Apéndice B

Interpretación Ensayos Hidráulicos

Flow Hydro Consulting

Memorándum Técnico

Para:	Manuel Bucci – Codelco Distrito Norte
De:	Flow Hydro Consulting Group
Fecha:	5 de febrero de 2025
Ref.:	Interpretación de Ensayos Hidráulicos en Pozos de la Barrera Hidráulica DRT

1 INTRODUCCIÓN

La División Radomiro Tomic de Codelco, en el marco de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) en preparación para el proyecto de Lixiviación Clorurada, contempla la ampliación de la carpeta para la depositación de los ripios secundarios hacia el norte de la actual infraestructura de producción minera. Asimismo, considera la puesta en operación de una barrera hidráulica (BH) de pozos ubicados en la Pampa Cere, con la finalidad de mitigar la pluma sulfatada originada principalmente desde el botadero de ripios actual.

El presente memorándum técnico contempla la interpretación de los ensayos hidráulicos desarrollados en los pozos construidos de la barrera, con el fin de lograr un mejor entendimiento del entorno y evaluar el futuro funcionamiento y configuración de dicha obra.

2 BARRERA HIDRÁULICA Y ENSAYOS

A la fecha se han construido 9 pozos en el sector Pampa Cere asociados a la barrera hidráulica –perforados a una distancia aproximada entre 1,5 y 2 km aguas abajo el botadero de ripios– de los cuales 4 corresponden a pozos habilitados para el bombeo o inyección de agua (pozos “BRT”) y 6 pozos de observación (pozos “ORT” y “Piezo”), que sirvan de monitoreo de la barrera en el sector, cuya distribución espacial se presenta en la Figura 1.

Cabe mencionar que el pozo de observación PCH-14 corresponde a una obra previa, perteneciente a la red de monitoreo hidrogeológico de la DRT, y que debido a su cercanía al pozo BRT-2, ha sido seleccionado para cumplir funciones de monitoreo ante posibles bombeos o inyecciones ocurridas en este pozo.

Los ensayos realizados en los pozos mencionados fueron de dos tipos:

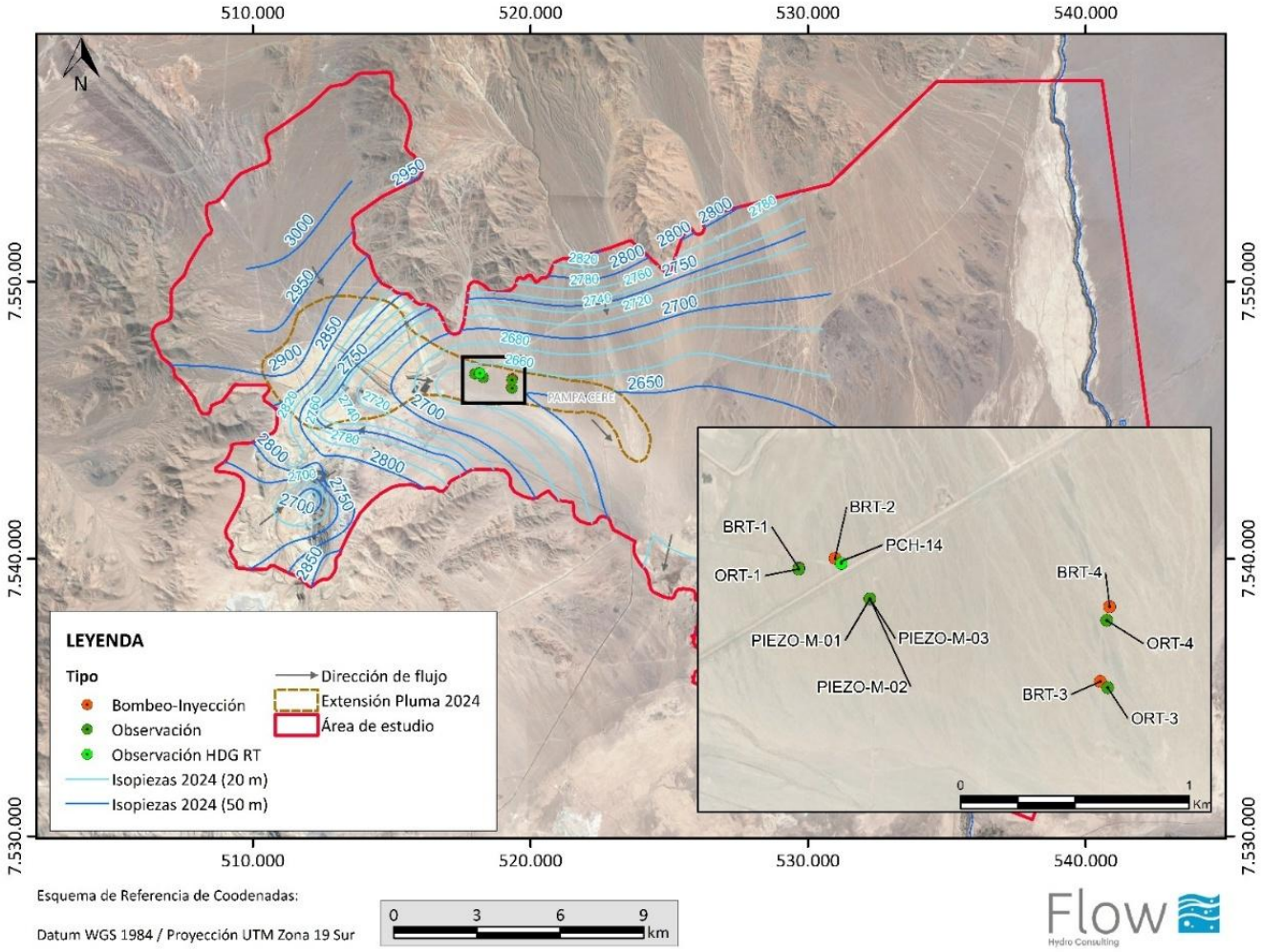
- Ensayos de infiltración, consistentes en dos fases, ensayo de carga constante y ensayo de carga variable.
- Pruebas de bombeo consistentes en dos fases, prueba de gasto constante y prueba de gasto variable.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de las características de cada sondaje, así como la fecha de ejecución de los ensayos hidráulicos.

Tabla 1: Pozos de la barrera hidráulica de DRT en Pampa Cere

Pozo	Tipo	Prof. (m)	Coordenada UTM Este (m)	Coordenada UTM Norte (m)	Ciego (m)	Ranurada (m)	Bombeo Carga Variable (4 ciclos x 2h)	Carga Constante (72 h)	Inyección
BRT-1	Bombeo-Inyección	230	517.994,5	7.546.672,2	0-182	182-230	16-11-2024	18-11-2024	09-11-2024
BRT-2	Bombeo-Inyección	229	518.152,9	7.546.714,9	0-169	169-229	05-11-2024	05-11-2024	23-11-2024
BRT-3	Bombeo-Inyección	200	519.312,0	7.546.176,0	0-134	134-200	17-10-2024	18-10-2024	11-12-2024
BRT-4	Bombeo-Inyección	200	519.353,1	7.546.503,2	0-152	152-200	06-12-2024	09-12-2024	26-11-2024
ORT-1	Observación	230	517.994,0	7.546.668,0	0-176	176-230	-	-	09-11-2024
ORT-3	Observación	248	519.344,9	7.546.148,9	0-134	134-248	-	-	24-10-2024
ORT-4	Observación	200	519.341,0	7.546.443,0	0-140	140-200	-	-	26-11-2024
PIEZO-M-01	Observación	230	518.305,0	7.546.538,0	0-182	182-230	-	-	-
PIEZO-M-02	Observación	182	518.305,0	7.546.538,0	0-170	170-182	-	-	-
PIEZO-M-03	Observación	170	518.305,0	7.546.538,0	0-158	158-170	-	-	-
PCH-14	Observación	269	518.179,0	7.546.692,3	0-106	106-266(*)	-	-	22-11-2024

