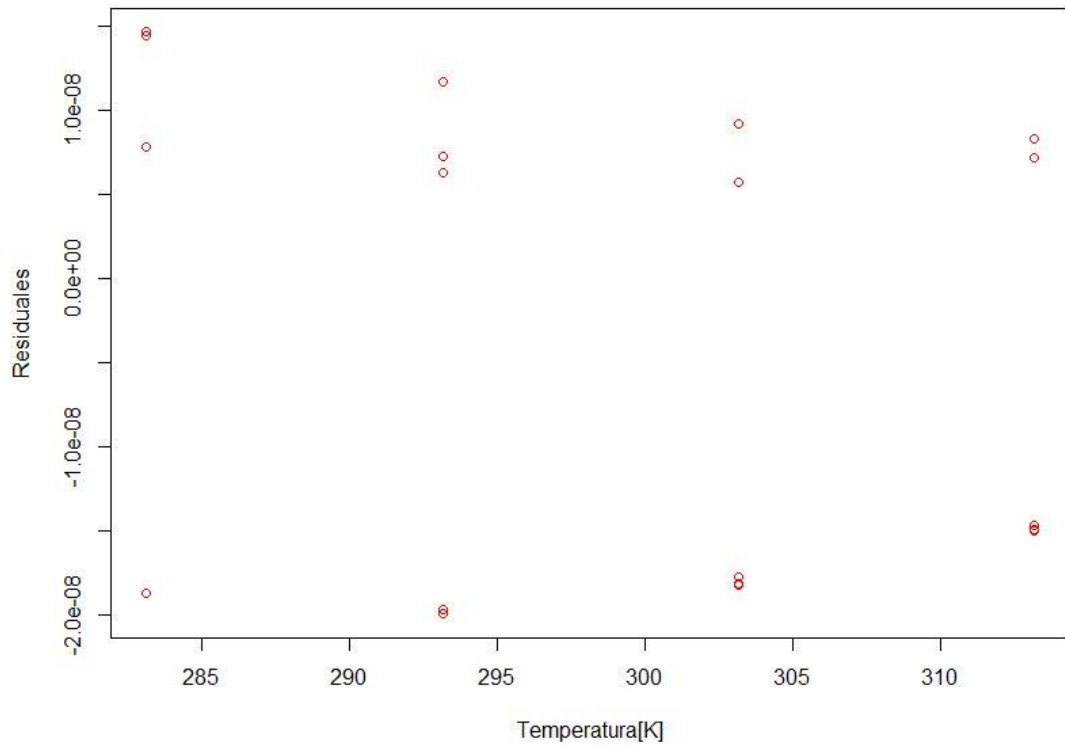
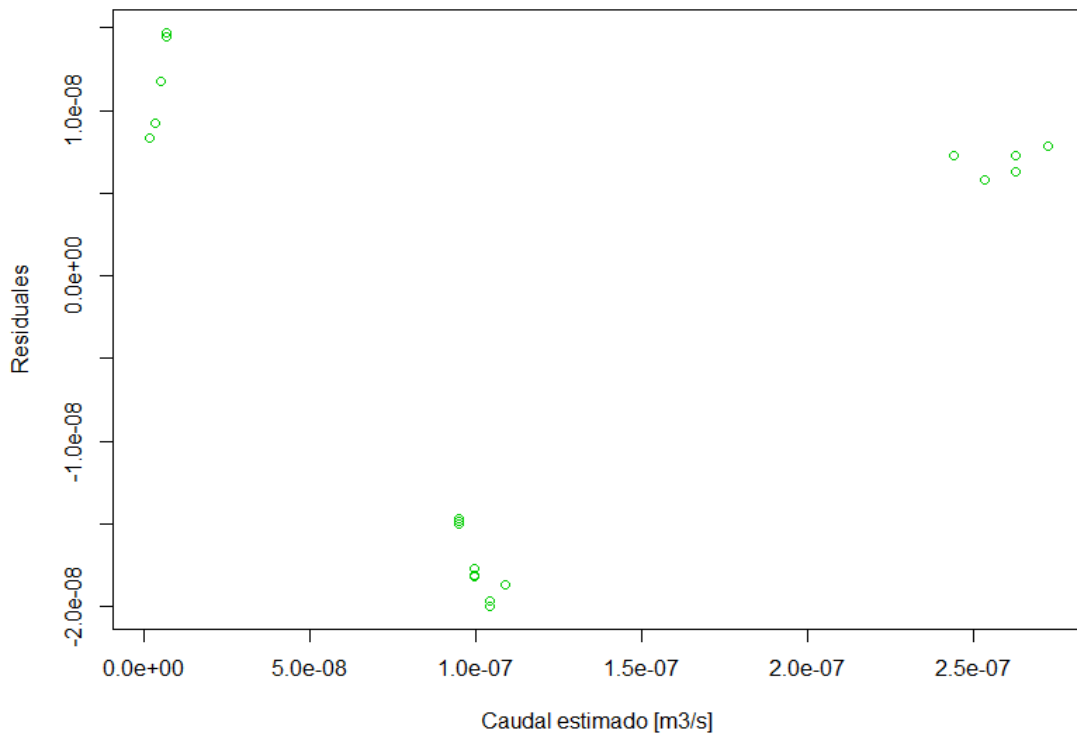


Figura D9: Residuales vs Caudal estimado modelo 3 capilar 50 μm



- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura D10: Residuales vs ΔP modelo 4 capilar 50 μm

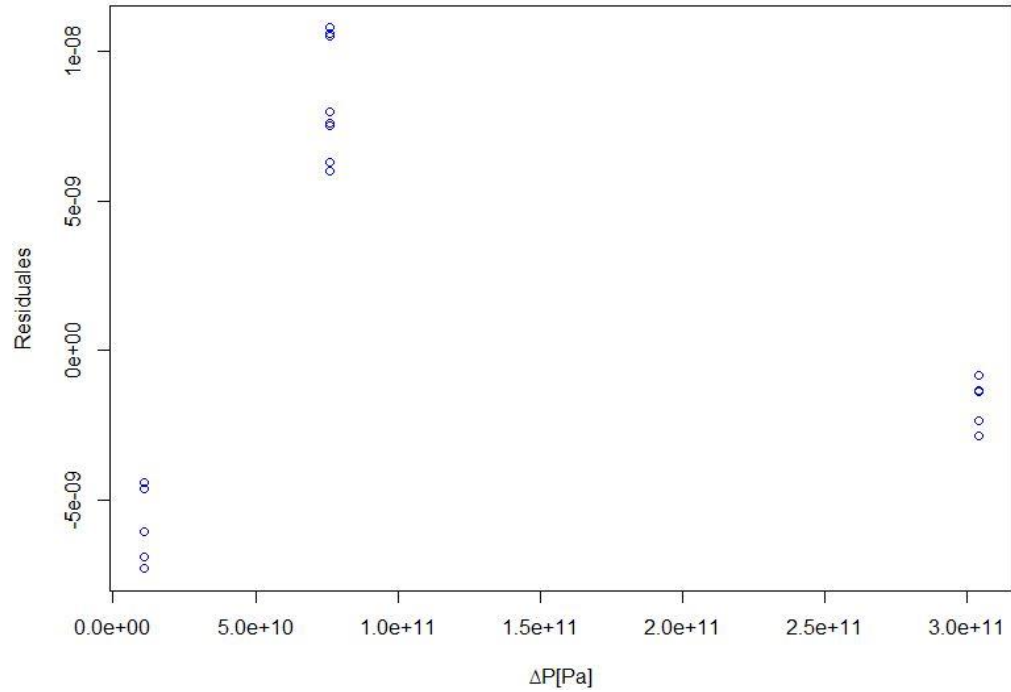


Figura D11: Residuales vs Temperatura modelo 4 capilar 50 μm

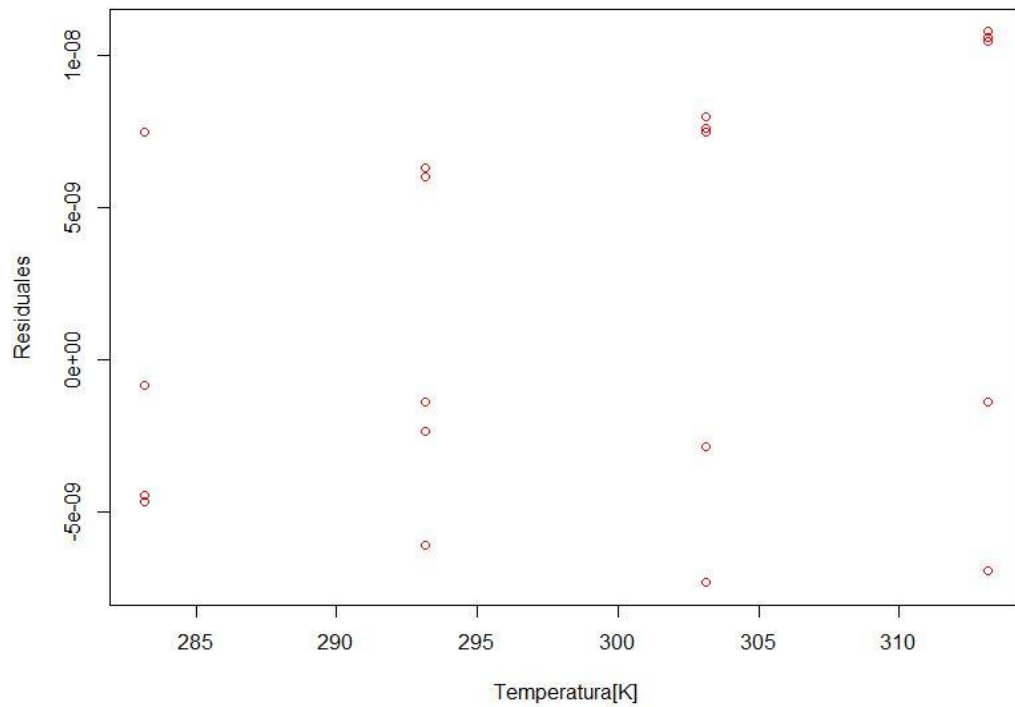
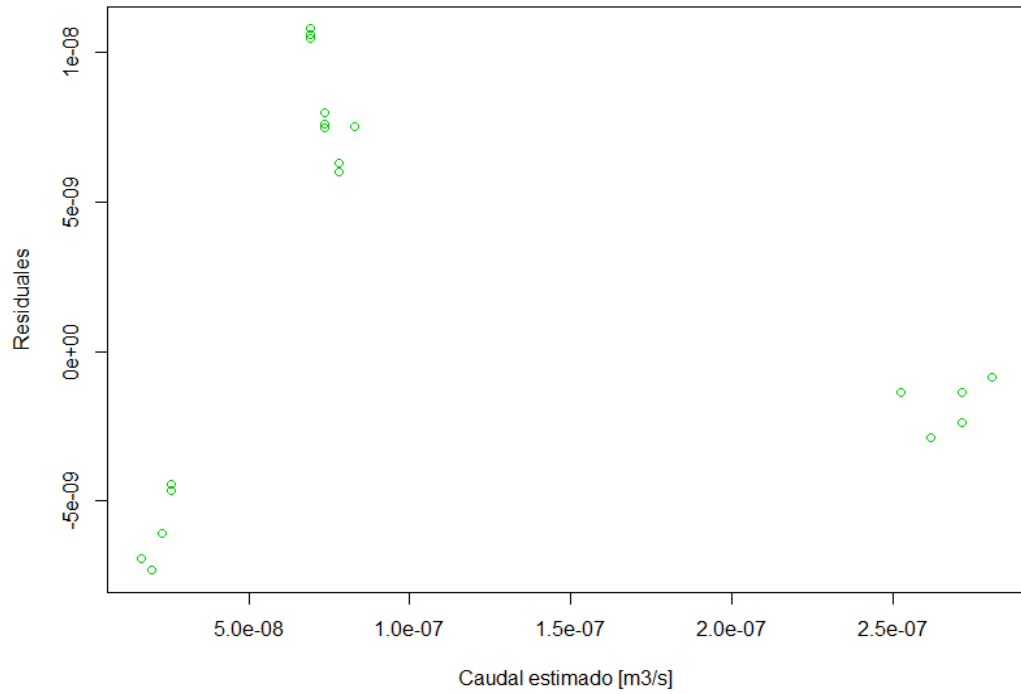


Figura D12: Residuales vs Caudal estimado modelo 4 capilar 50 μm



- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Figura D13: Residuales vs ΔP modelo 5 capilar 50 μm

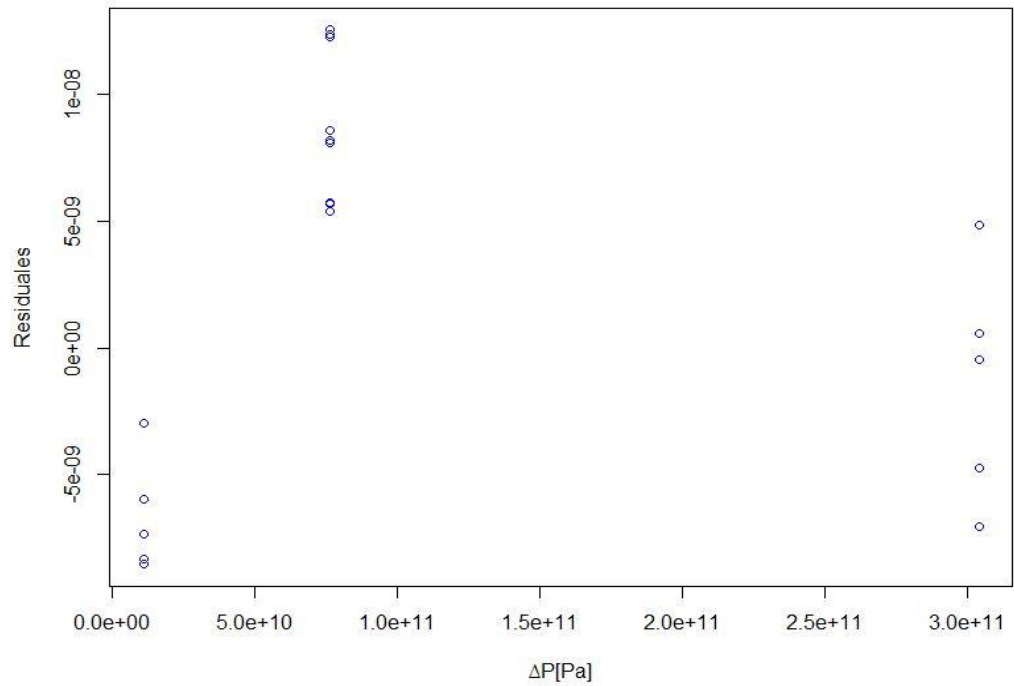


Figura D14: Residuales vs Temperatura modelo 5 capilar 50 μm

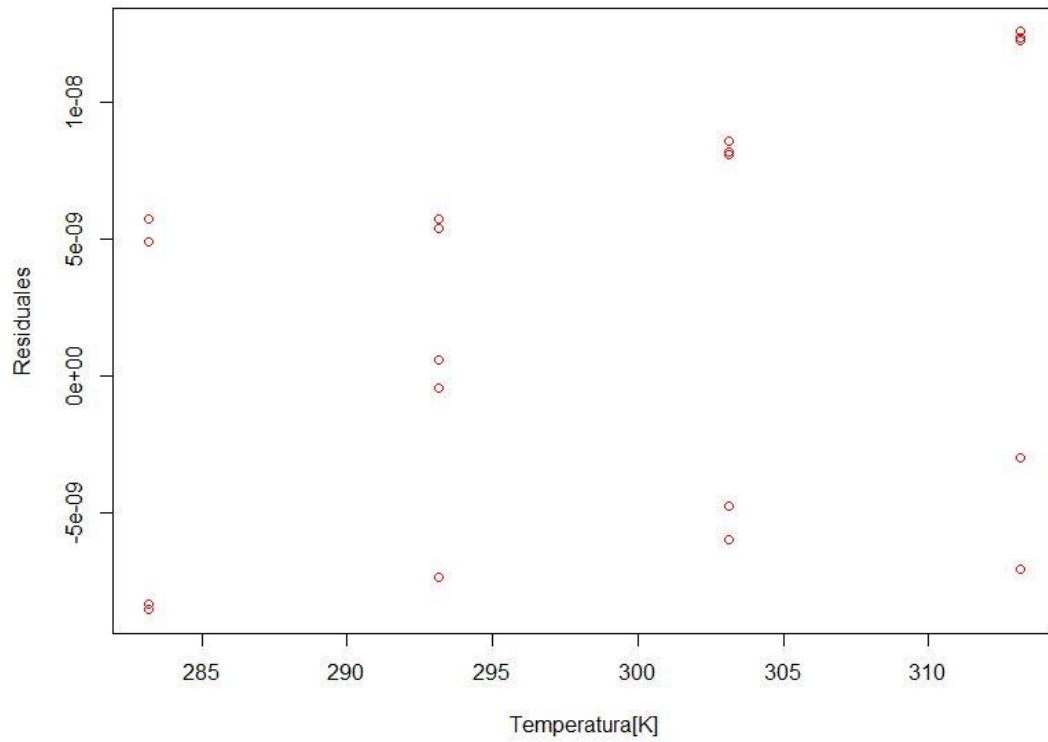
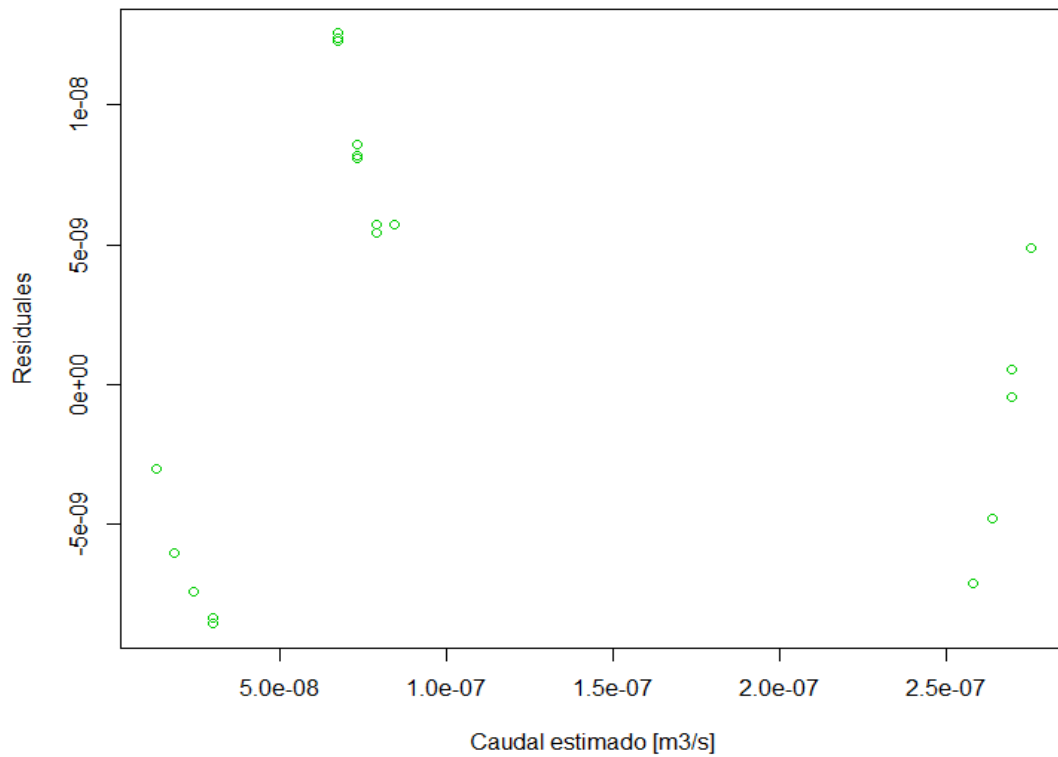


Figura D15: Residuales vs Caudal ajustado modelo 5 capilar 50 μm



- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura D16: Residuales vs ΔP modelo 6 capilar 50 μm

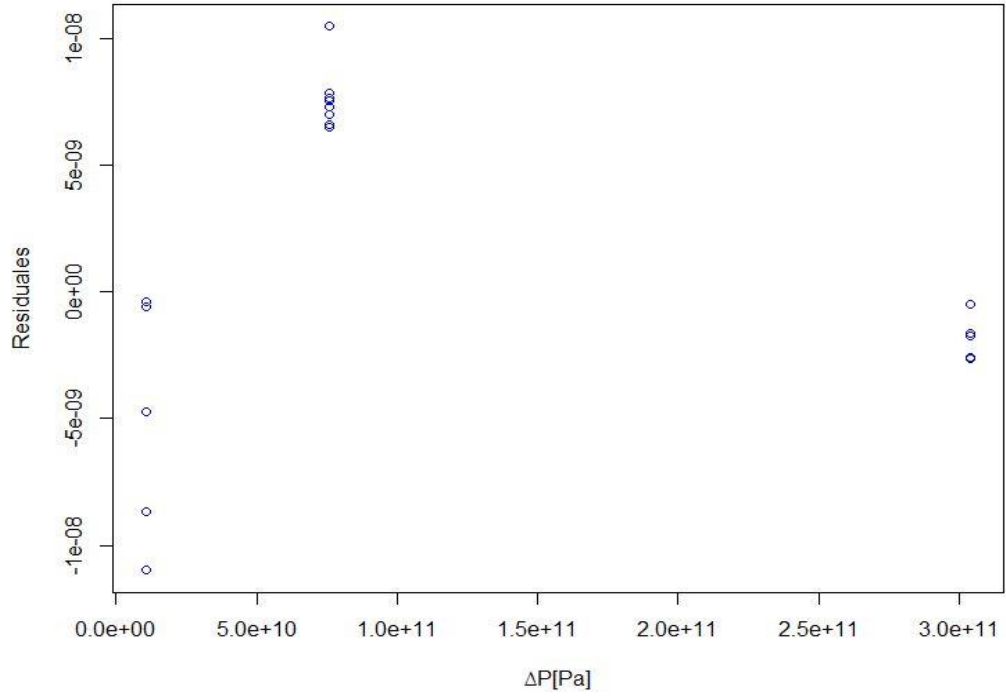


Figura D17: Residuales vs Temperatura modelo 6 capilar 50 μm

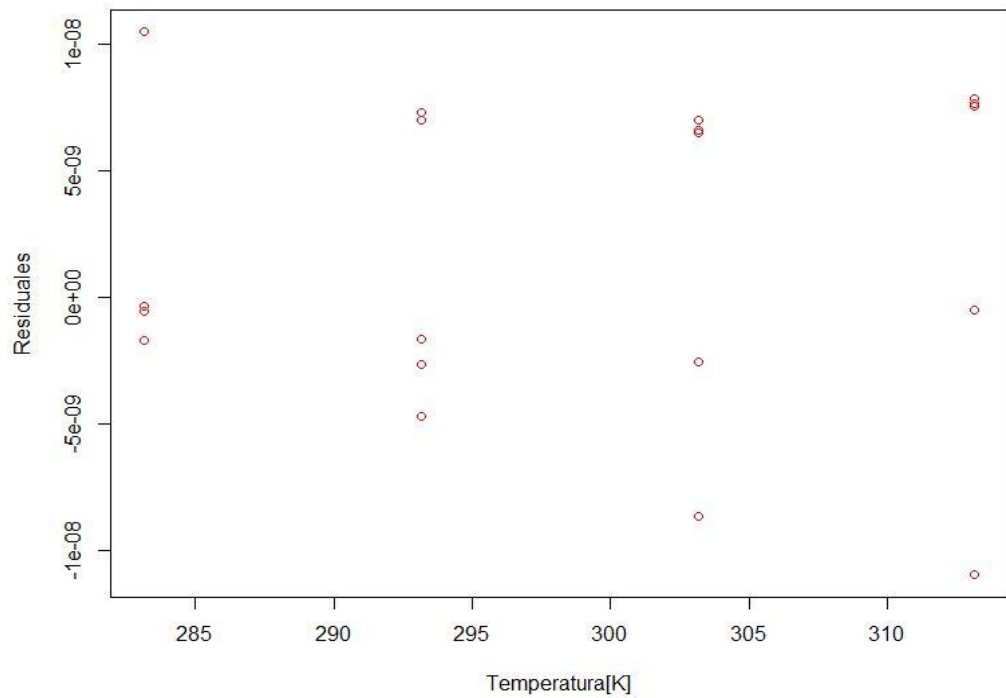
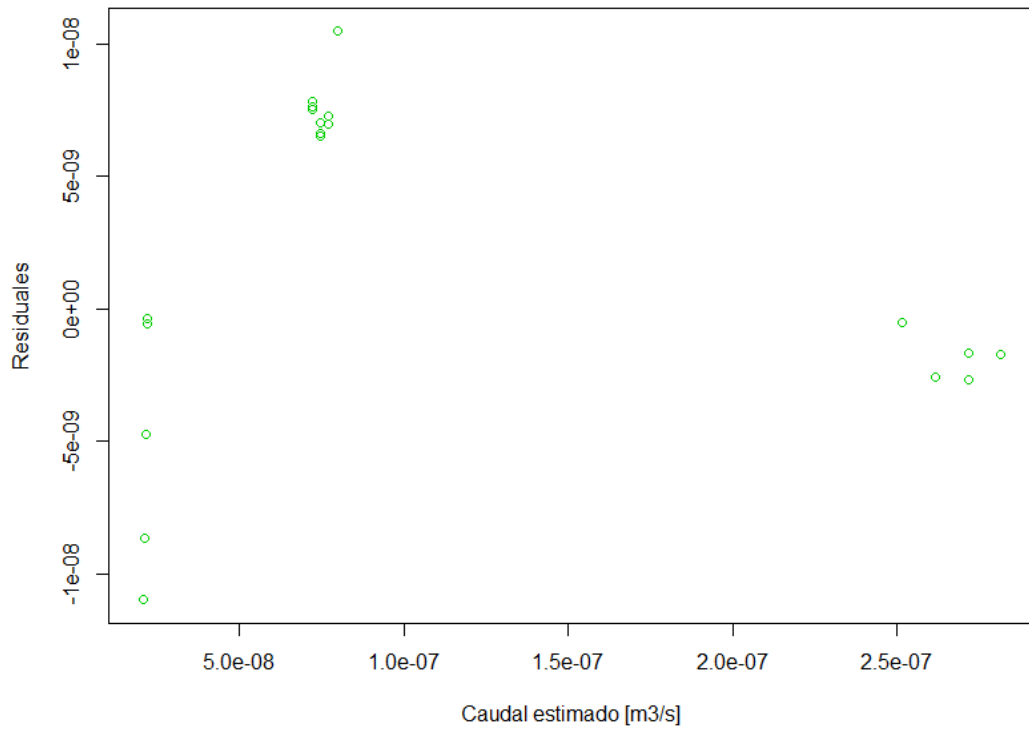


Figura D18: Residuales vs Caudal estimado modelo 6 capilar 50 μm



CAPILAR 75 μm

- Modelo1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura D19: Residuales vs ΔP modelo 1 capilar 75 μm

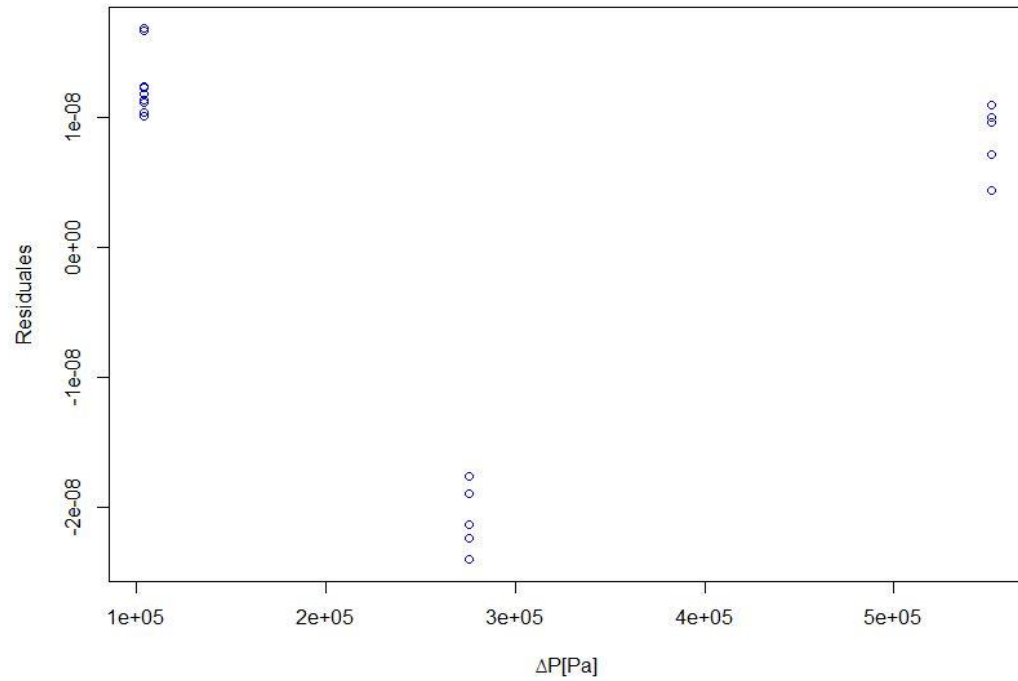


Figura D20: Residuales vs Temperatura modelo 1 capilar 75 μm

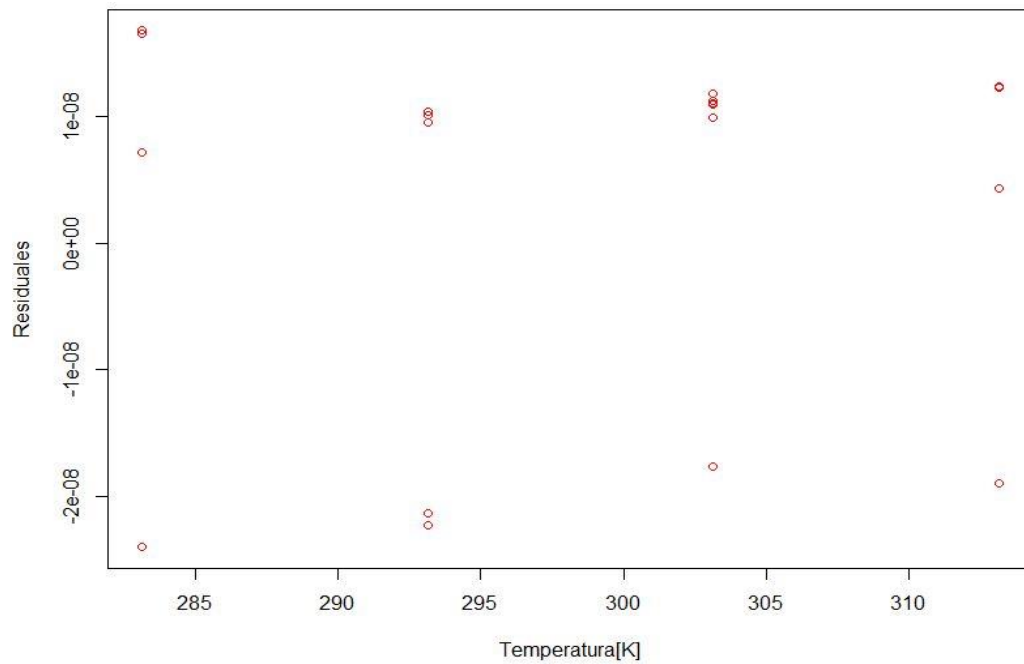
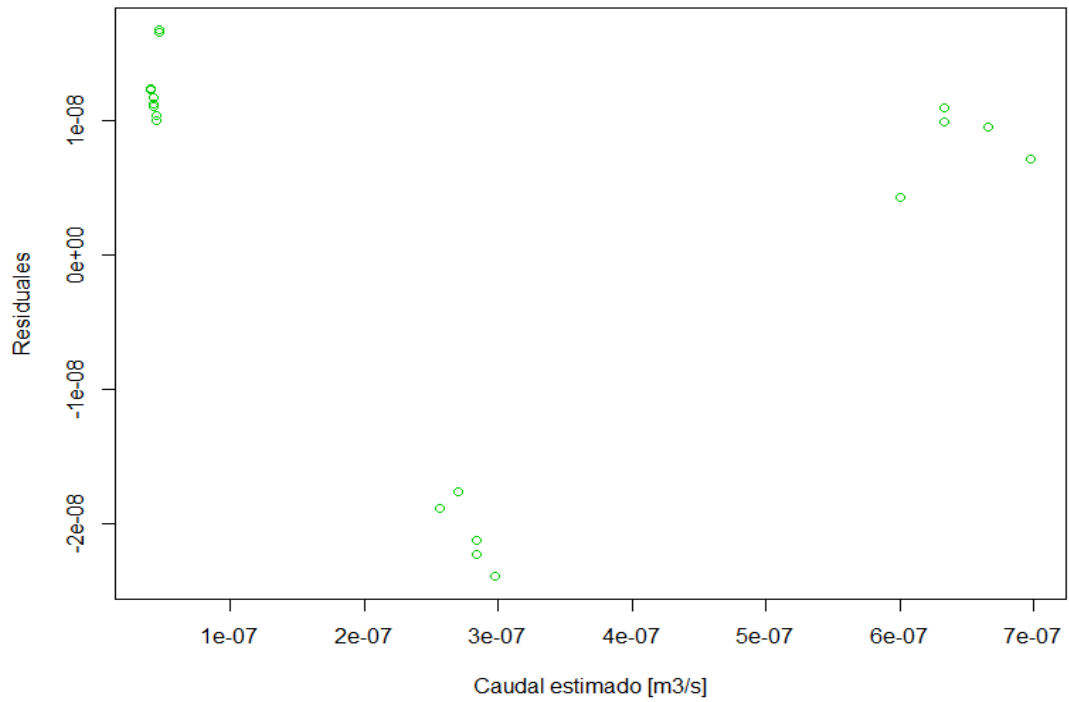


Figura D21: Residuales vs Caudal estimado modelo 1 capilar 75 μm



- Modelo2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Figura D22: Residuales vs ΔP modelo 2 capilar 75 μm

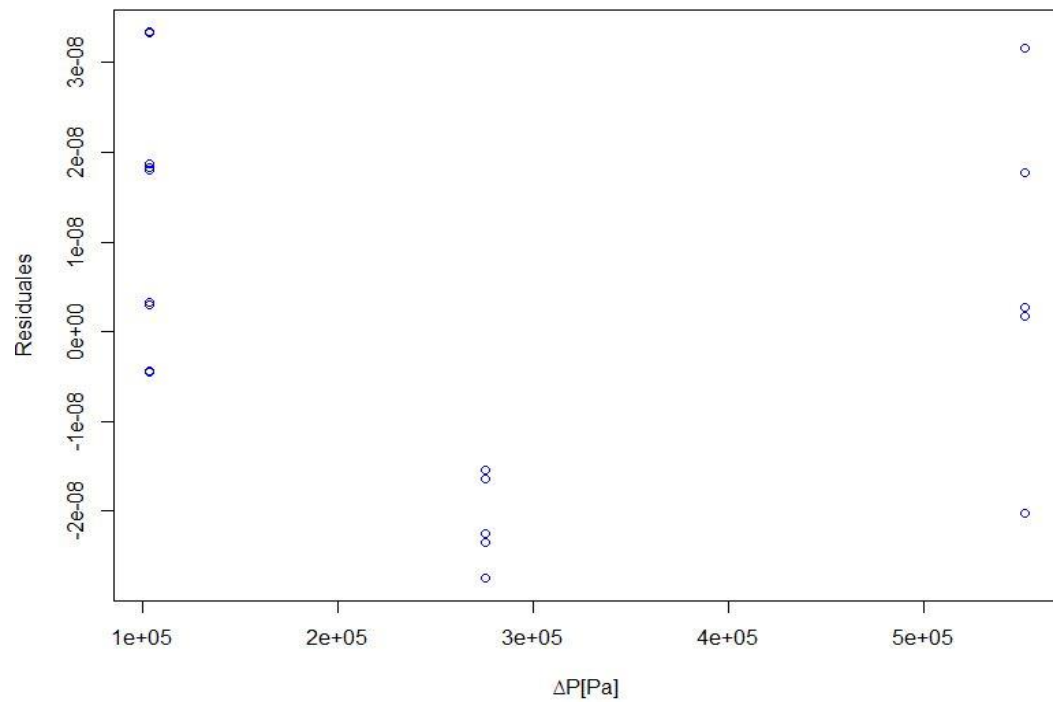


Figura D23: Residuales vs Temperatura modelo 2 capilar 75 μ m

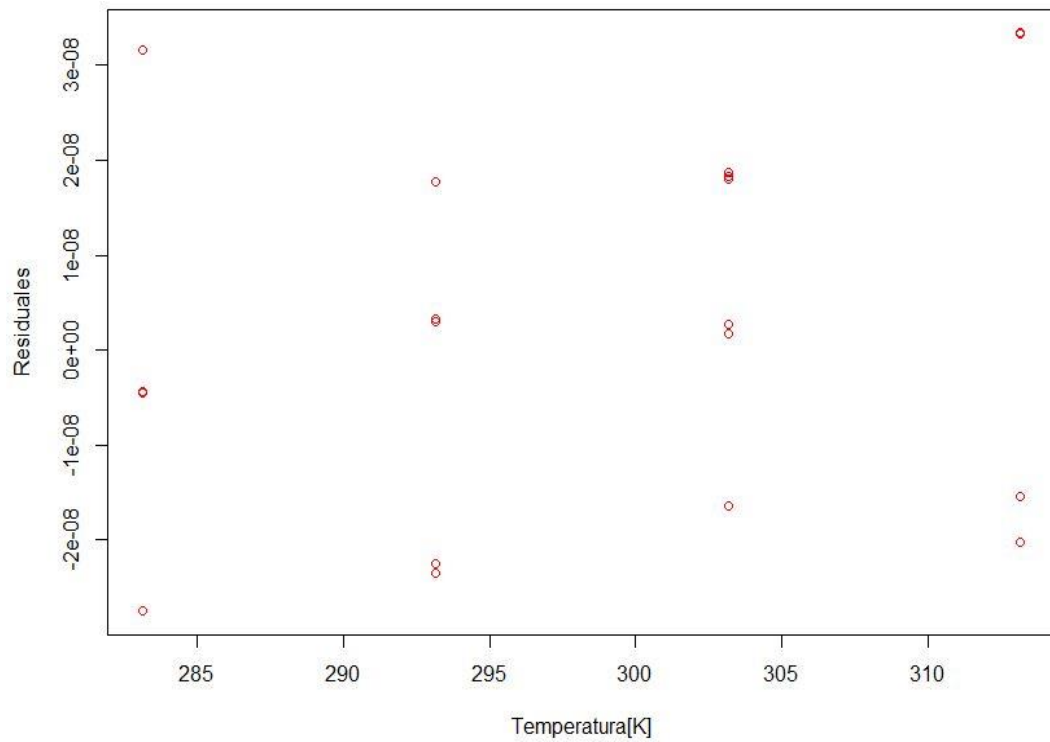
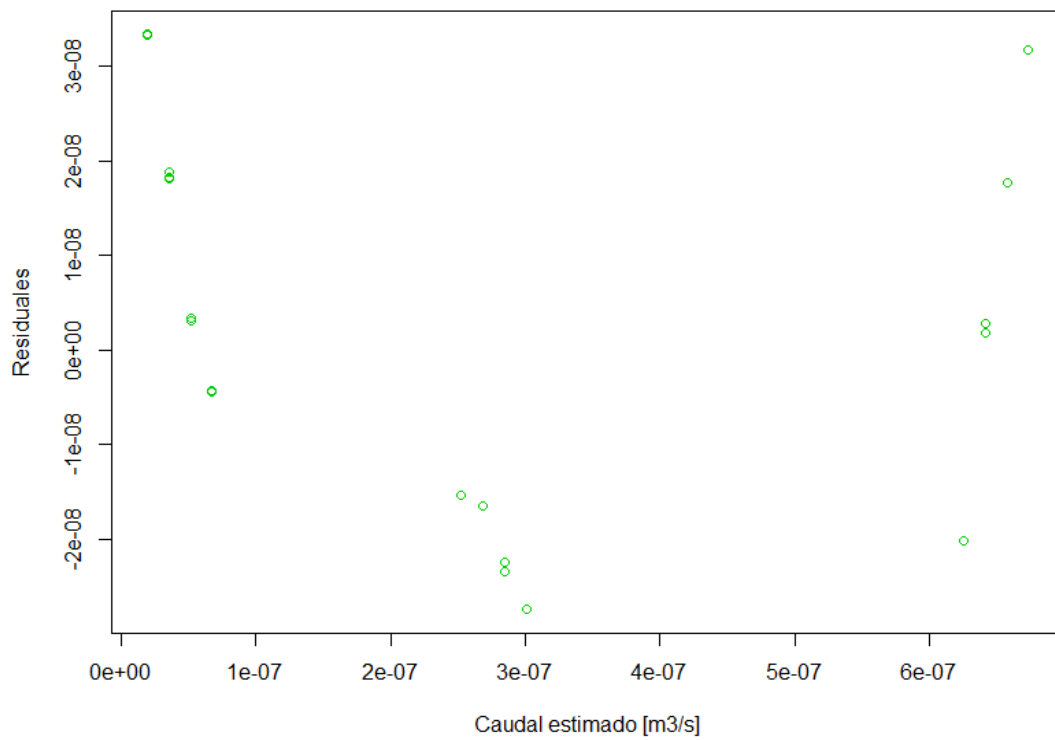