(*) PVC ranurado no continuo
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Situación general de los pozos de la BH

3 INTEPRETACIÓN DE ENSAYOS

3.1 PRUEBAS DE BOMBEO

Las pruebas de bombeo consistieron en pruebas de gasto variable (PGV) y pruebas de gasto constante (PGC), junto a su correspondiente recuperación. Las pruebas se desarrollaron entre el 11 de octubre y el 11 de diciembre del 2024, y fueron desarrolladas por la empresa de perforación Geotec Boyles Bros. La supervisión en terreno estuvo a cargo de JEJ Ingeniería y con asesoría remota de personal de Flow. A modo general, se registraron los datos de nivel, tanto para el bombeo como para la recuperación, con una frecuencia de medición variable (1, 2, 5, 10, 30 y 60 min).

3.1.1 Pruebas de Gasto Variable

Las PGV consistieron en la extracción de agua en 4 etapas a caudales ascendentes, con escalones de 120 min cada uno. La PGV permiten estimar la eficiencia de un pozo, calcular los parámetros de su ecuación (descenso para cualquier caudal) y determinar su curva de agotamiento, a partir de la cual se obtiene su máxima capacidad de bombeo.

Para interpretar los datos de las PGV y determinar la eficiencia de los pozos se utilizó el método de Hantush & Bierschenk[1]. A continuación, se detallan los resultados obtenidos por pozo.

Pozo BRT-01

En la Tabla 2 se resumen los resultados de la PGV en el pozo de bombeo BRT-01, indicando el caudal de cada escalón, la profundidad del nivel dinámico y los descensos observados en los intervalos de tiempo definidos.

Tabla 2: Resultado de prueba de gasto variable en pozo BRT-01

Escalones	Q (L/s)	Nivel inicial (mbpm)	Nivel final (mbpm)	Descenso (m)	Tiempo (min)	T acumulado (min)
Q1	10	176,3	179,1	2,9	120	120
Q2	20	179,1	183,6	4,5	120	240
Q3	30	183,6	190,7	7,1	120	360
Q4	35	190,7	195,7	5,0	120	480

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3 detalla los escalones de acuerdo con las proyecciones basadas en las líneas de tendencia logarítmica. El gráfico de Figura 2, muestra el resultado de regresión lineal para conocer las constantes B (2E-03 d/m^2) y C (2E-06) para el cálculo de eficiencia.

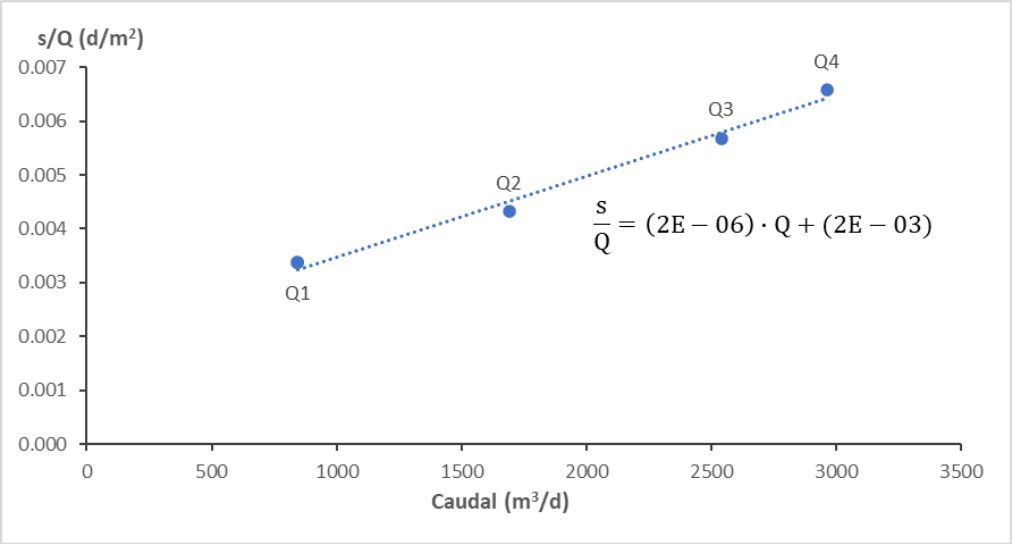
Se observa que el pozo logra su máxima eficiencia al operar a un caudal de 10 L/s, alcanzando un rendimiento del 90,9%.

Tabla 3: Cálculo de eficiencia de pozo BRT-01 según método de Hantush & Bierschenk

Escalones	Q (L/s)	Q (m^3/d)	Nivel (mbpm)	s (m)	s/Q (d/m^2)	Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Eficiencia (%)
Q1	10	846	179,1	2,9	0,00	120	120	90,9
Q2	20	1692	183,6	7,3	0,00	120	240	71,4
Q3	30	2538	190,7	14,4	0,01	120	360	52,6
Q4	35	2961	195,7	19,5	0,01	120	480	44,9

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia

[1]Bierschenk, W.H. (1963): Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. - International Association of Scientific Hydrology, Publication 64: 493-507.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2: Gráfico de regresión para el cálculo de las constantes B y C en el método de Hantush & Bierschenk

Pozo BRT-02

En la Tabla 4 se resumen los resultados de la PGV en el pozo de bombeo BRT-02, indicando el caudal de cada escalón, la profundidad del nivel dinámico y los descensos observados en los intervalos de tiempo definidos.

Tabla 4: Resultado de prueba de gasto variable en pozo BRT-02

Escalones	Q (L/s)	Nivel inicial (mbpm)	Nivel final (mbpm)	Descenso (m)	Tiempo (min)	T acumulado (min)
Q1	5	176,6	183,5	6,9	180	180
Q2	7	183,5	186,9	3,4	120	300
Q3	10	186,9	193,1	6,2	120	420
Q4	12	193,1	197,4	4,3	120	540

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia

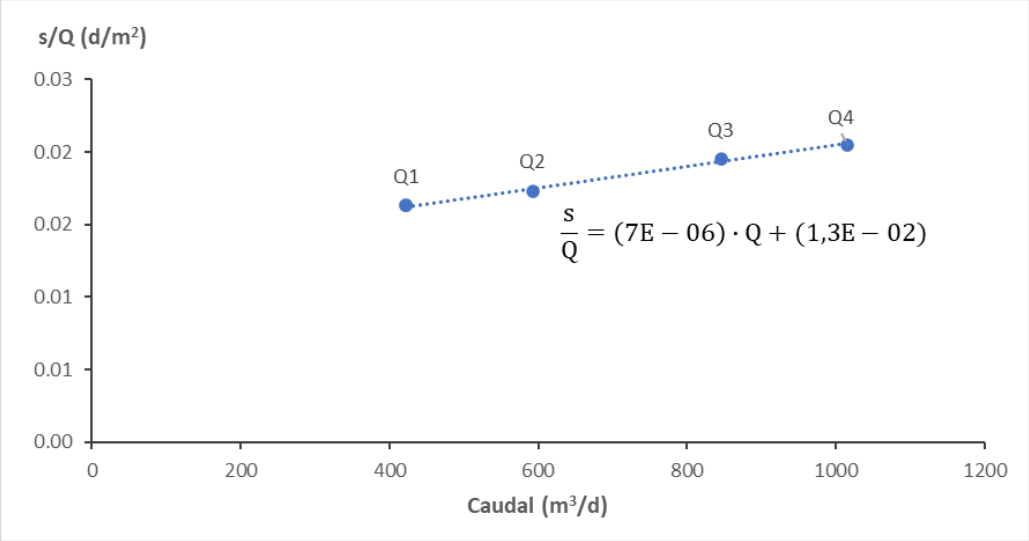
La Tabla 5 detalla los escalones, los cuales, de acuerdo con las proyecciones basadas en las líneas de tendencia de tipo logarítmica, mostraron una estabilización en sus niveles. El grafico de la Figura 3, muestra el resultado de regresión lineal para conocer las constantes B (1,3E-02 d/m^2) y C (7E-06), según el método de Hantush & Bierschenk para el cálculo de eficiencia.