Figura D24: Residuales vs Caudal estimado modelo 2 capilar 75 μ m



- Modelo3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura D25: Residuales vs ΔP modelo 3 capilar 75 μm

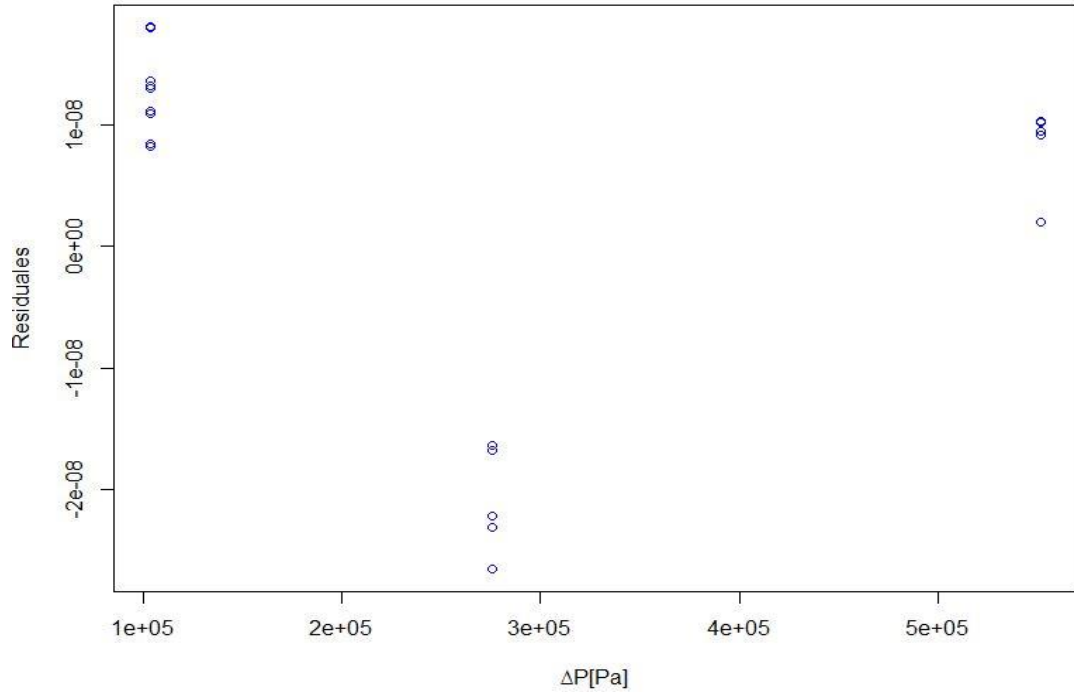


Figura D26: Residuales vs Temperatura modelo 3 capilar 75 μm

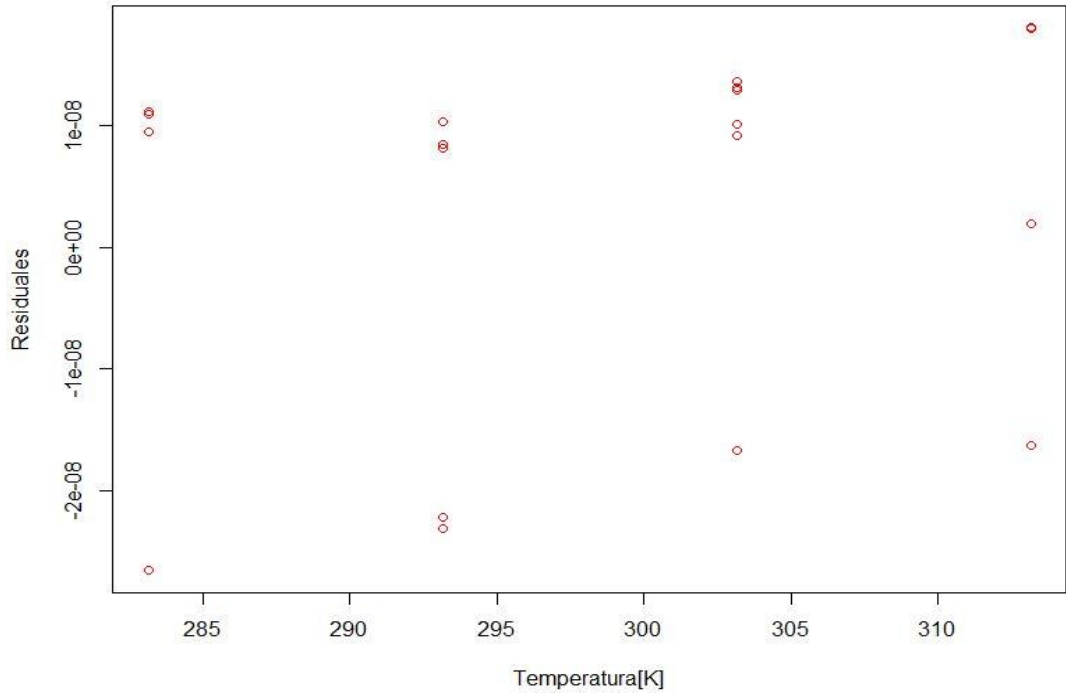
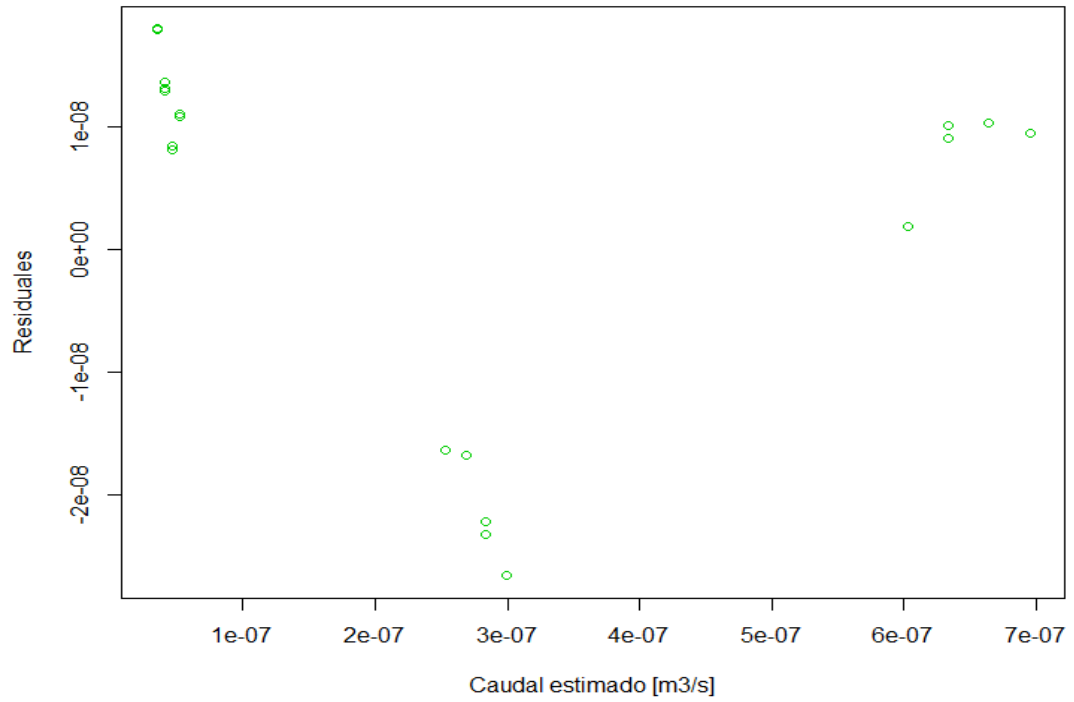


Figura D27: Residuales vs Caudal estimado modelo 3 capilar 75 μm



- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura D28: Residuales vs ΔP modelo 4 capilar 75 μm

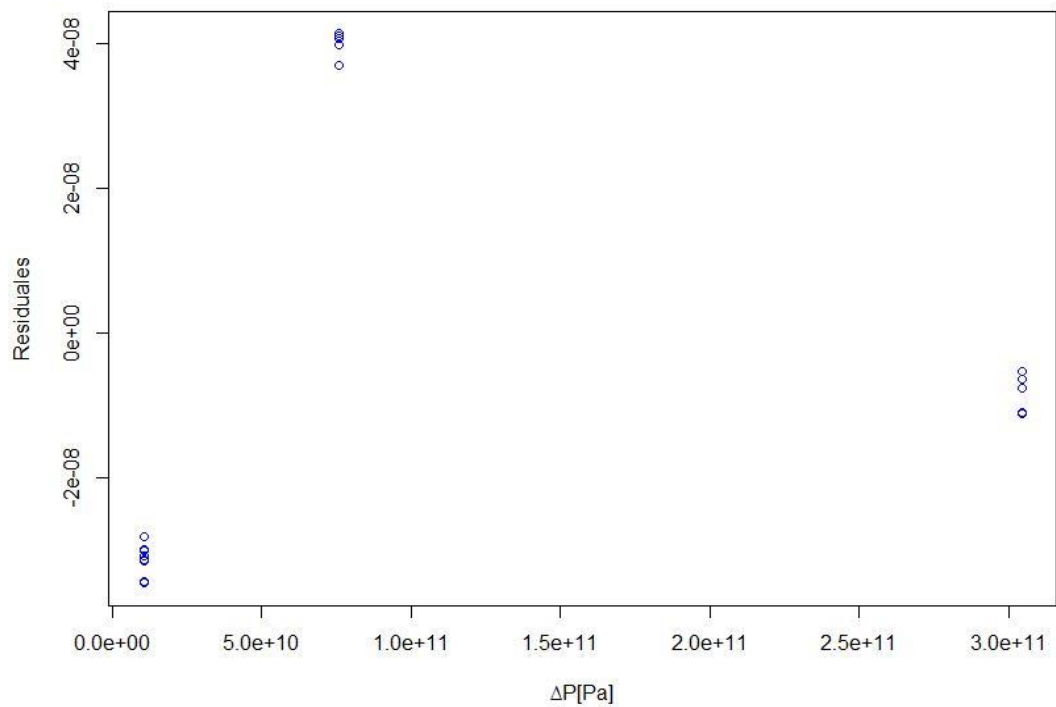


Figura D29: Residuales vs Temperatura modelo 4 capilar 75 μm

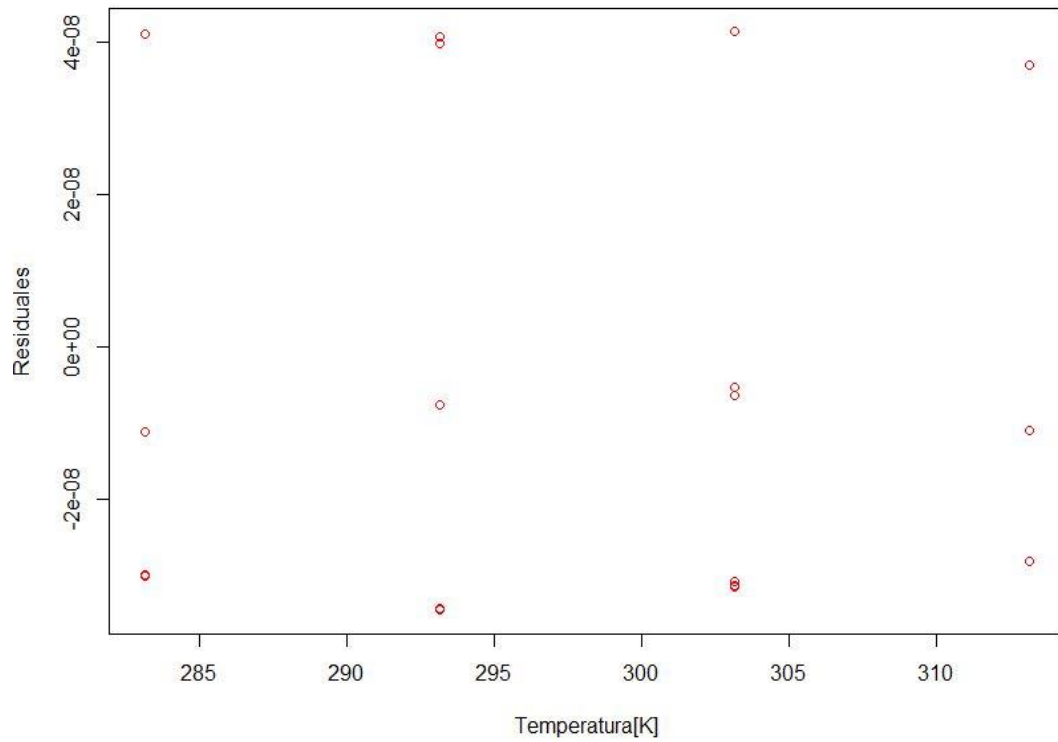
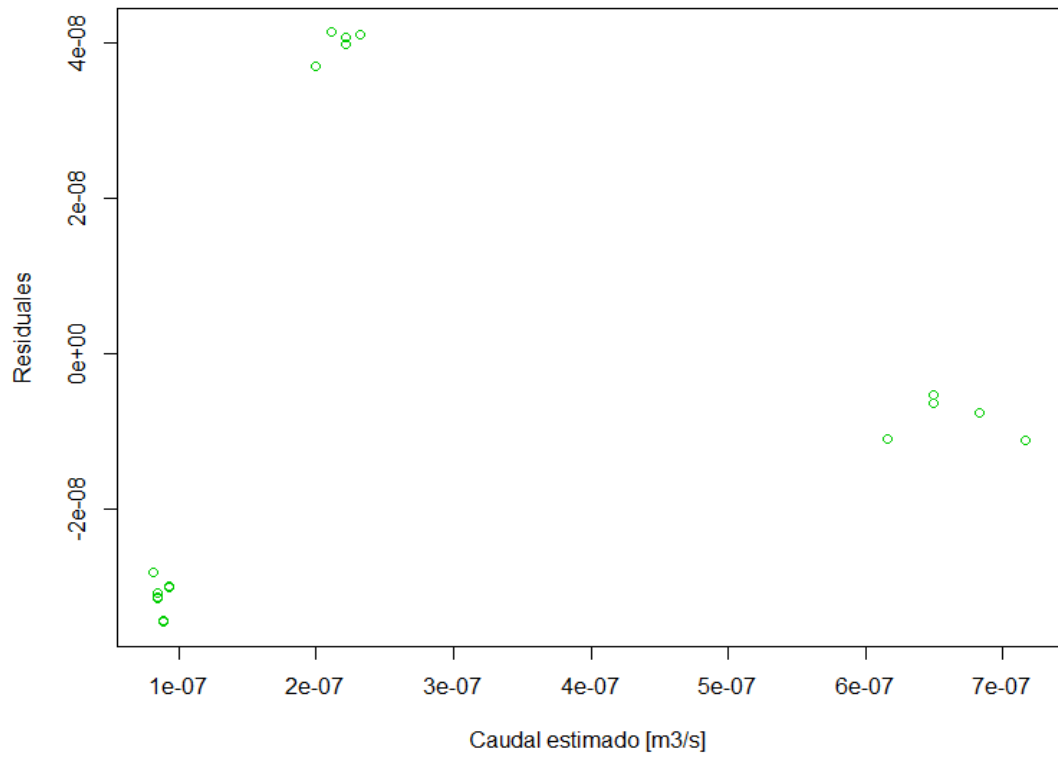


Figura D30: Residuales vs Caudal estimado modelo 4 capilar 75 μm



- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Figura D31: Residuales vs ΔP modelo 5 capilar 75 μm

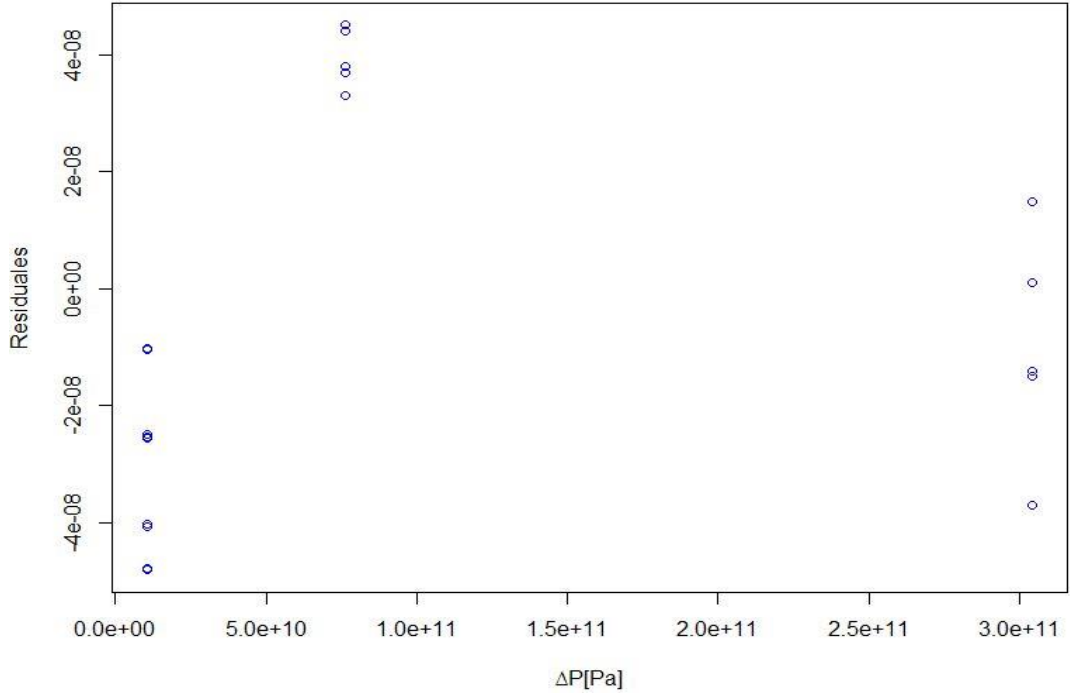


Figura D32: Residuales vs Temperatura modelo 5 capilar 75 μm

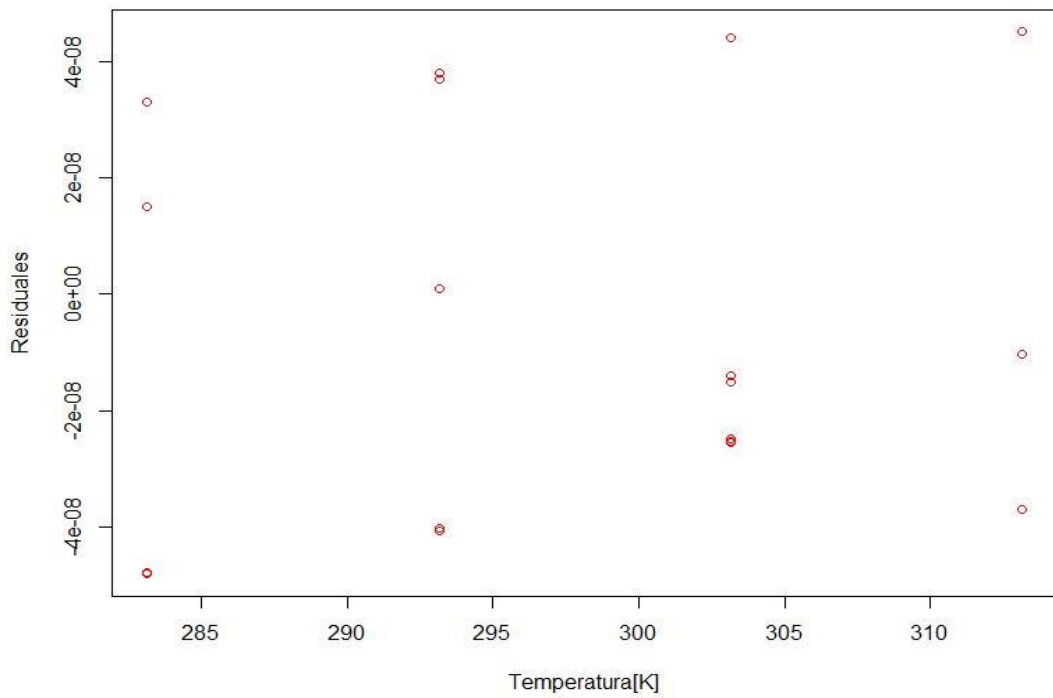
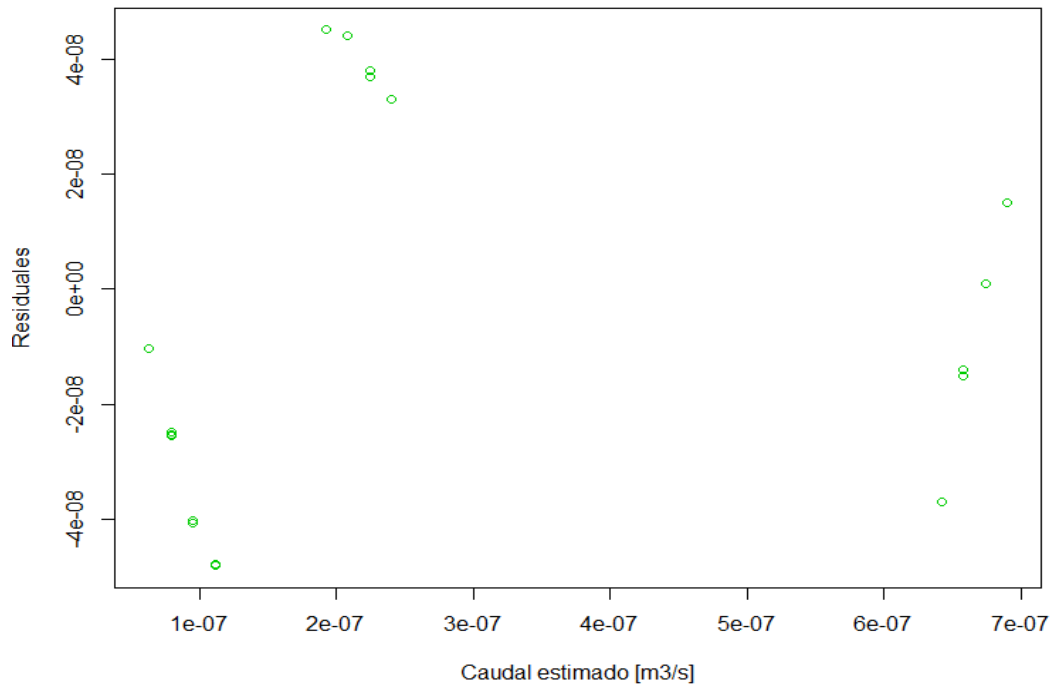


Figura D33: Residuales vs Caudal estimado modelo 5 capilar 75 μm



- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura D34: Residuales vs ΔP modelo 6 capilar 75 μm

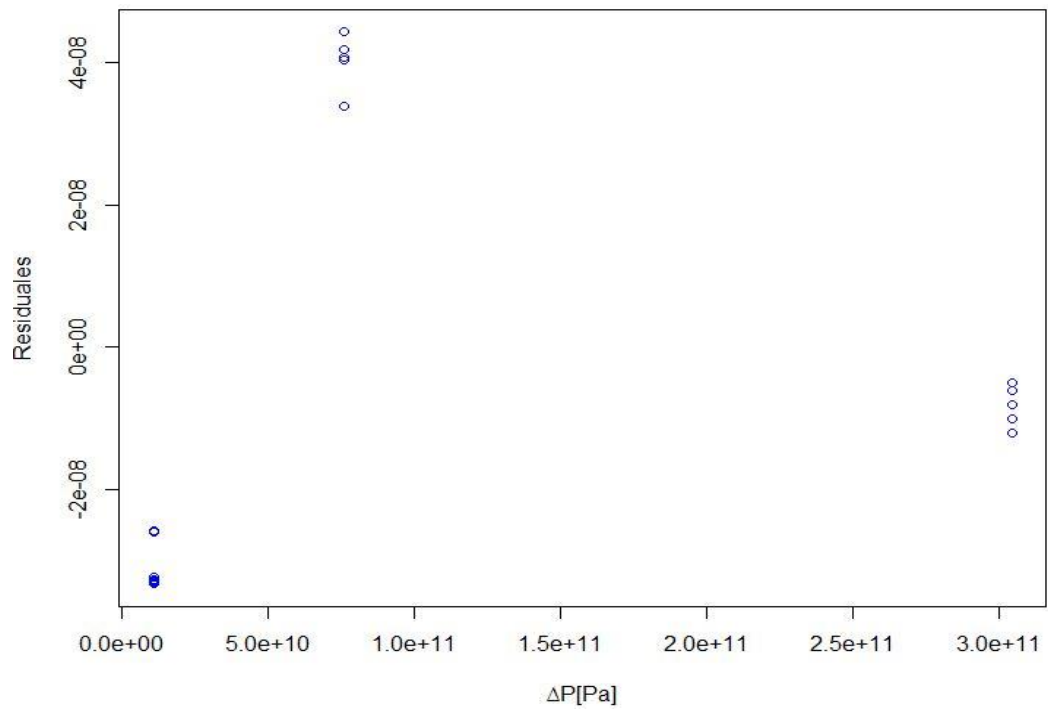


Figura D35: Residuales vs Temperatura modelo 6 capilar 75 μm

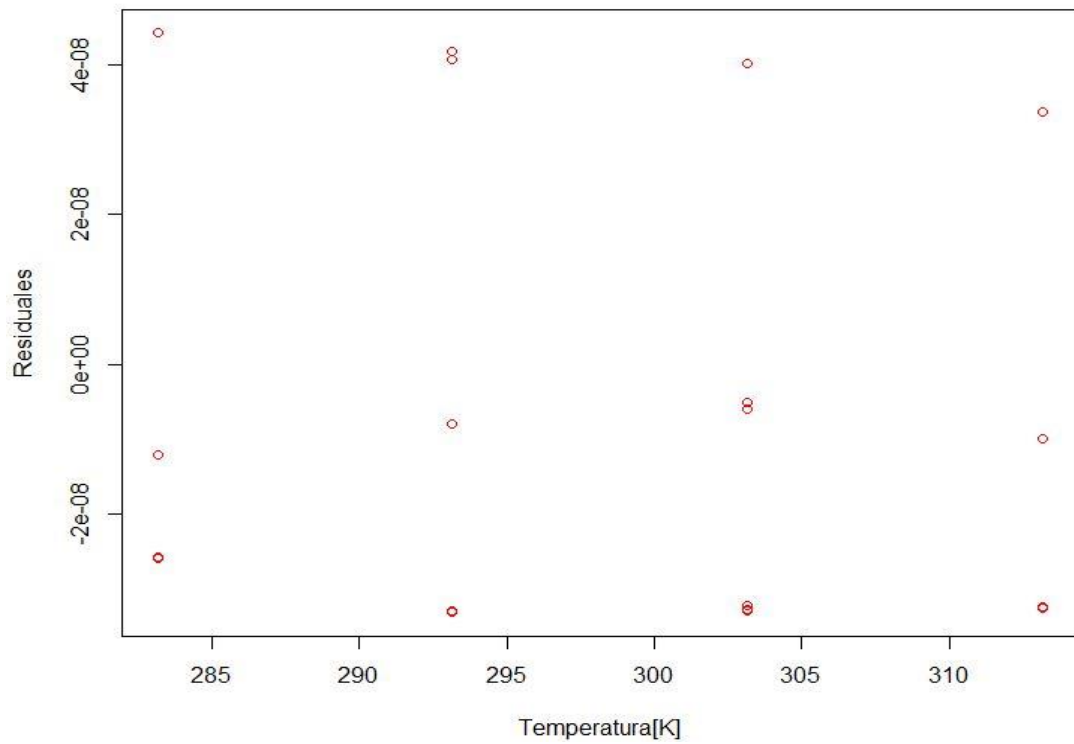
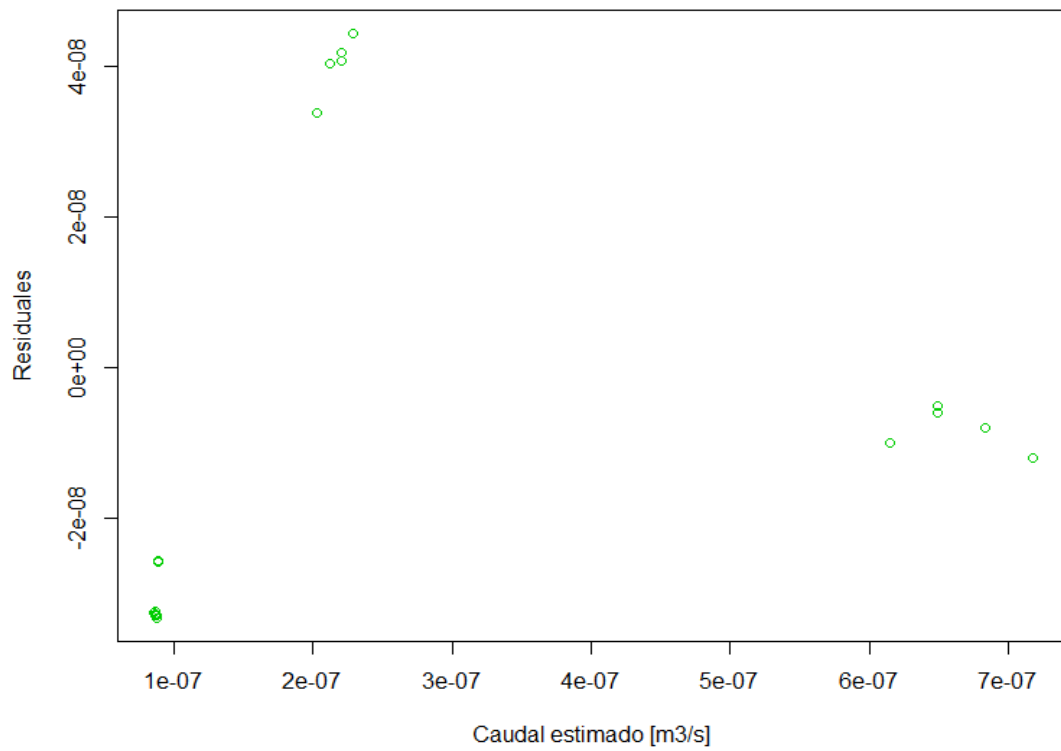


Figura D36: Residuales vs Caudal estimado modelo 6 capilar 75 μm



ANEXO E: GRÁFICAS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DE LOS MODELOS

CAPILAR 50 μm

- Modelo1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura E1: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 1 capilar 50 μm

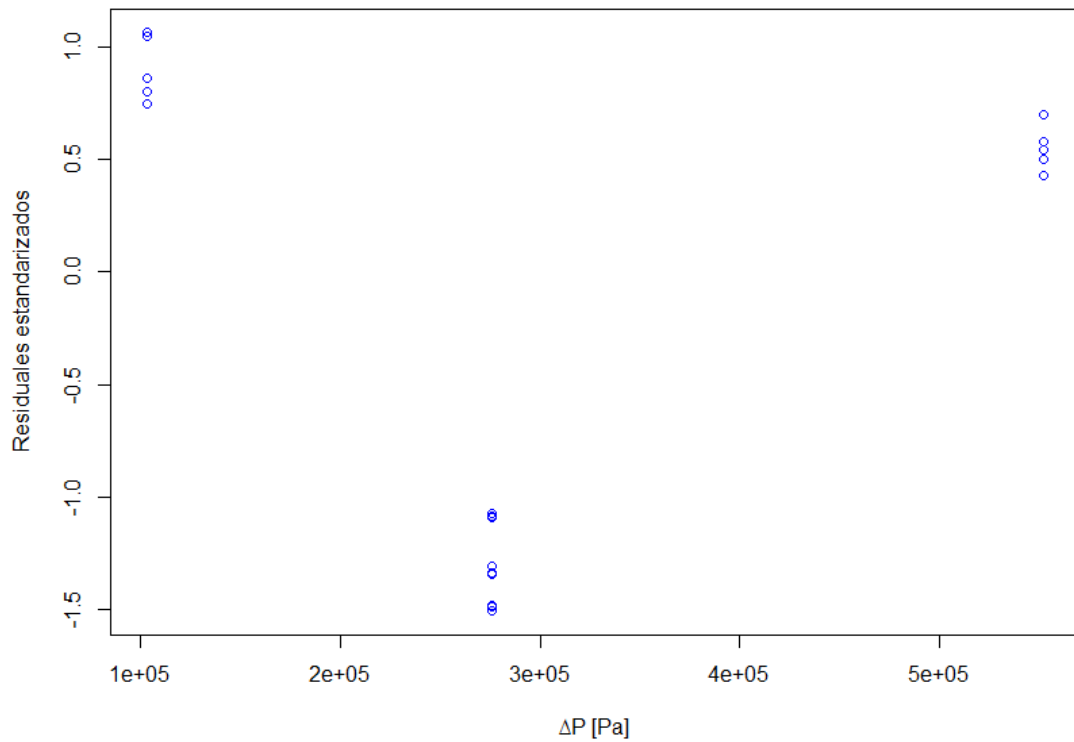


Figura E2: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 1 capilar 50 μm

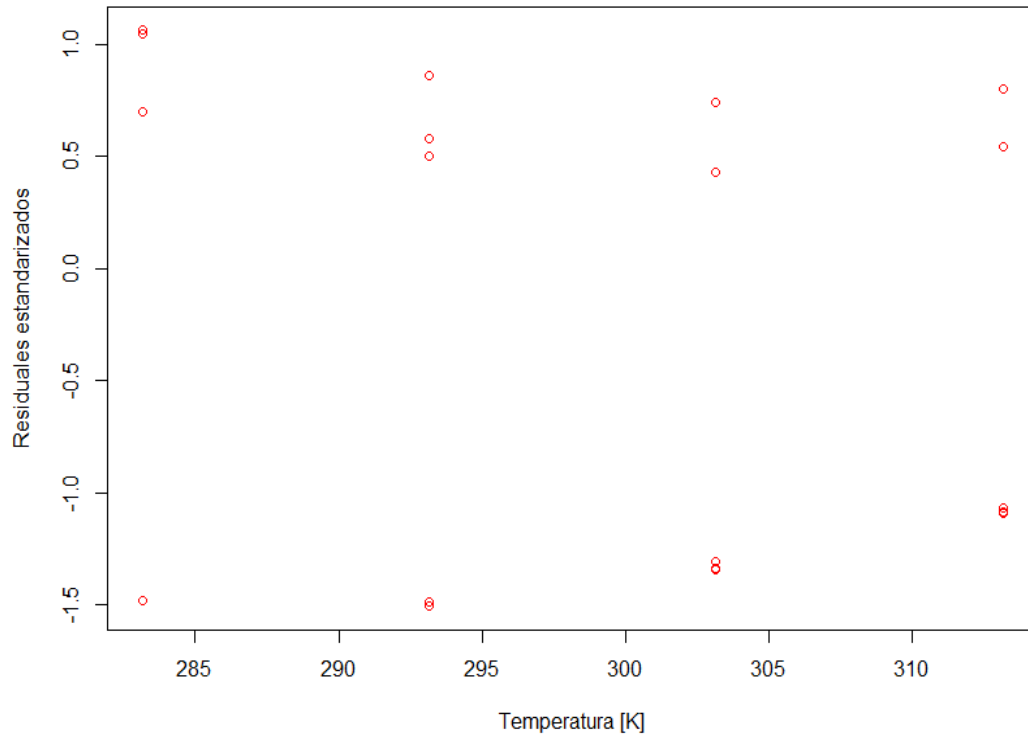
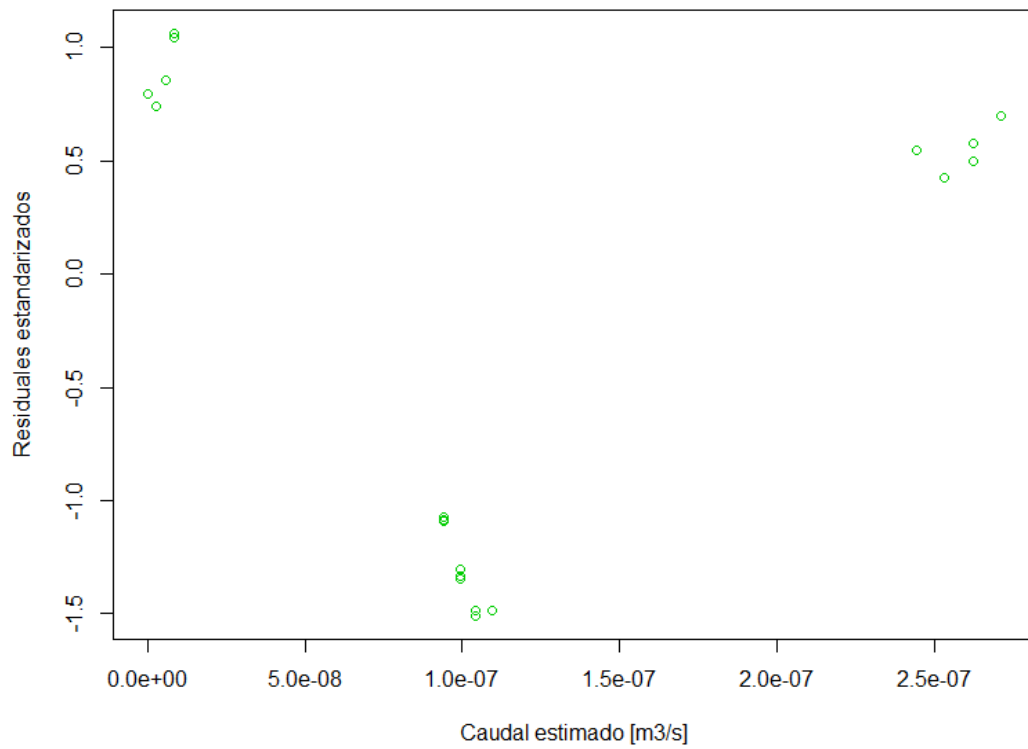