Se observa que el pozo logra su máxima eficiencia al operar a un caudal de 10 L/s, alcanzando un rendimiento del 90,9%.

Tabla 5: Cálculo de eficiencia de pozo BRT-01 según método de Hantush & Bierschenk.

Escalones	Q L/s	Q (m^3/d)	Nivel (mbpm)	S (m)	s/Q (d/m^2)	Tiempo (min)	T acumulado (min)	Eficiencia (%)
Q1	5	423,0	183,5	6,9	0,02	180	180	98,7
Q2	7	592,2	186,9	10,3	0,02	120	300	97,5
Q3	10	846,0	193,1	16,5	0,02	120	420	94,9
Q4	12	1015,2	197,4	20,8	0,02	120	540	92,8

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Gráfico de regresión para el cálculo de las constantes B y C en el método de Hantush & Bierschenk

Pozo BRT-03

En la Tabla 6 se resumen los resultados de la PGV en el pozo de bombeo BRT-03, indicando caudal de cada escalón, la profundidad del nivel dinámico y los descensos observados en los intervalos de tiempo definidos.

Tabla 6: Resultado de Prueba de gasto variable en pozo BRT-03

Escalones	Q (L/s)	Nivel inicial (mbpm)	Nivel final (mbpm)	Descenso (m)	Tiempo (min)	T acumulado (min)
Q1	15	134,2	135,9	1,7	120	120
Q2	25	135,9	137,1	1,3	120	240
Q3	35	137,1	138,5	1,4	120	360
Q4	45	138,5	139,9	1,4	120	480

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia

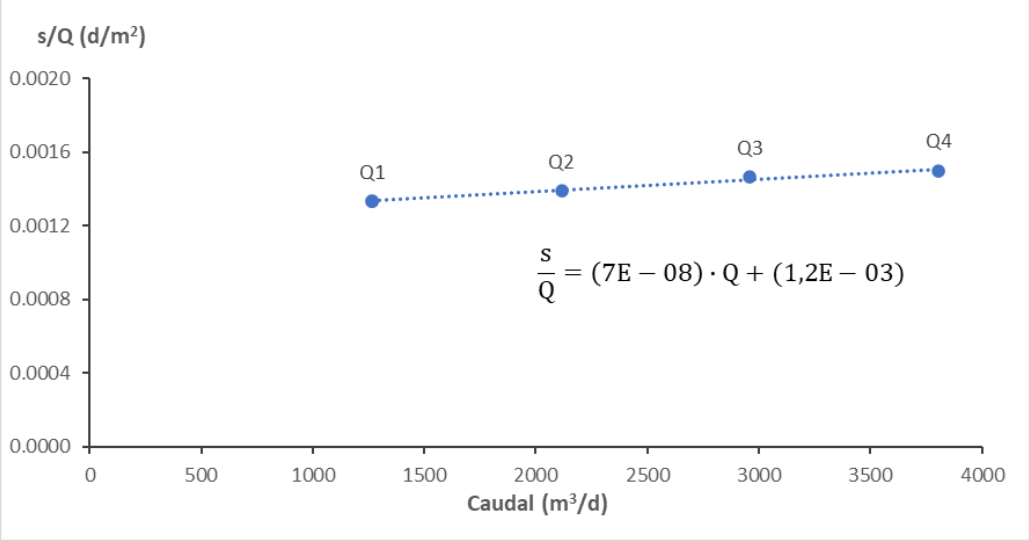
La Tabla 7 detalla los escalones, los cuales, de acuerdo con las proyecciones basadas en las líneas de tendencia de tipo logarítmica, mostraron una estabilización en sus niveles. El grafico de la Figura 4, muestra el resultado de regresión lineal para conocer las constantes B (1,2E-03 d/m^2) y C (7E-08) para el cálculo de eficiencia, según el método de Hantush & Bierschenk.

Se observa que el pozo logra su máxima eficiencia al operar a un caudal de 15 L/s, alcanzando un rendimiento del 98,70%.

Tabla 7: Cálculo de eficiencia de pozo BRT-03 según método de Hantush & Bierschenk

Escalones	Q (L/s)	Q (m^3/d)	Nivel (mbpm)	S (m)	s/Q (d/m^2)	Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Eficiencia (%)
Q1	15	1269	135,9	1,7	0,0013	120	120	98,7
Q2	25	2115	137,1	2,9	0,0014	120	240	96,5
Q3	35	2961	138,5	4,3	0,0015	120	360	93,3
Q4	45	3807	139,9	5,7	0,0015	120	480	89,4

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Gráfico de regresión para el cálculo de las constantes B y C en el método de Hantush & Bierschenk

Pozo BRT-04

En la Tabla 8 se resumen los resultados de la PGV en el pozo de bombeo BRT-04, indicando el caudal de cada escalón, la profundidad del nivel dinámico y los descensos observados en los intervalos de tiempo definidos.

Tabla 8: Resultado de Prueba de gasto variable en pozo BRT-04

Escalones	Q (L/s)	Nivel inicial (mbpm)	Nivel final	Descenso (m)	Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)
Q1	15	147,6	152,3	4,7	120	120
Q2	25	152,3	156,9	4,6	120	240
Q3	35	156,9	160,4	3,5	120	360
Q4	40	160,4	162,4	2,0	120	480

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia

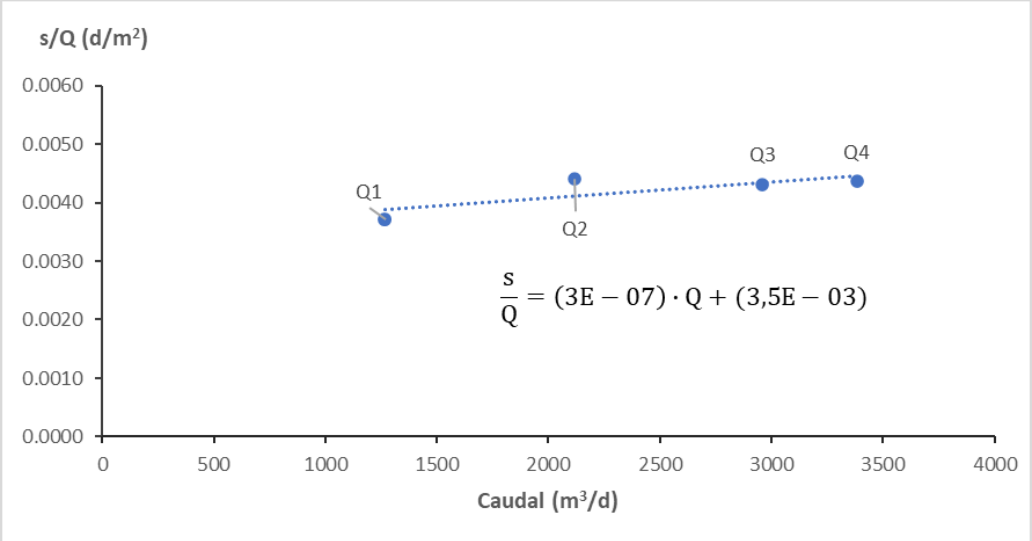
La Tabla 9 detalla los escalones, los cuales, de acuerdo con las proyecciones basadas en las líneas de tendencia de tipo logarítmica, mostraron una estabilización en sus niveles. El grafico de la Figura 5, muestra el resultado de regresión lineal para conocer las constantes B (3,5E-03 d/m^2) y C (3E-07) para el cálculo de eficiencia, según el método de Hantush & Bierschenk.