Figura E3: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 1 capilar 50 μm



- Modelo2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Figura E4: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 2 capilar 50 μm

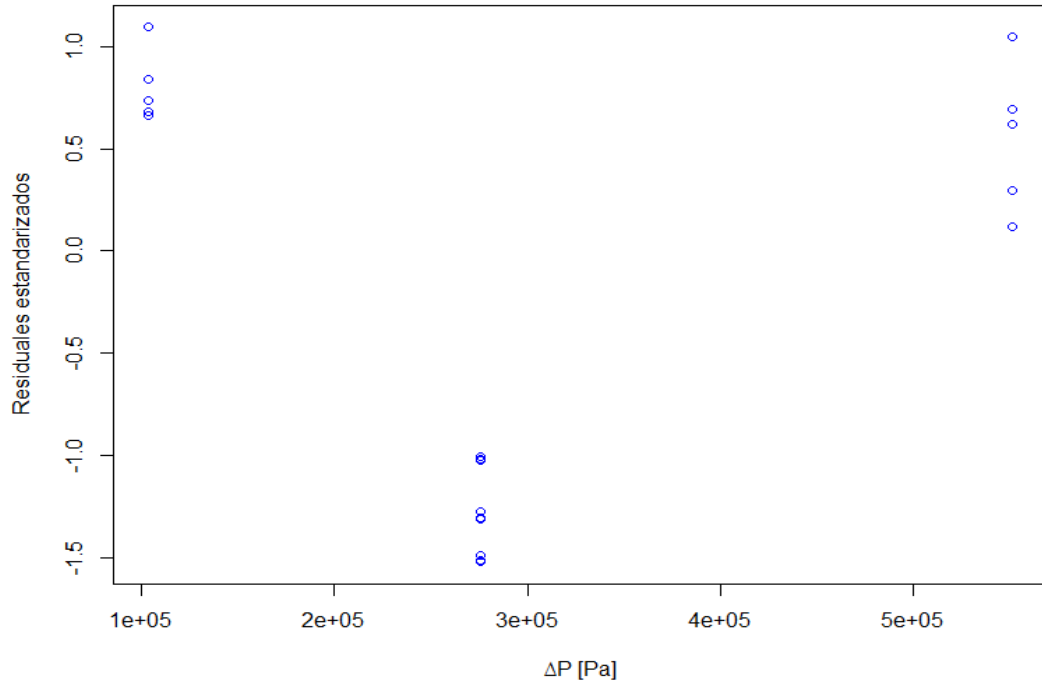


Figura E5: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 2 capilar 50 μm

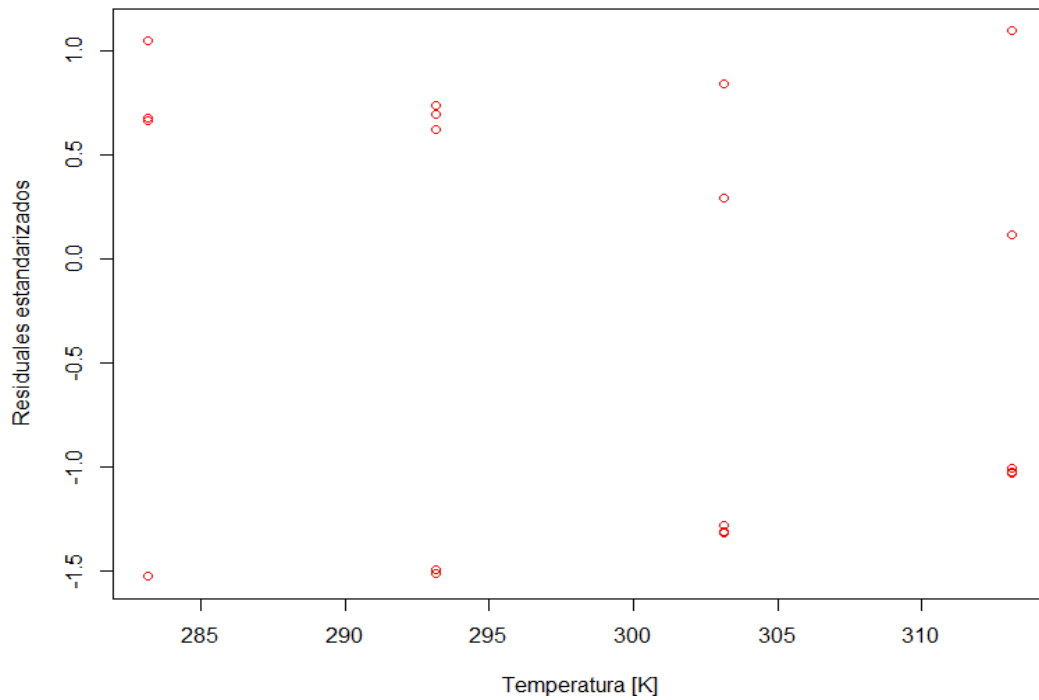
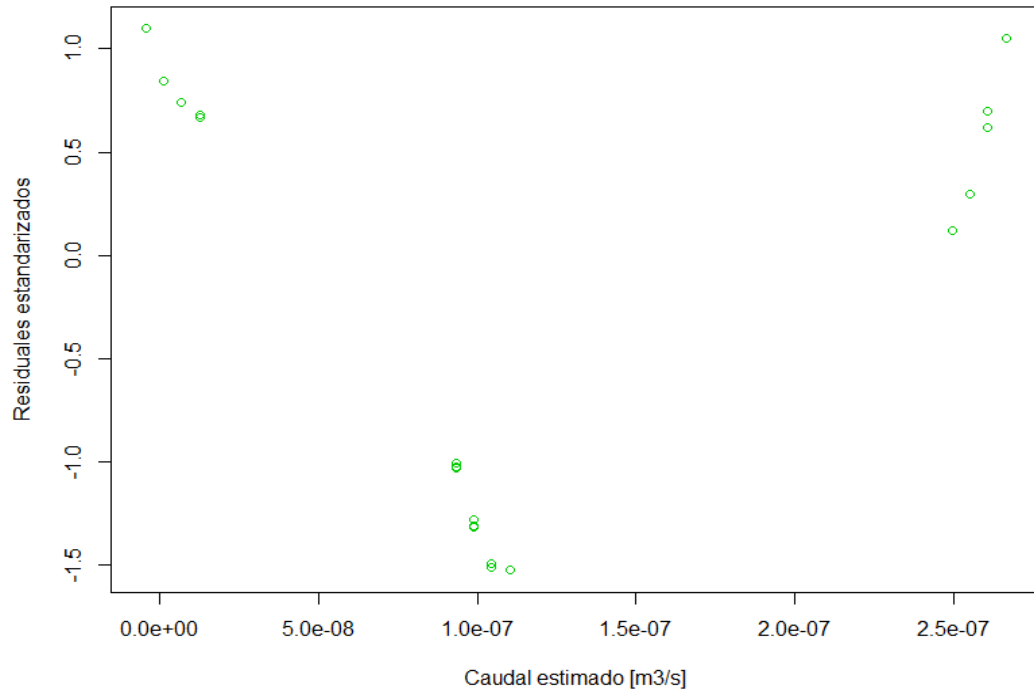


Figura E6: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 2 capilar 50 μm



- Modelo3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura E7: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 3 capilar 50 μm

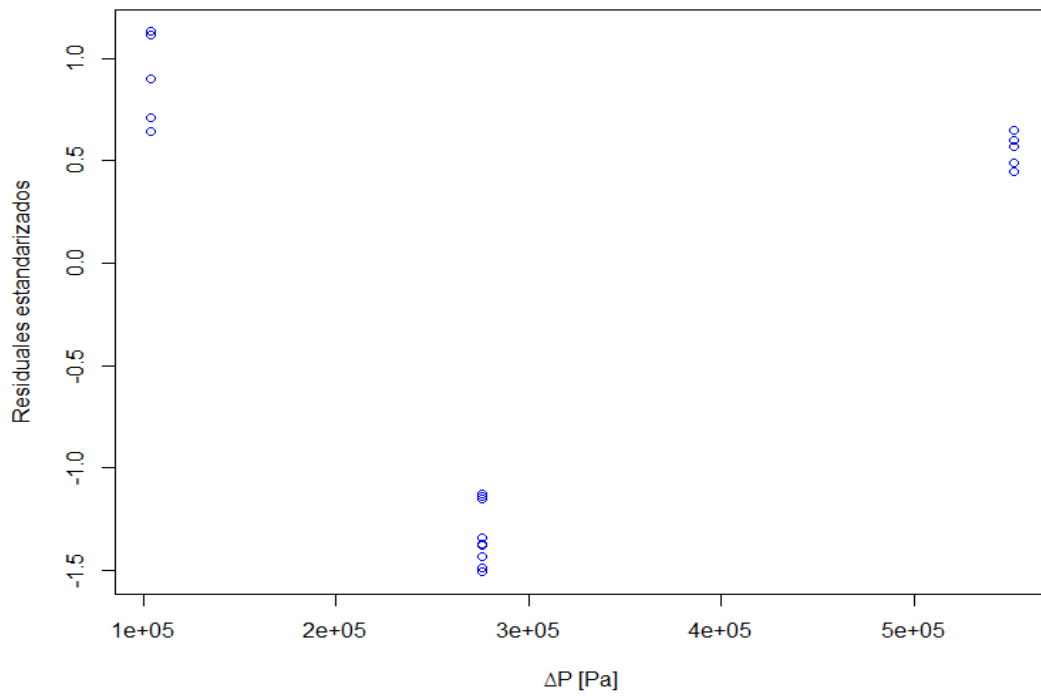


Figura E8: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 3 capilar 50 μm

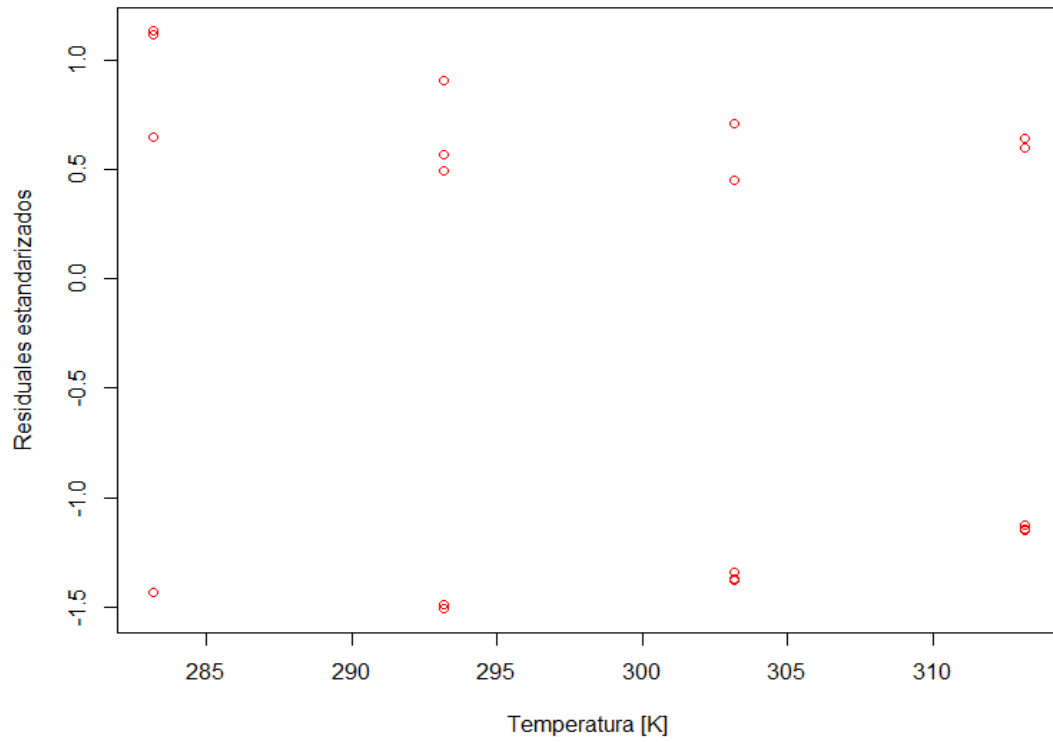
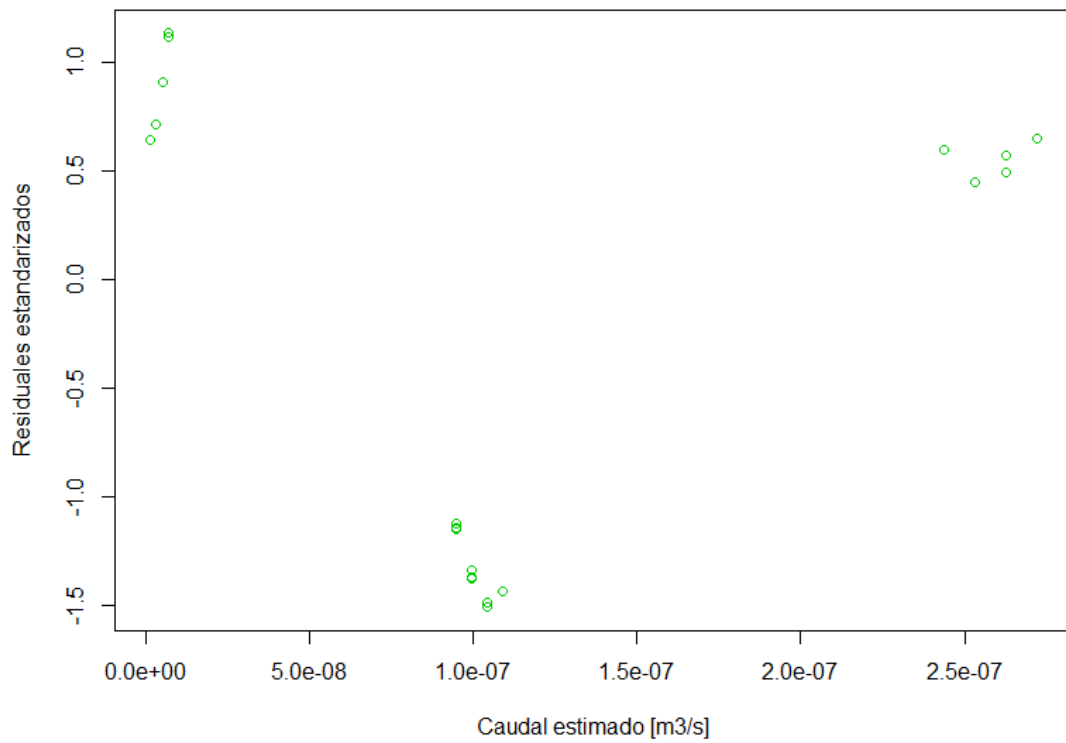


Figura E9: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 3 capilar 50 μm



- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura E10: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 4 capilar 50 μm

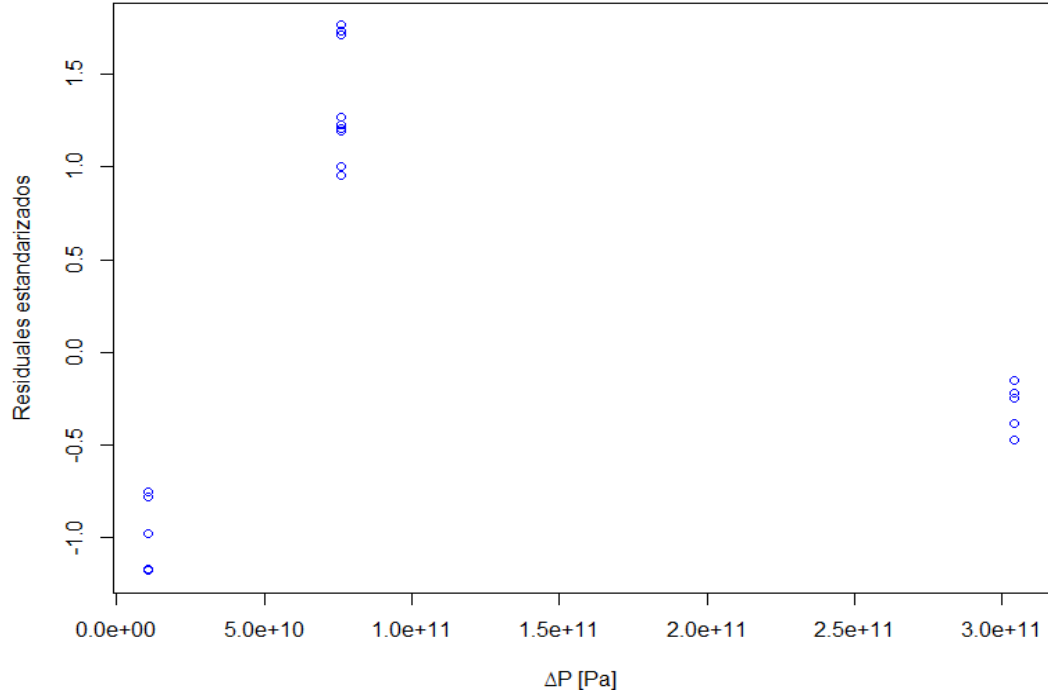


Figura E11: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 4 capilar 50 μm

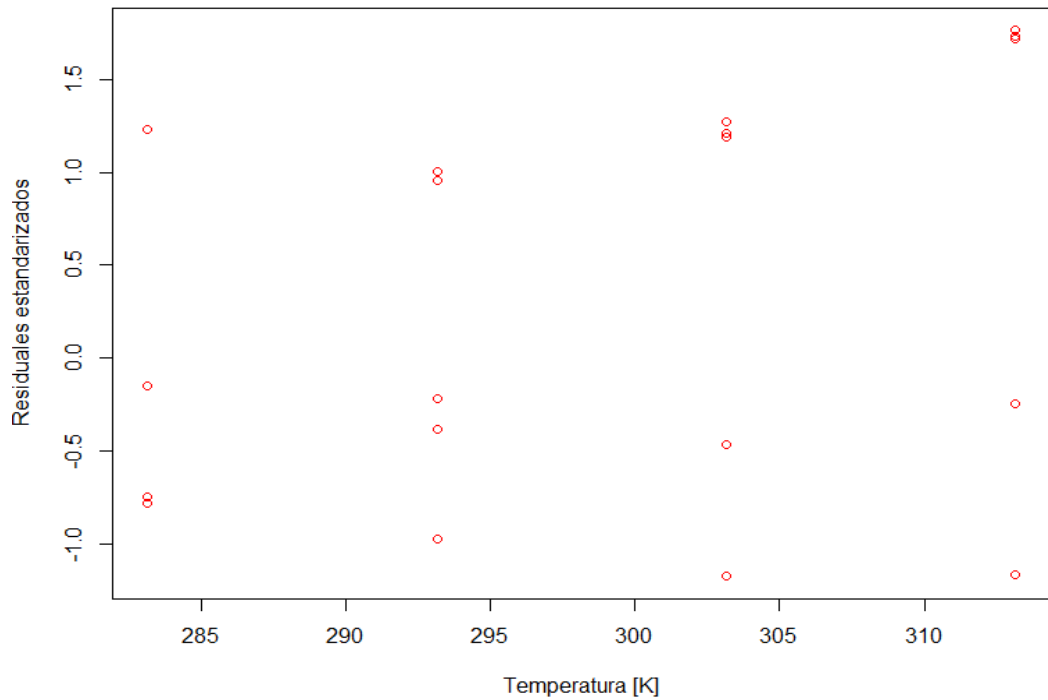
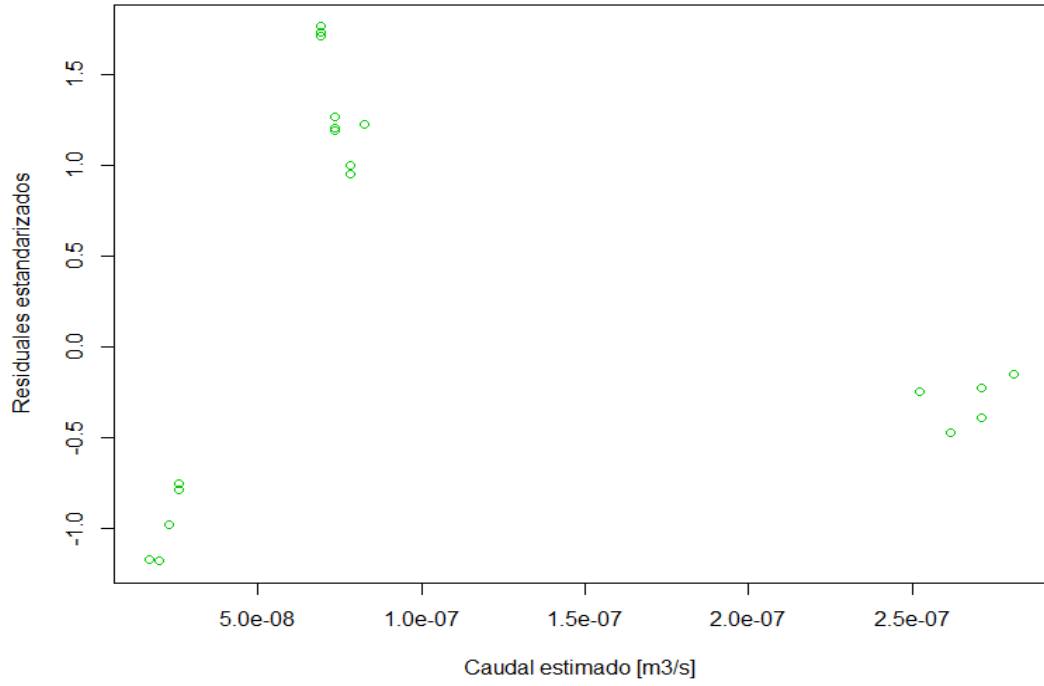


Figura E12: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 4 capilar 50 μm



- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Figura E13: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 5 capilar 50 μm

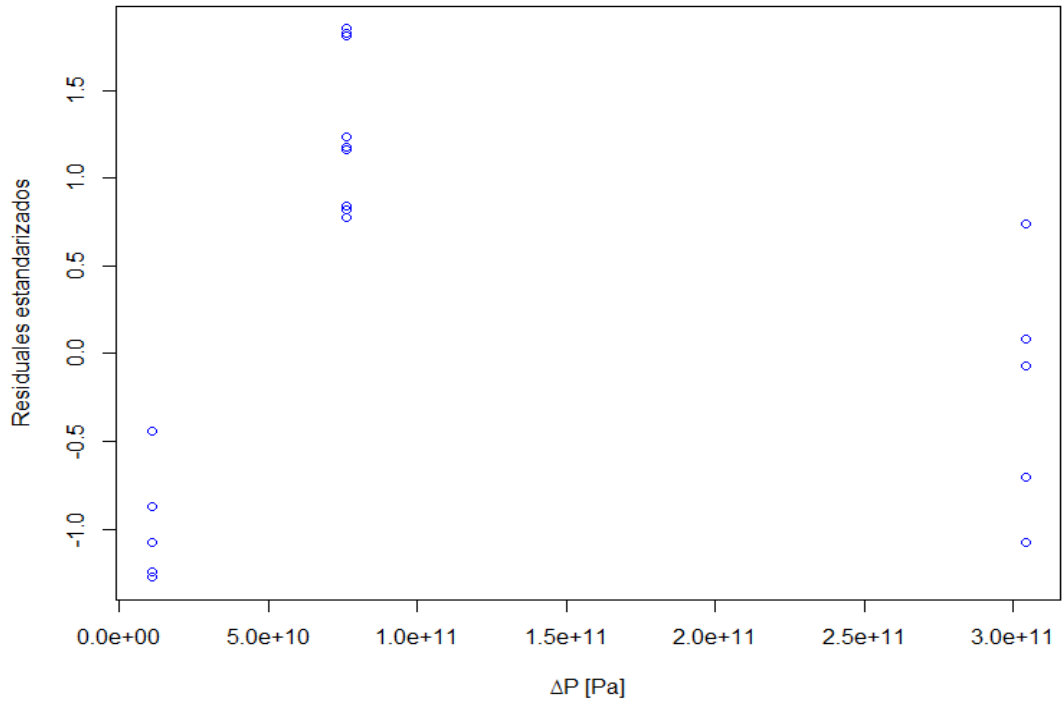


Figura E14: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 5 capilar 50 μm

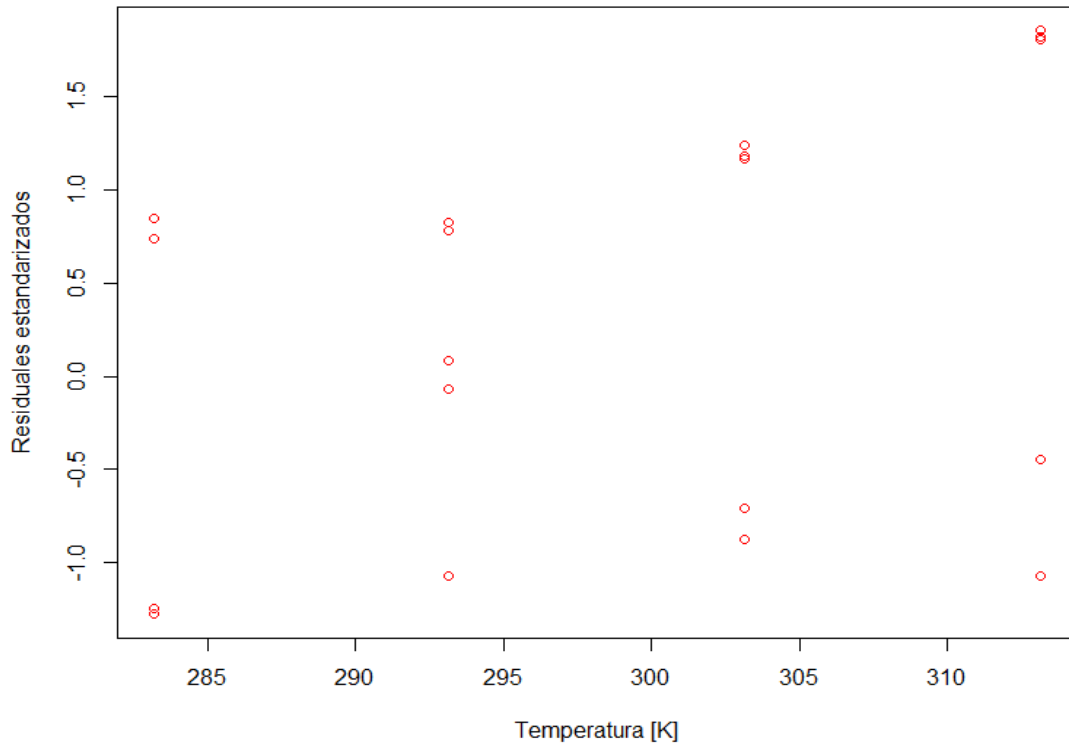
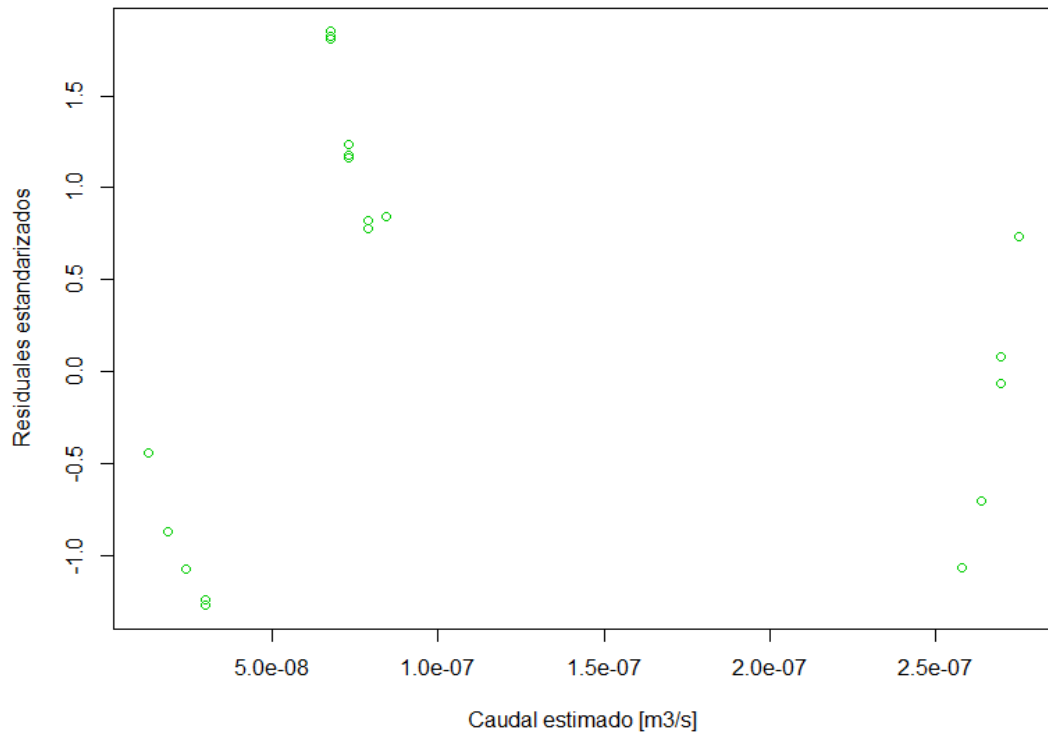


Figura E15: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 5 capilar 50 μm



- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura E16: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 6 capilar 50 μm

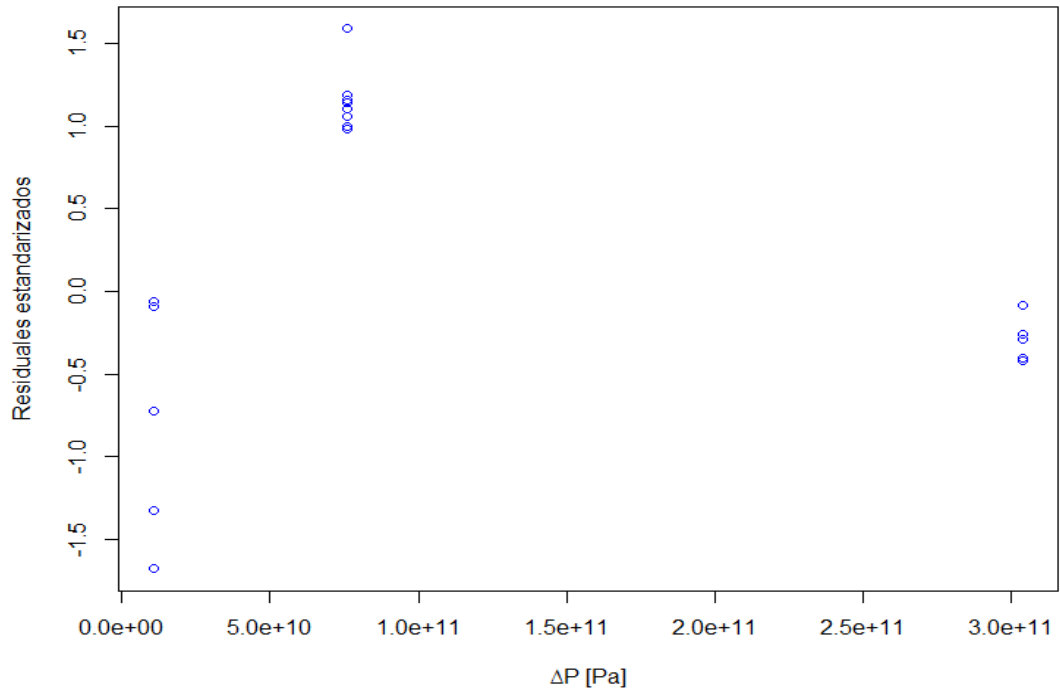


Figura E17: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 6 capilar 50 μm

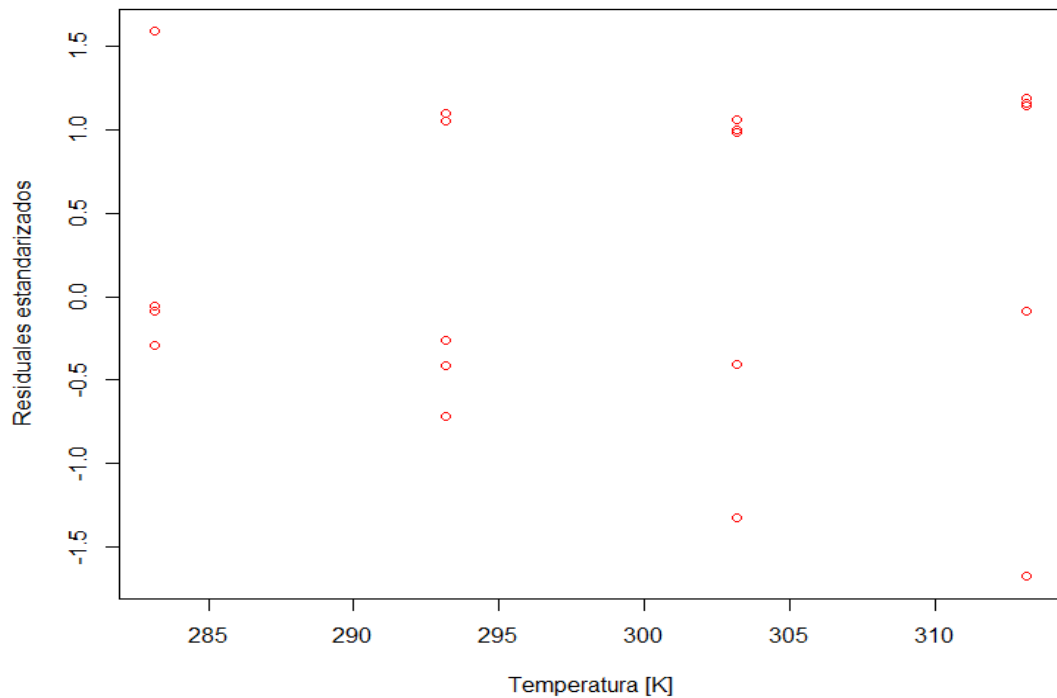
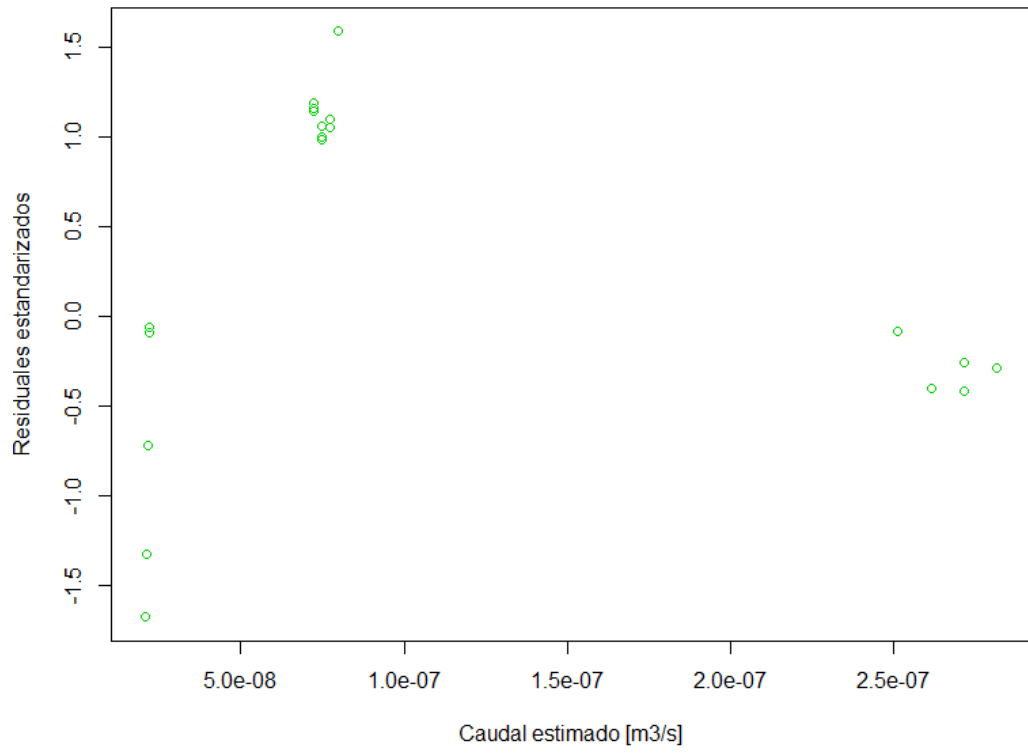


Figura E18: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 6 capilar 50 μm



CAPILAR 75 μm

- Modelo 1: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura E19: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 1 capilar 75 μm