El pozo logra su máxima eficiencia al operar a un caudal de 15 L/s, alcanzando un rendimiento del 98,1%.

Tabla 9: Cálculo de eficiencia de pozo BRT-04 según método de Hantush & Bierschenk

Escalones	Q (L/s)	Q (m^3/d)	Nivel (mbpm)	S (m)	s/Q (d/m^2)	Tiempo (min)	T acumulado (min)	Eficiencia (%)
Q1	15	1269	152,3	4,7	0,0037	120	120	98,1
Q2	25	2115	156,9	9,3	0,0044	120	240	94,9
Q3	35	2961	160,4	12,8	0,0043	120	360	90,5
Q4	40	3384	162,4	14,8	0,0044	120	480	87,9

Notas: Nivel en metros bajo punto de medición (mbpm).
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Gráfico de regresión para el cálculo de las constantes B y C en el método de Hantush & Bierschenk

3.1.2 Pruebas de Gasto Constante

Las PGC consistieron en el bombeo con un caudal definido durante un tiempo determinado. Estas pruebas se desarrollaron de acuerdo con las bases técnicas de Codelco y los requerimientos técnicos establecidos por la DGA, donde se define que la duración mínima de la prueba es de 24 hrs y se requiere un tiempo de estabilización de niveles dinámicos durante las 3 últimas horas de registro, con un descenso igual o inferior a 2 cm/hora. La PGC busca conocer el comportamiento del acuífero y estimar los parámetros hidráulicos como la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S).

A partir estas pruebas se estimaron los valores de parámetros hidráulicos. En particular, mediante el análisis de los pozos de bombeo se obtuvieron valores de transmisividad (T), con los métodos de Cooper & Jacob I[2], Theis[3] y recuperación de Theis. En cuanto al coeficiente de almacenamiento (S), este se obtuvo a partir de la interpretación de los pozos de observación cercanos al pozo bombeado, mediante los métodos de Cooper & Jacob I, Theis y Neuman[4]. A continuación, se detallan los resultados obtenidos por pozo.

Pozo BRT-01

La PGC se inició el 18-11-2024 a las 11:30 hrs, con un caudal de 30 L/s y una extensión temporal de 72 hrs, para posteriormente detener el bombeo, e iniciar un periodo de recuperación cuyo monitoreo abarcó 6hrs. Los resultados de las interpretaciones de los parámetros hidráulicos T y S para el pozo BRT-01 en la PGC se muestran en la Tabla 10. En el Anexo A se encuentran los gráficos de descenso versus tiempo con los datos de terreno, las curvas de ajuste y los resultados obtenidos según cada método.

Tabla 10: Resumen de valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para la PGC del pozo BRT-01.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m^2/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-01	Bombeo	60	Gasto constante	Cooper & Jacob I	470	8	-
				Theis	470	8	-
			Recuperación	Theis Recovery	2.000	34	-
ORT-01	Observación	54	Gasto constante	Cooper & Jacob I	660	12	2,7E-01
				Theis	790	15	9,4E-02
				Neuman	700	13	3,4E-01
			Recuperación	Theis Recovery	2.100	40	-

Fuente: Elaboración propia

[2] Cooper, H.H. and C.E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Am. Geophys. Union Trans., vol. 27, pp. 526-534.

[3] Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geophys. Union Trans., vol. 16, pp. 519-524.

[4] Neuman, S.P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed yield, Water Resources Research, vol. 11, no. 2, pp. 329-342.

A partir de la PGC en el pozo BRT-01, y su pozo de observación ORT-01, se estima una transmisividad del acuífero entre 470 y 2.100 m^2/d, y un almacenamiento del orden de 9E-02 a 3E-01.

Pozo BRT-2

La PGC se inició el 05-11-2024 a las 23:00 hrs considerando un caudal de 10 L/s y una extensión temporal de 72 hrs, para posteriormente detener el bombeo, e iniciar un periodo de recuperación cuyo monitoreo abarcó 9 hrs. Los resultados de las interpretaciones de los parámetros hidráulicos T y S para el pozo BRT-02 en la PGC se muestran en la Tabla 11. En el Anexo A se encuentran los gráficos de descenso versus tiempo con los datos de terreno, las curvas de ajuste y los resultados obtenidos según cada método.

Tabla 11: Resumen de valores de Transmisividad y Coeficiente de almacenamiento para la PGC del pozo BRT-02.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m^2/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-02	Bombeo	61	Gasto constante	Cooper & Jacob I	140	2	-
				Theis	200	3	-
			Recuperación	Theis Recovery	980	16	-
PCH-14	Observación	93	Gasto constante	Cooper & Jacob I	890	10	-
				Theis	890	10	-
				Neuman	310	3	2,0E-02
			Recuperación	Theis Recovery	1.300	14	-

Fuente: Elaboración propia

A partir de la PGC en el pozo BRT-02, y su pozo de observación PCH-14, se estima una transmisividad del acuífero entre 140 y 1.300 m^2/d, y un almacenamiento del orden de 2E-02.

Pozo BRT-3

En el pozo BRT-3 se realizaron 2 pruebas de bombeo, según se describe a continuación. La primera PGC se inició el 18-10-2024 a las 10:30 hrs considerando un caudal de 35 L/s y una extensión temporal de 55 hrs, para posteriormente detener el bombeo, e iniciar un periodo de recuperación cuyo monitoreo abarcó 5 hrs. Posteriormente, el día 21-10-2024 a las 00:00 hrs se inició la segunda prueba, considerando el mismo caudal y una duración de 20 hrs. Al finalizar dicho bombeo se monitoreo el tiempo de recuperación por 2 hrs.

Cabe destacar, que no se percibió variación de nivel en los datos del pozo de observación ORT-03 durante la recuperación posterior al bombe de 20 hrs.

Los resultados de las interpretaciones de los parámetros hidráulicos T y S para el pozo BRT-03 se muestran en la Tabla 12. En el Anexo A se encuentran los gráficos de descenso versus tiempo con los datos de terreno, las curvas de ajuste y los resultados obtenidos según cada método.

Tabla 12: Resumen de valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para la PGC del pozo BRT-03

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m^2/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-03	Bombeo	67	Gasto constante (55 hr)	Cooper & Jacob I	13.300	199	-
				Theis	6.000	90	-
			Recuperación (55 hr)	Theis Recovery	5.700	85	-
			Gasto constante (20 hr)	Cooper & Jacob I	7.100	105	-
				Theis	6.000	89	-
			Recuperación (20 hr)	Theis Recovery	2.700	40	-
ORT-03	Observación	119	Gasto constante (55 hr)	Cooper & Jacob I	7.700	65	-
				Theis	6.200	52	-
				Nuemann	620	5	2,9E-01
			Recuperación (55 hr)	Theis Recovery	5.100	43	-
			Gasto constante (20 hr)	Cooper & Jacob I	4.100	35	-
				Theis	4.200	35	-
				Neuman	420	4	1,2E-01

Fuente: Elaboración propia

A partir de la PGC en el pozo BRT-03, y su pozo de observación ORT-03, se estima una transmisividad del acuífero entre 420 y 13.300 m^2/d, y un almacenamiento del orden de 1E-01 a 3E-01.

Pozo BRT-4

La PGC dio inicio el 06-12-2024 a las 20:00 hrs considerando un caudal de 35 L/s y una extensión temporal de 72 hrs, para posteriormente detener el bombeo, e iniciar un periodo de recuperación cuyo monitoreo abarcó 12 hrs. Los resultados de las interpretaciones de los parámetros hidráulicos T y S para el pozo BRT-04 en la PGC se muestran en la Tabla 13. En el Anexo A se encuentran los gráficos de descenso versus tiempo con los datos de terreno, las curvas de ajuste y los resultados obtenidos según cada método.

Tabla 13: Resumen de valores de Transmisividad y Coeficiente de almacenamiento para la PGC del pozo BRT-04.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m^2/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-04	Bombeo	56	Gasto constante	Cooper & Jacob I	1.700	30	-
				Theis	1.500	27	-
			Recuperación	Theis Recovery	3.700	67	-
ORT-04	Observación	54	Gasto constante	Cooper & Jacob I	35.000	650	8,7E-02

Fuente: Elaboración propia

A partir de la PGC en el pozo BRT-04, y su pozo de observación ORT-04, se estima una transmisividad del acuífero entre 1.500 y 35.000 m^2/d, y un almacenamiento del orden de 9E-02.

3.1.3 Radio de influencia

La estimación de radios de influencia, en la concepción cónica tradicional, no tiene validez práctica en este estudio, dado el contexto geológico particular del sitio. La existencia de un paleo canal, constituido por un medio de mayor permeabilidad respecto a sus bordes laterales, induce que, ante a un bombeo o una inyección, el frente de perturbación del gradiente se propague siguiendo la geometría del paleo cauce, es decir con una elongación aproximada NW-SW (similar a la que tiene la pluma de SO_4). En casos como este, la estimación del radio de influencia por medio de métodos analíticos, como por ejemplo el método de Thiem, no son la herramienta indicada para la determinación de dicha propagación, siendo más adecuado la utilización de otros enfoques (por ejemplo, modelación numérica).

3.2 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

El ensayo de inyección consiste en dos fases, una primera de carga constante, donde se inyecta un caudal constante para mantener un nivel fijo durante un tiempo determinado, al finalizar la inyección de agua comienza la segunda fase denominada de carga variable donde se mide el descenso del nivel hasta alcanzar el equilibrio.

La prueba de inyección de gasto constante se analiza mediante la fórmula de estimación de conductividad hidráulica, según la expresión:

$$K = \frac{Q}{C x h_m}$$

donde:

K: Conductividad hidráulica

Q: Caudal inyectado

h_m: Altura del agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático previo

C: Factor de forma, equivalente a,

$$C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/d)}$$

L: Longitud de la zona filtrante

D: Diámetro la zona filtrante

En cuanto a las pruebas de inyección de carga variable, estas fueron analizadas con el método de Hvorslev[5], para estimar los valores de K.

En total, se realizaron 8 ensayos de infiltración, resumidos en la Tabla 14, observándose un máximo de conductividad hidráulica en el pozo BRT-01 con 35 m/d y un valor mínimo en el pozo ORT-03 con 0,02 m/d.

En el Anexo B se encuentran los gráficos con los datos de terreno y el ajuste mediante el método Hvorslev para las pruebas de inyección de carga variable.

Tabla 14: Resumen de valores de ensayos de infiltración

Pozo	Fecha	Ensayo de carga constante			Ensayo de carga variable		Promedio (m/d)
		Caudal (L/s)	Tiempo (min)	K (m/d)	Tiempo (min)	K (m/d)	
ORT-01	09-11-2024	10	1440	3,6E+00	360	1,4E-01	3,8E+00
BRT-01	09-11-2024	10	1440	3,5E+01	360	5,4E-01	3,6E+01
BRT-02	22-11-2024	15	1440	2,7E-01	240	1,8E-01	4,5E-01
PCH-14	22-11-2024	15	1440	1,1E+01	240	1,2E-01	1,1E+01
BRT-03	10-12-2024	20	1500	1,1E+01	120	1,3E+00	1,2E+01
ORT-03	10-12-2024	20	1500	3,3E+01	120	1,9E-02	3,3E+01
ORT-04	26-11-2024	15	1440	3,1E+01	180	5,9E-02	3,1E+01
BRT-04	27-11-2024	15	1440	7,2E-01	180	3,6E-01	1,1E+00

Fuente: Elaboración propia

4 RESUMEN DE RESULTADOS

- A partir de las PGV los pozos de bombeo/inyección muestran una eficiencia máxima con extracciones de 10 L/s (BRT-1, BRT-2) y 15 L/s (BRT-3, BRT-4).
- A partir de las PGC se obtienen valores de Transmisividad en torno a los 4.000 m^2/d, con valores que varían entre 140 a 35.000 m^2/d, y coeficientes de almacenamiento en torno a los 0,2, con mínimos de 0,02 y máximos de 0,3.
- De la interpretación de los ensayos de inyección se obtienen valores de K en torno a los 8 m/d, con valores que varían entre los 0,02 y 35 m/d.

[5] Hvorslev, M.J., 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bul. no. 26, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.

Este Memorándum Técnico ha sido preparado para los objetivos acordados con la Gerencia de Desarrollo Distrito Norte de Codelco. Es confidencial y se enmarca en las actividades de asesoría del contrato firmado entre las partes.