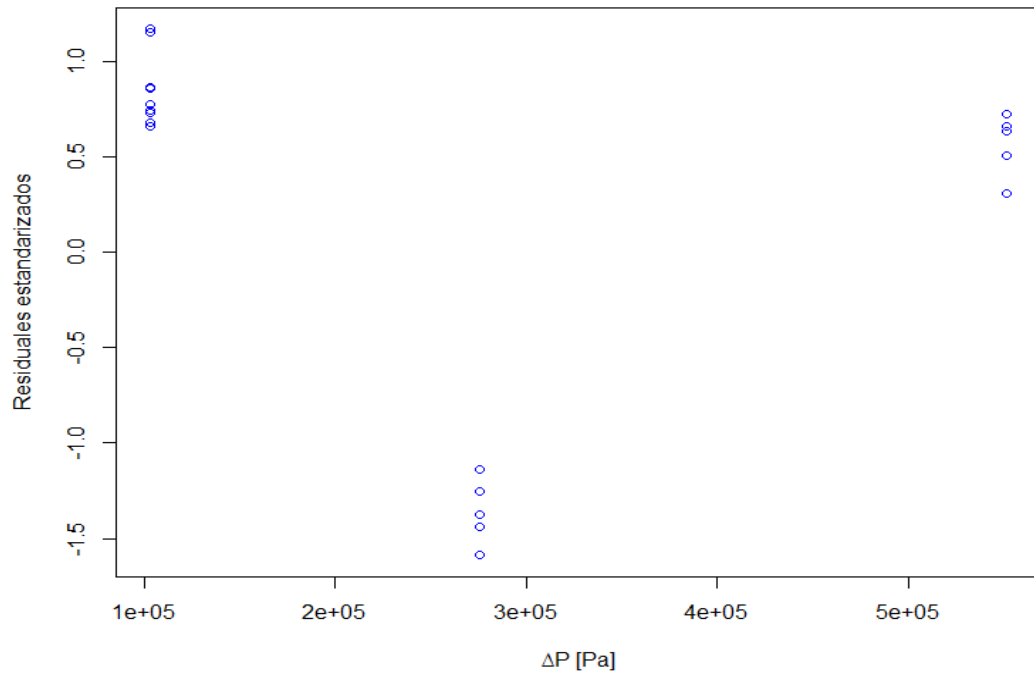


Figura E20: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 1 capilar 75 μm

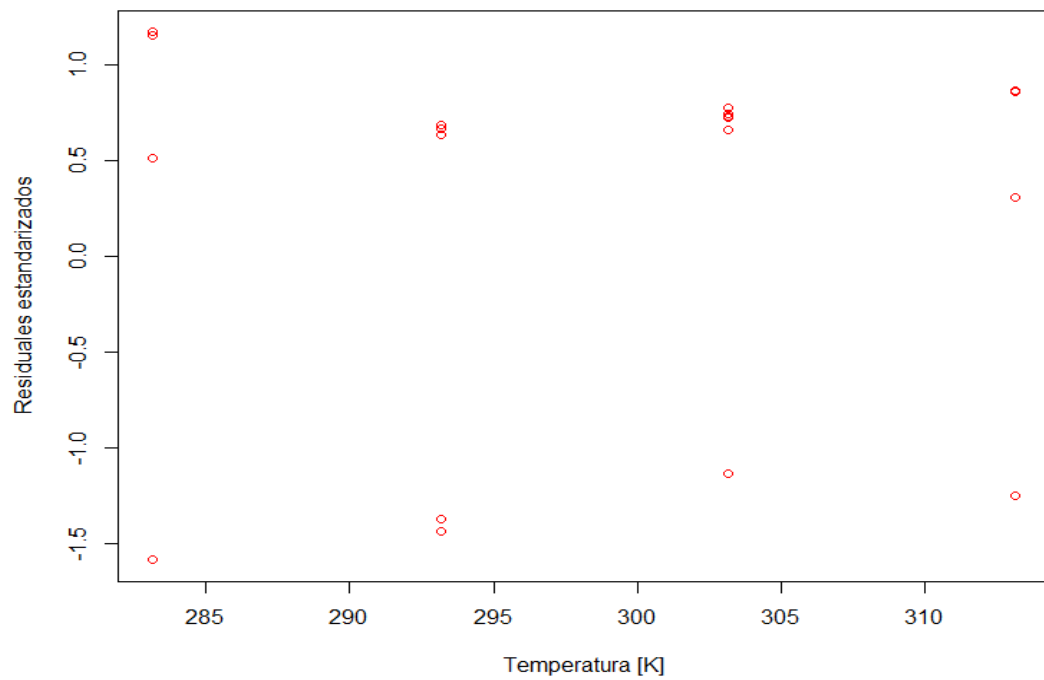
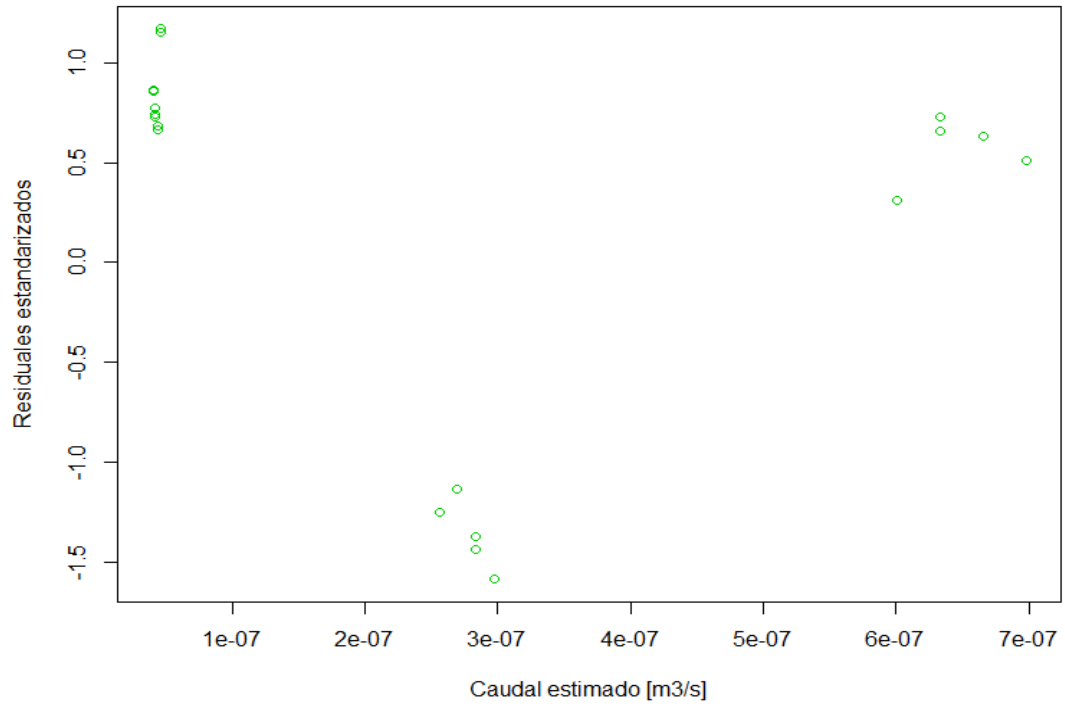


Figura E21: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 1 capilar 75 μm



- Modelo 2: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_2 * T$

Figura E22: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 2 capilar 75 μm

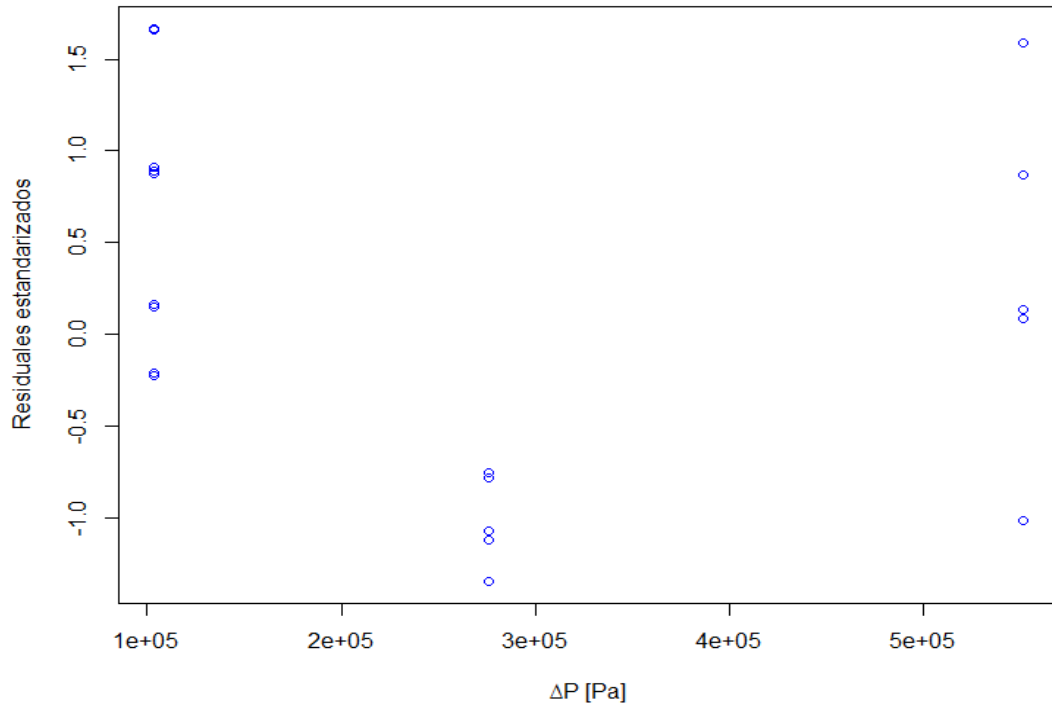


Figura E23: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 2 capilar 75 μm

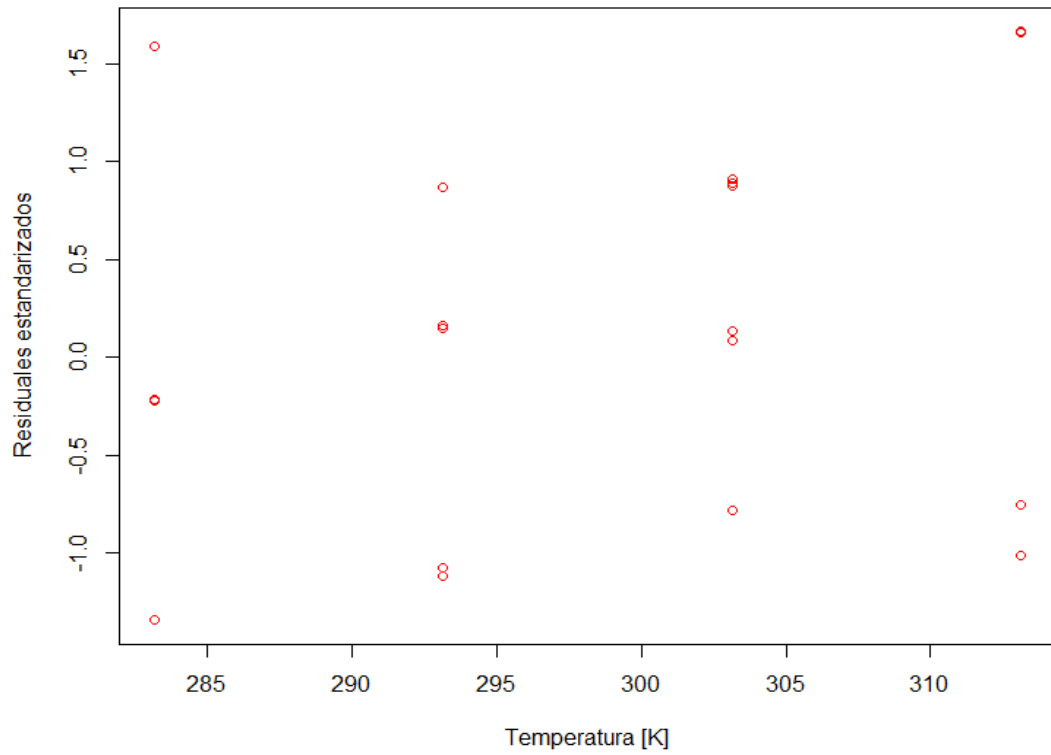
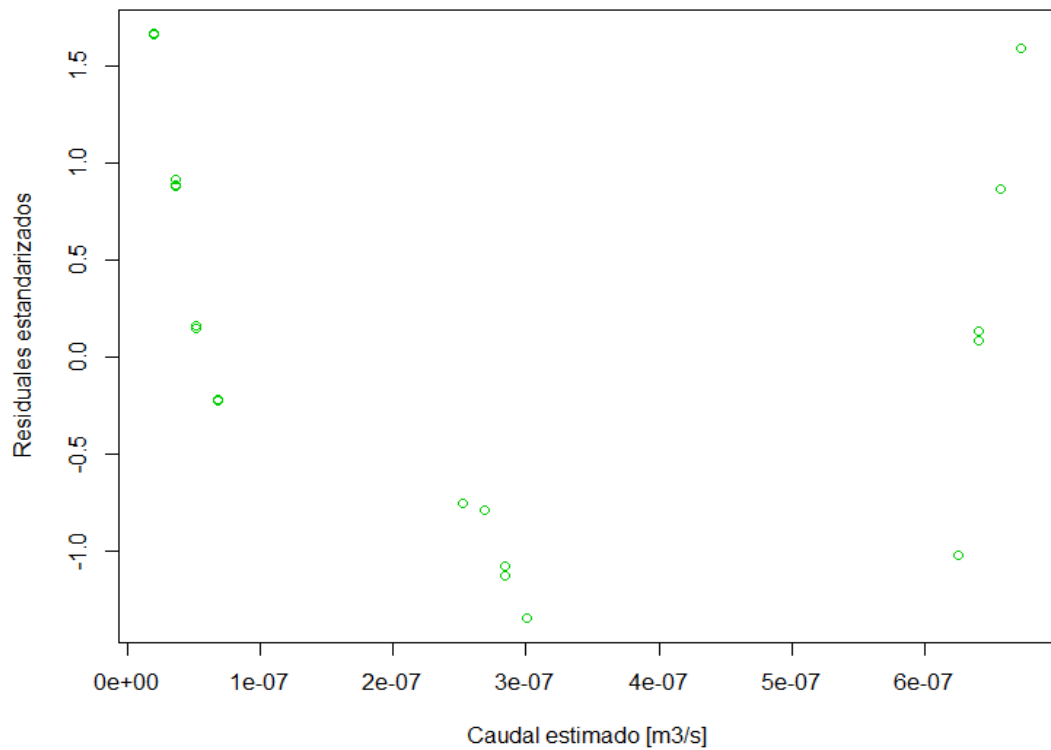


Figura E24: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 2 capilar 75 μm



- Modelo 3: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P + \beta_3 * \Delta P * T$

Figura E25: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 3 capilar 75 μm

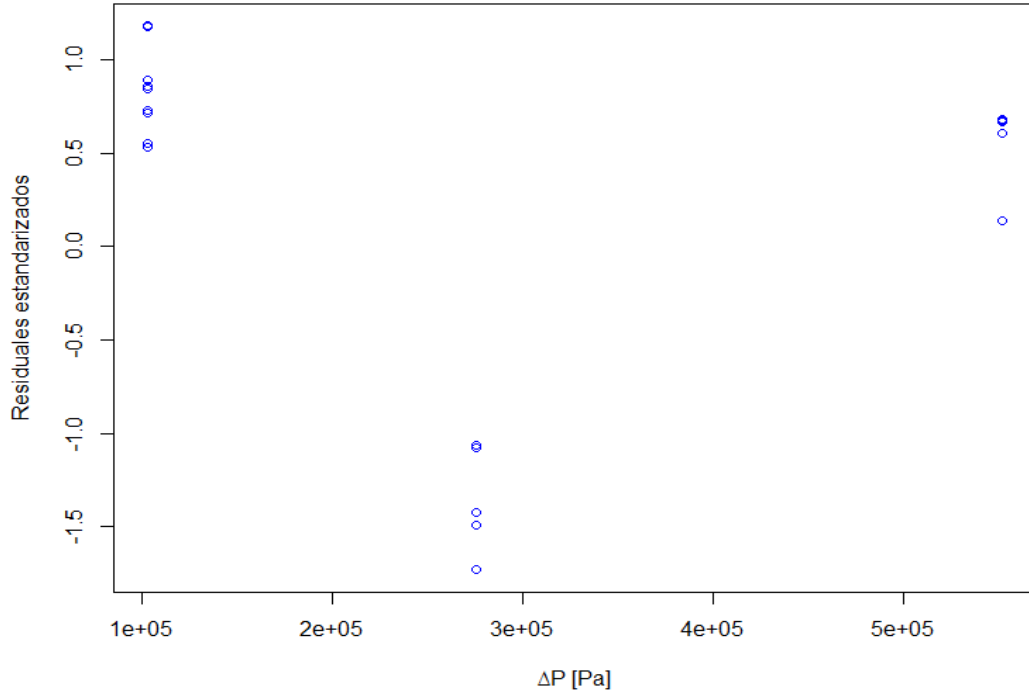


Figura E26: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 3 capilar 75 μm

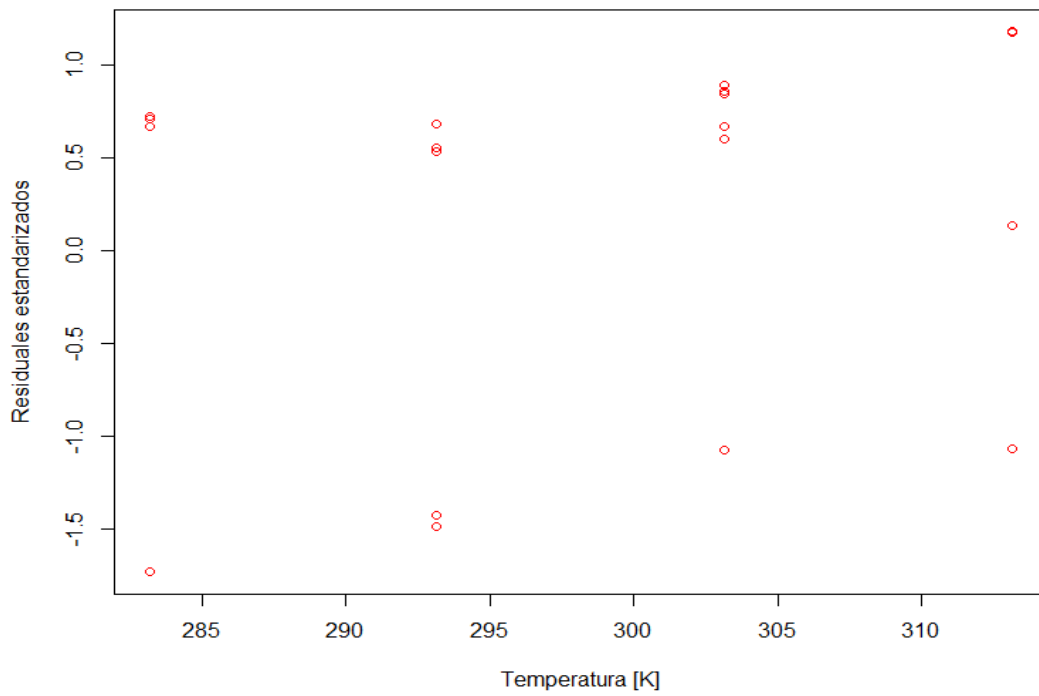
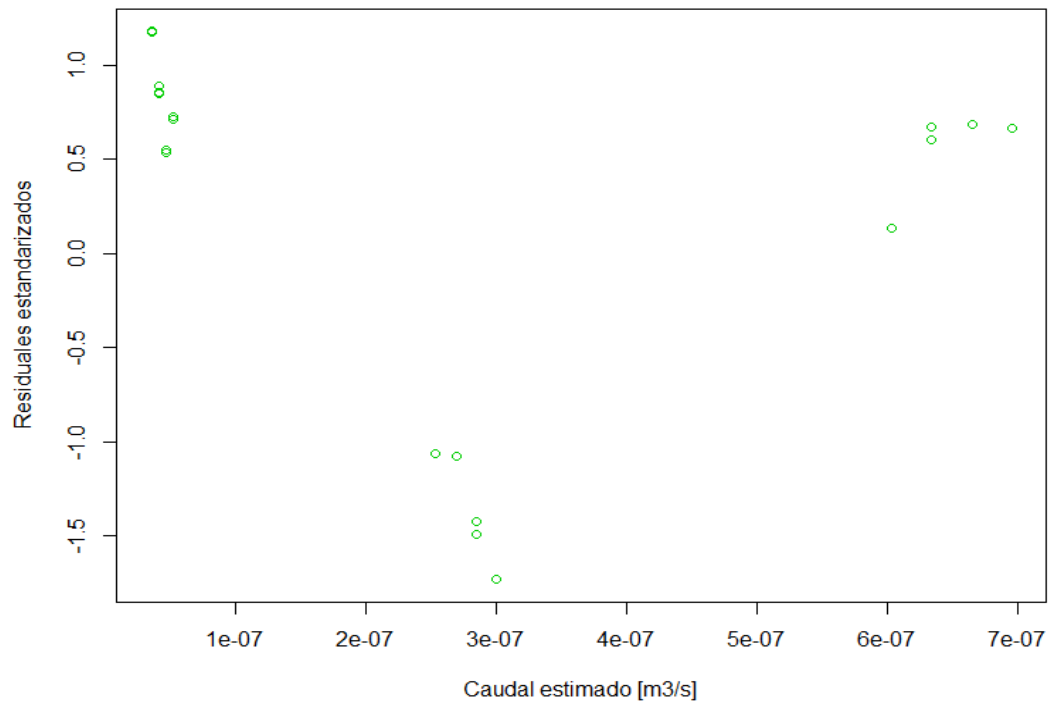


Figura E27: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 3 capilar 75 μm



- Modelo 4: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura E28: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 4 capilar 75 μm