Flow Hydro Consulting Group

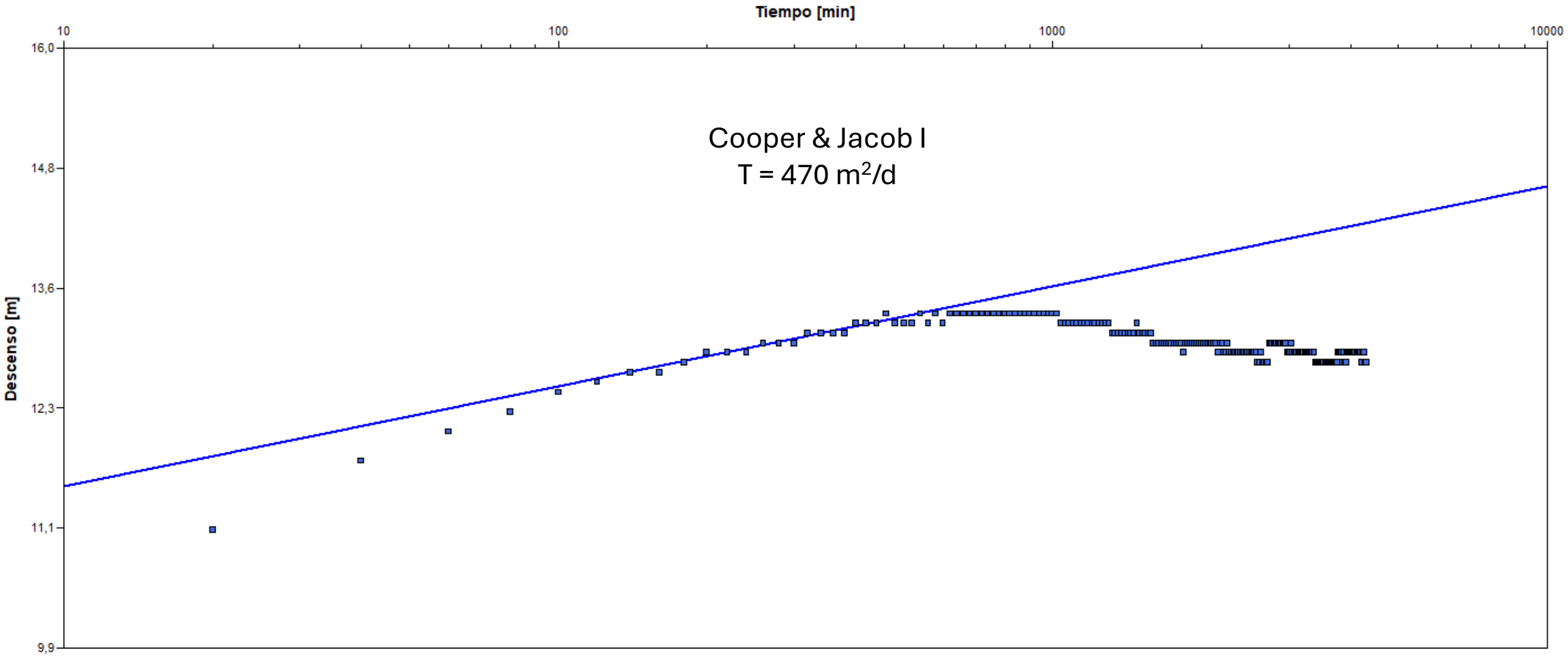
5 de febrero de 2025

ANEXO A

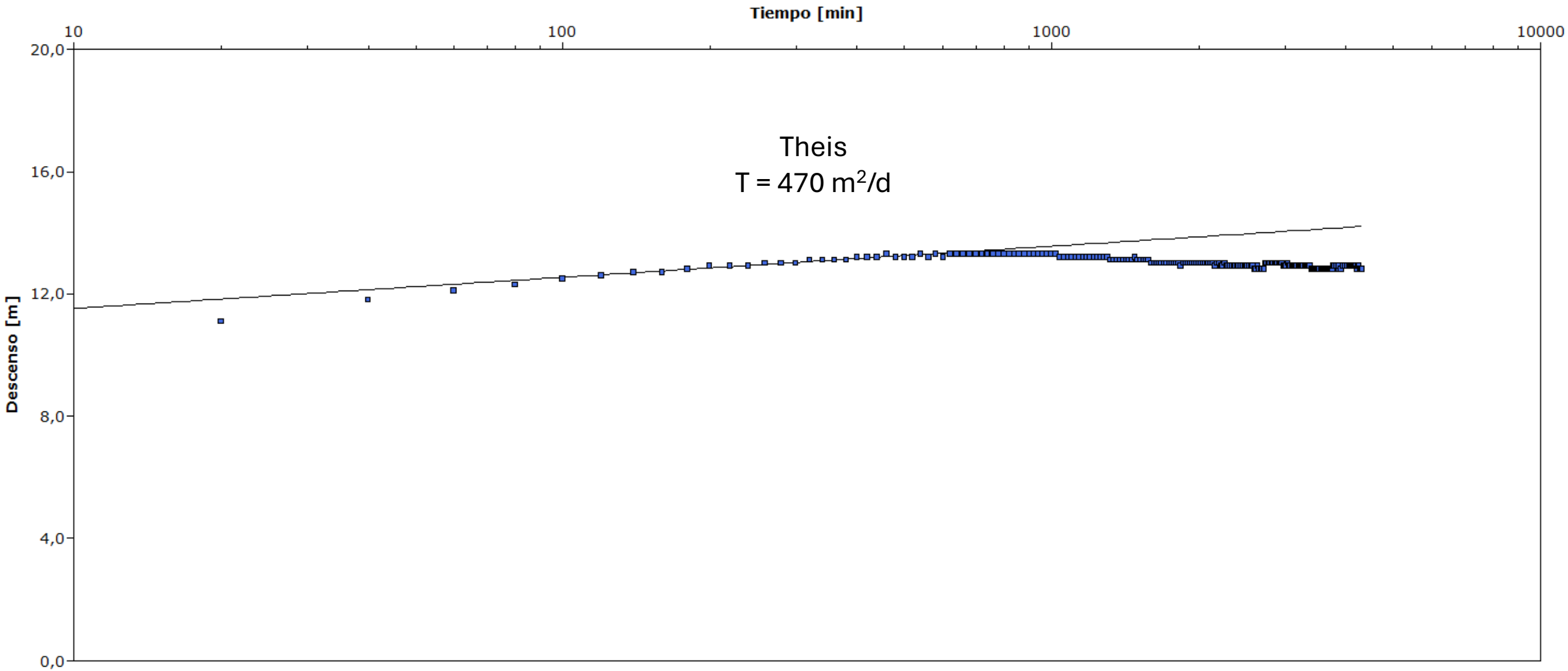
Interpretación de Pruebas de Gasto Constante

Anexo A – Interpretación PGC

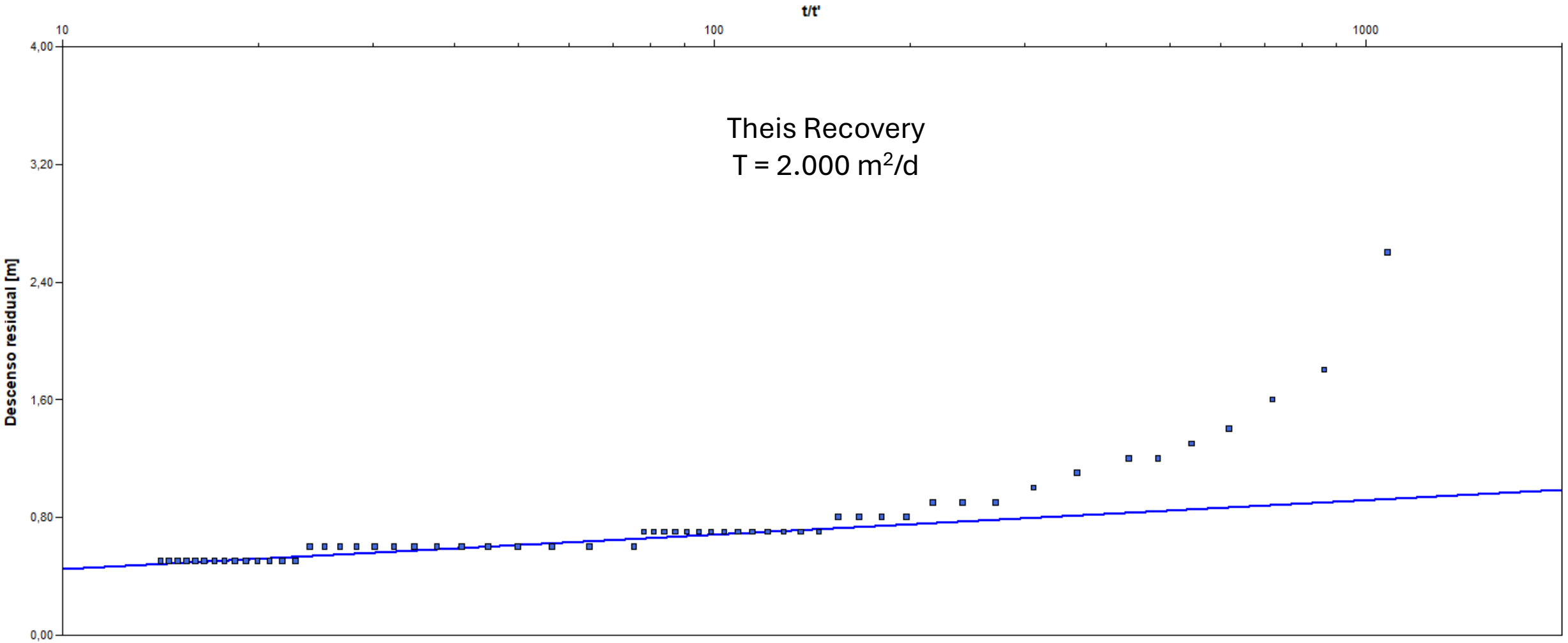
BRT-01 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
16,0
14,8
13,6
12,3
11,1
9,9
Descenso [m]
Cooper & Jacob I
T = 470 m²/d