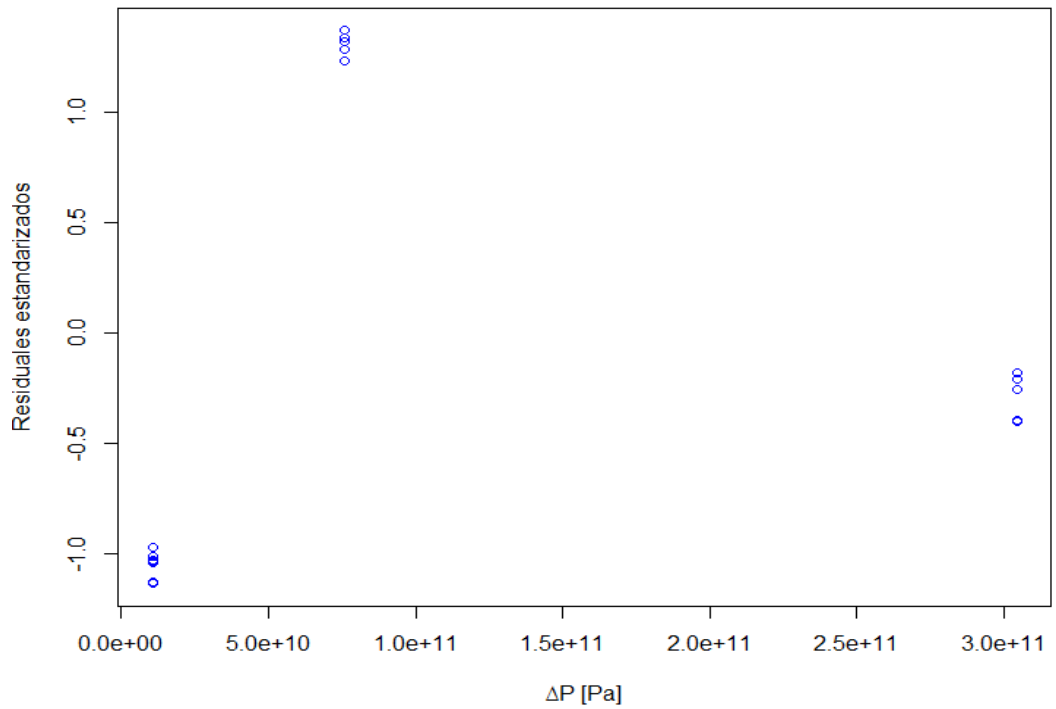


Figura E29: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 4 capilar 75 μm

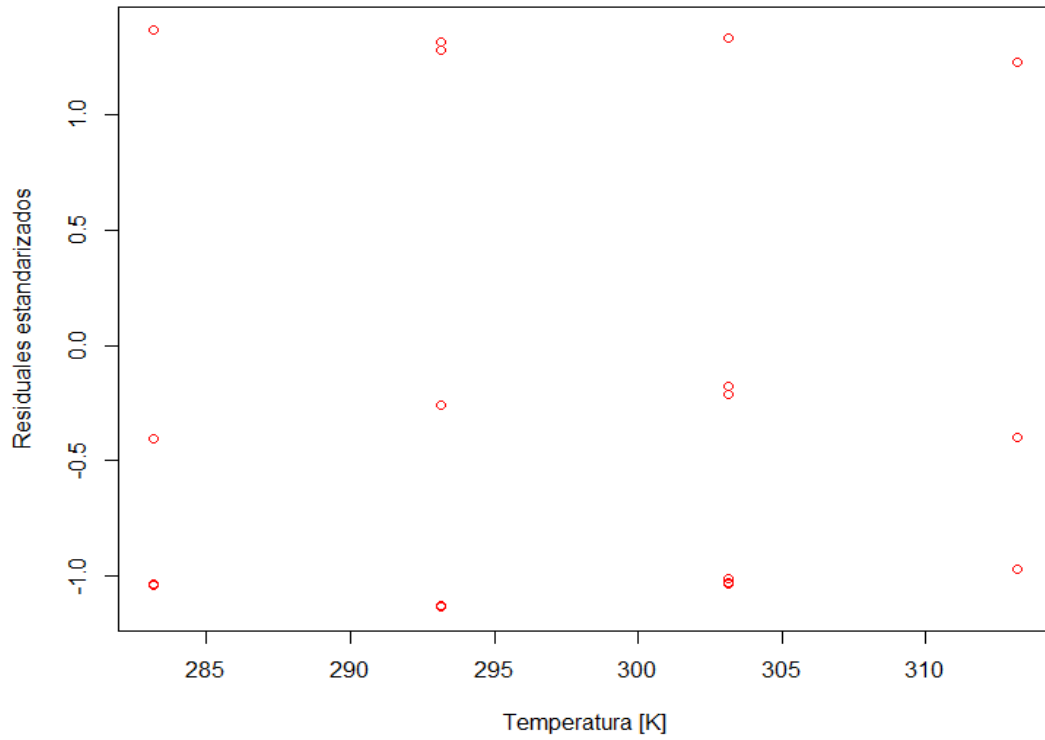
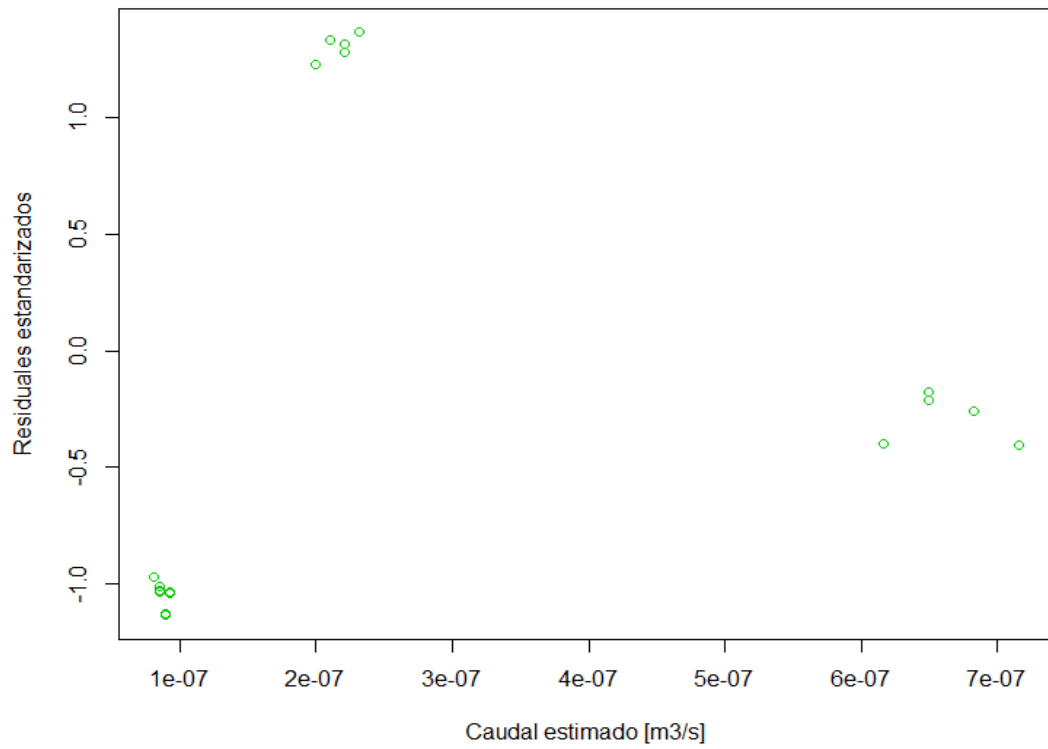


Figura E30: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 4 capilar 75 μm



- Modelo 5: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_2 * T$

Figura E31: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 5 capilar 75 μm

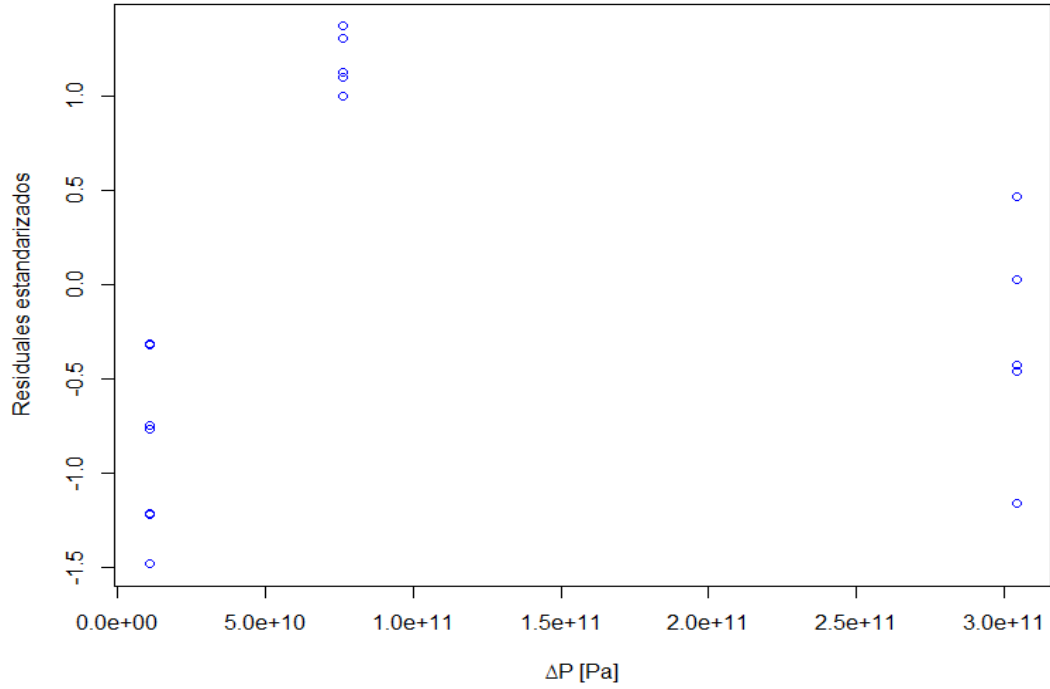


Figura E32: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 5 capilar 75 μm

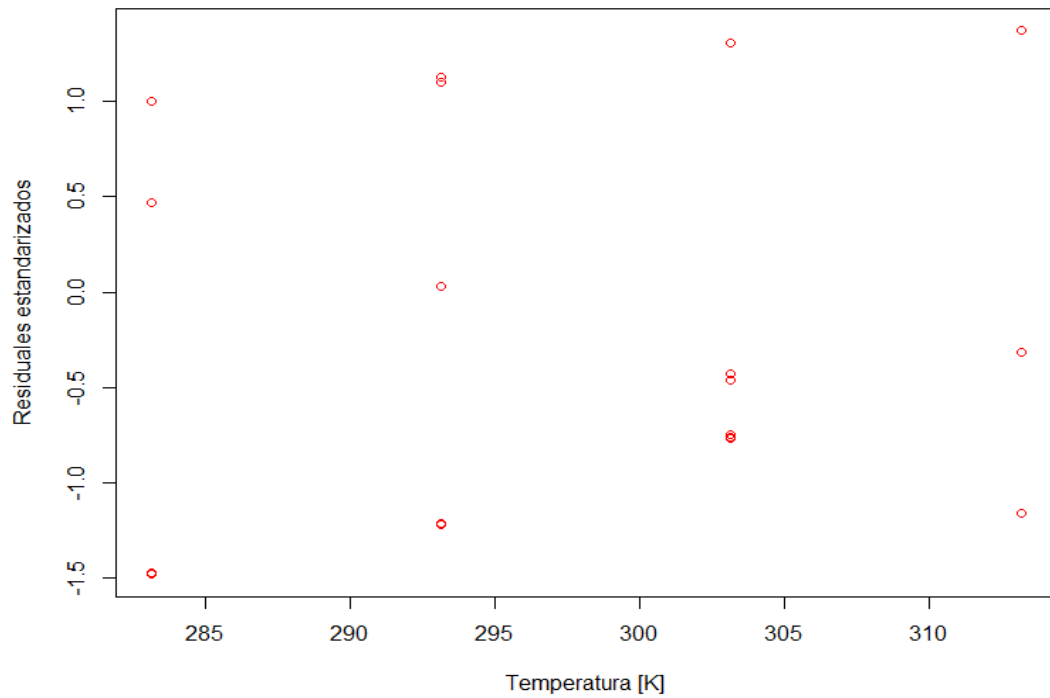
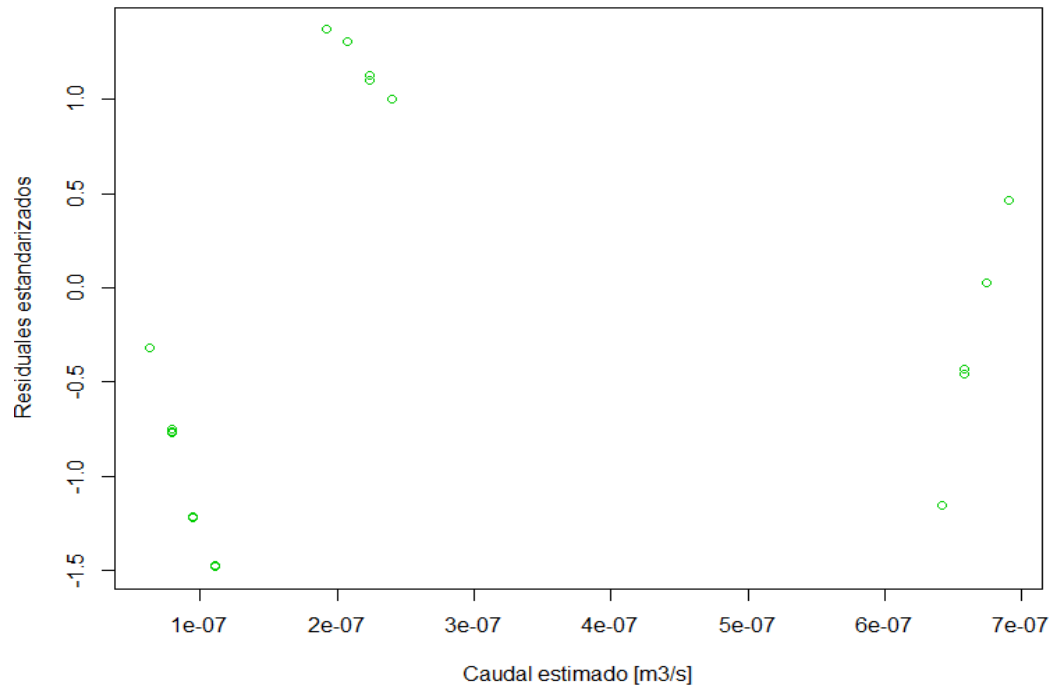


Figura E33: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 5 capilar 75 μm



- Modelo 6: $Q = \beta_0 + \beta_1 * \Delta P^2 + \beta_3 * \Delta P^2 * T$

Figura E34: Residuales estandarizados vs ΔP modelo 6 capilar 75 μm

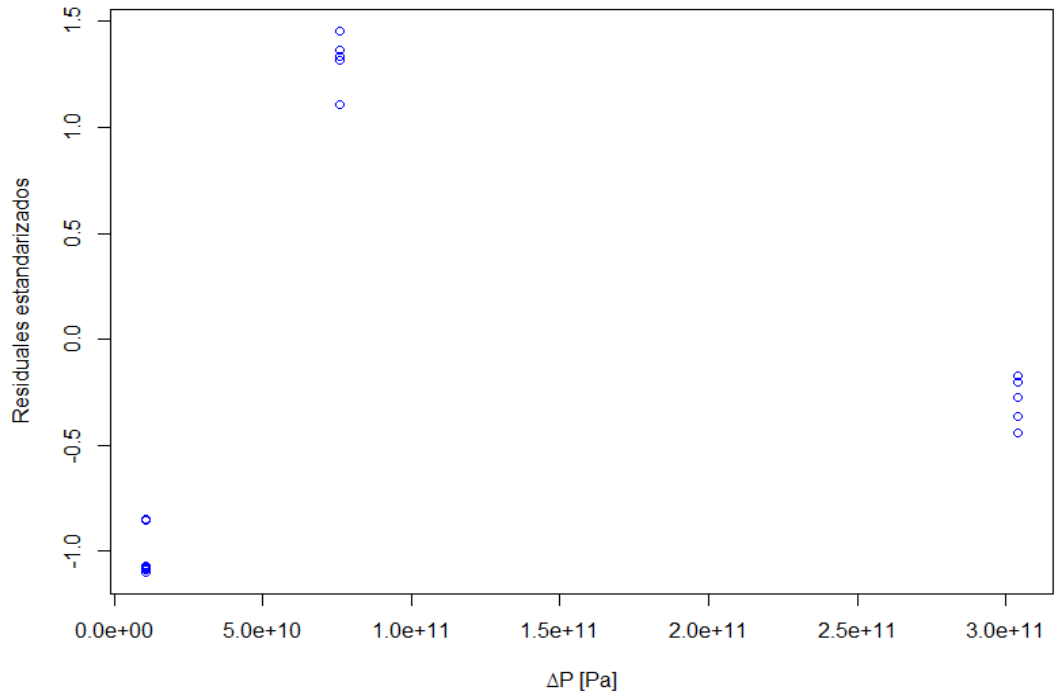


Figura E35: Residuales estandarizados vs Temperatura modelo 6 capilar 75 μm

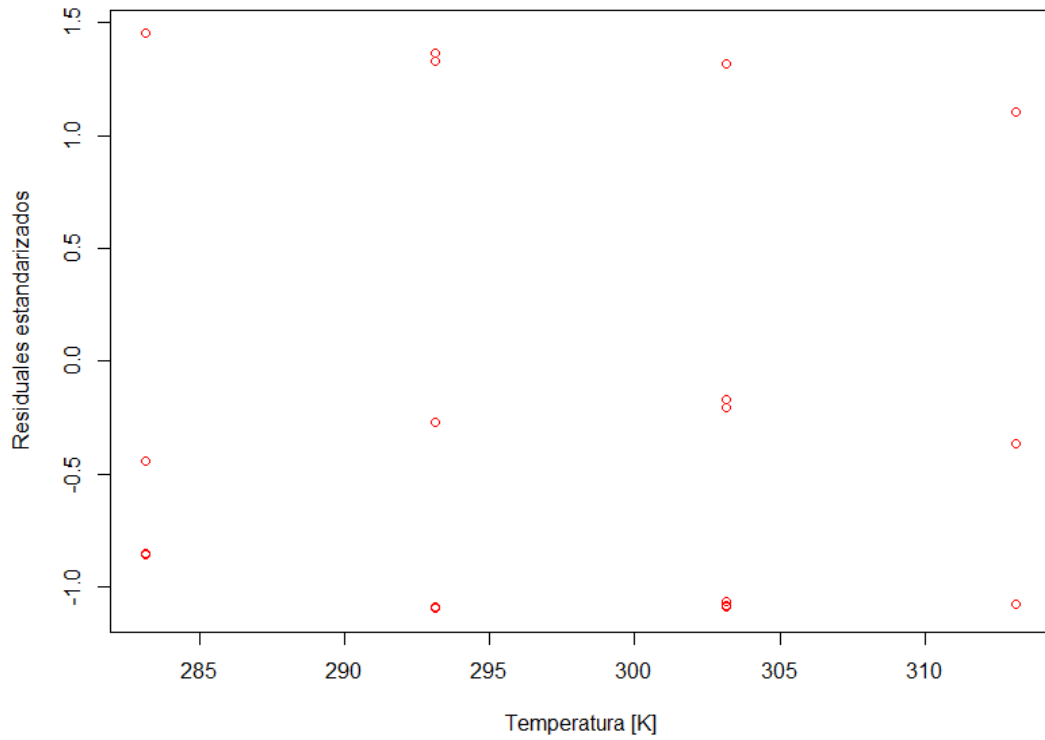


Figura E36: Residuales estandarizados vs Caudal estimado modelo 5 capilar 75 μm