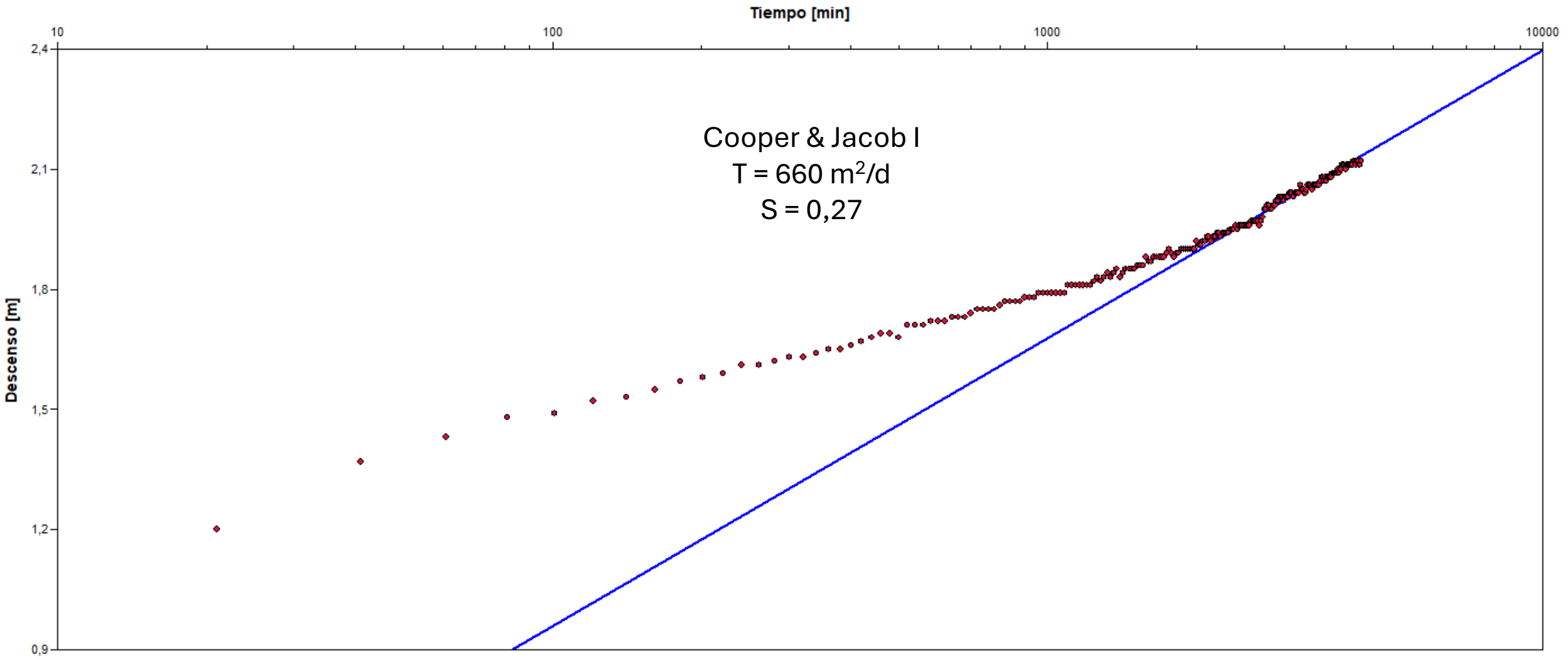
BRT-01 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
20,0
16,0
12,0
8,0
4,0
0,0
Descenso [m]
Theis
T = 470 m²/d

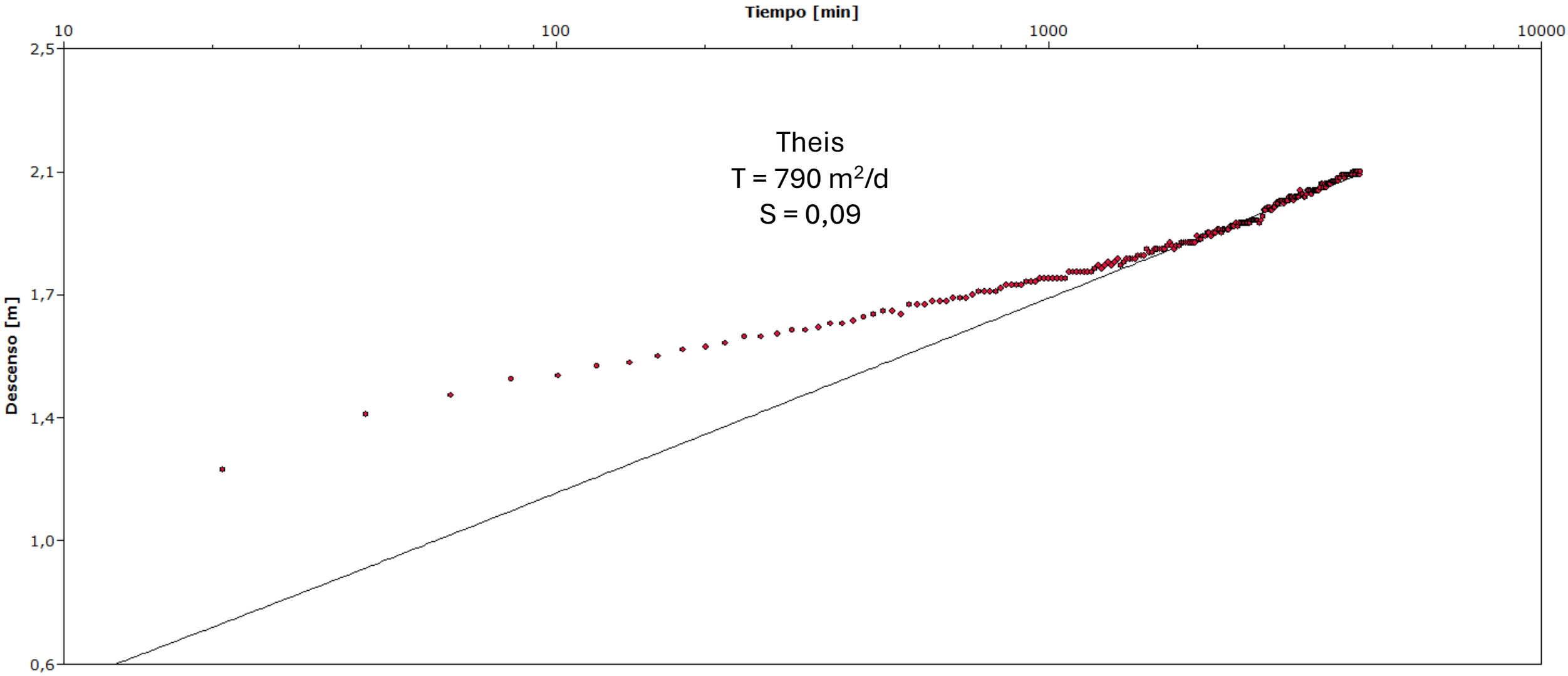
BRT-01 (Recuperación)



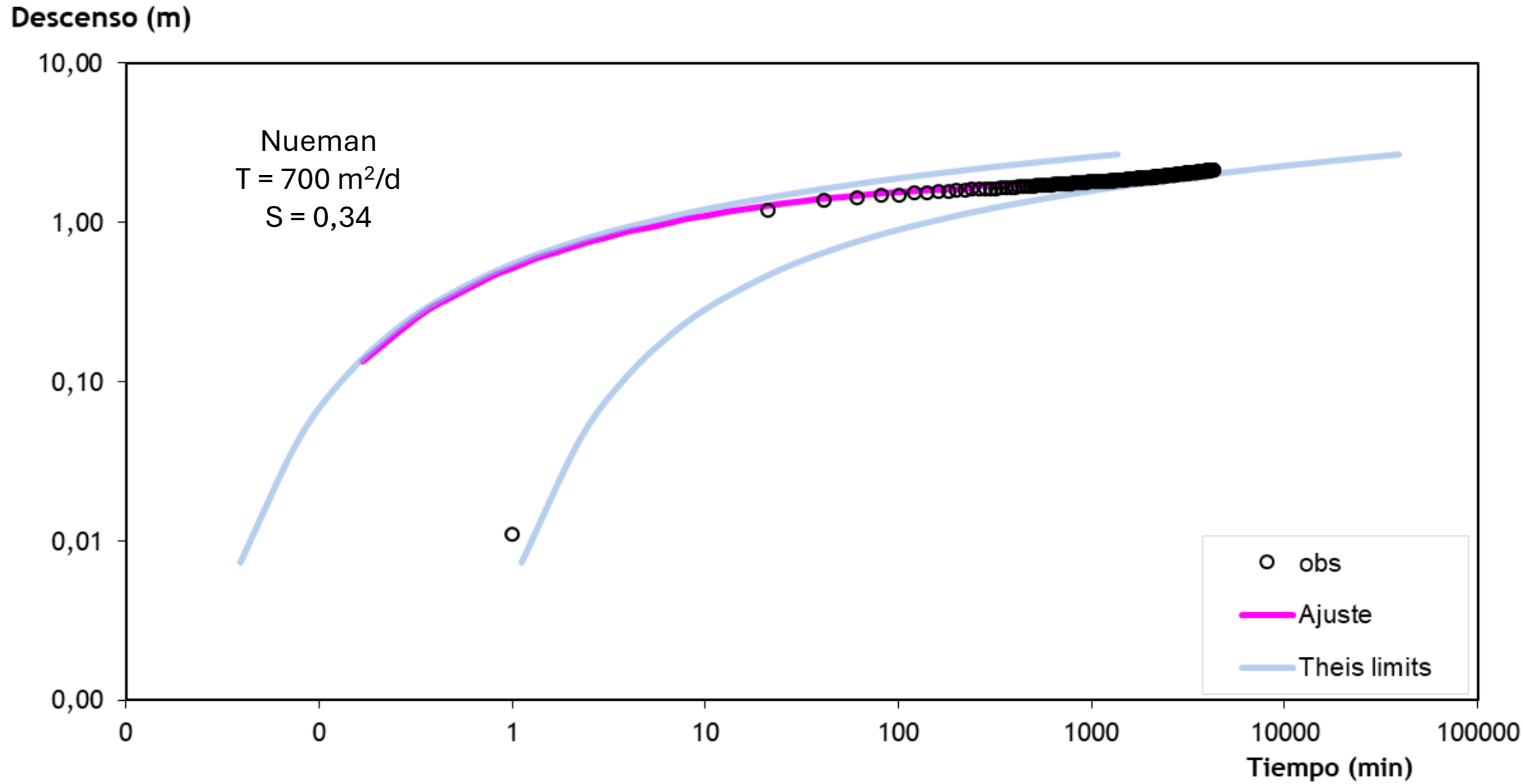
ORT-01 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
Descenso [m]
2,4
2,1
1,8
1,5
1,2
0,9
Cooper & Jacob I
T = 660 m²/d
S = 0,27

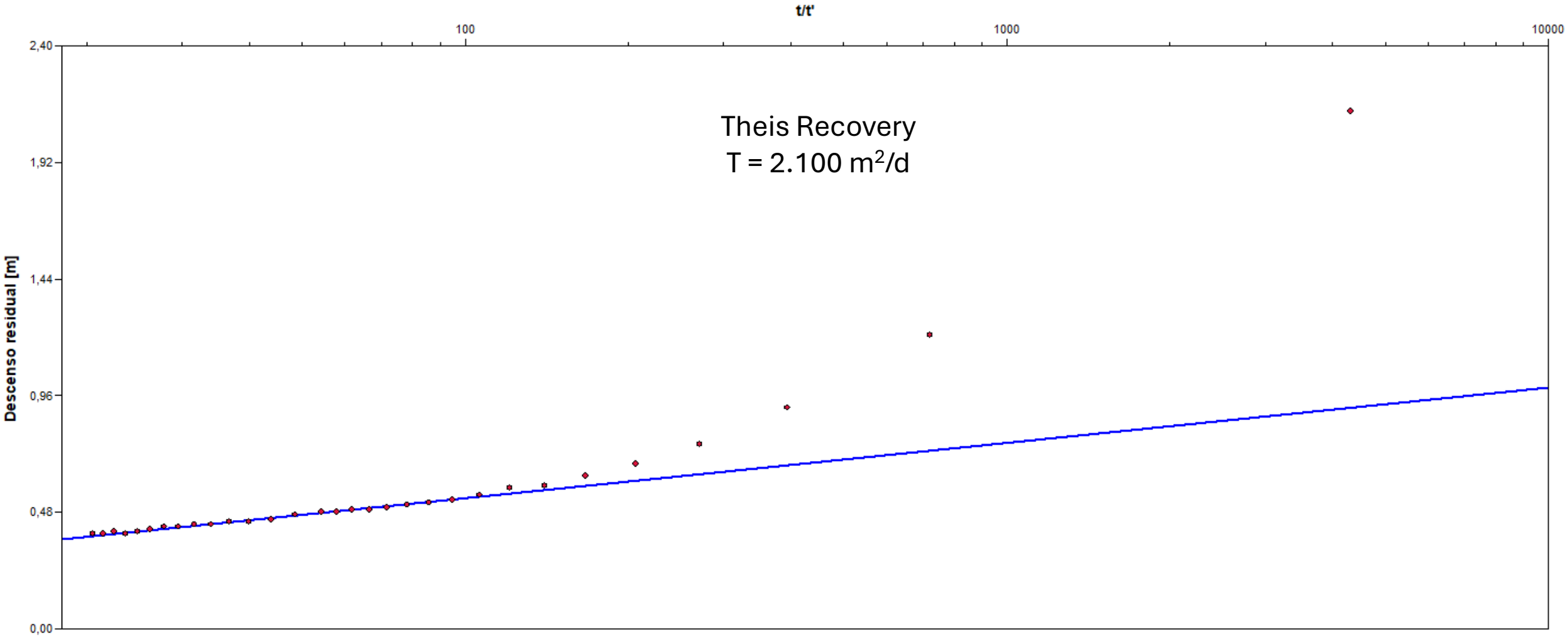
ORT-01 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
2,5
2,1
1,7
1,4
1,0
0,6
Descenso [m]
Theis
T = 790 m²/d
S = 0,09

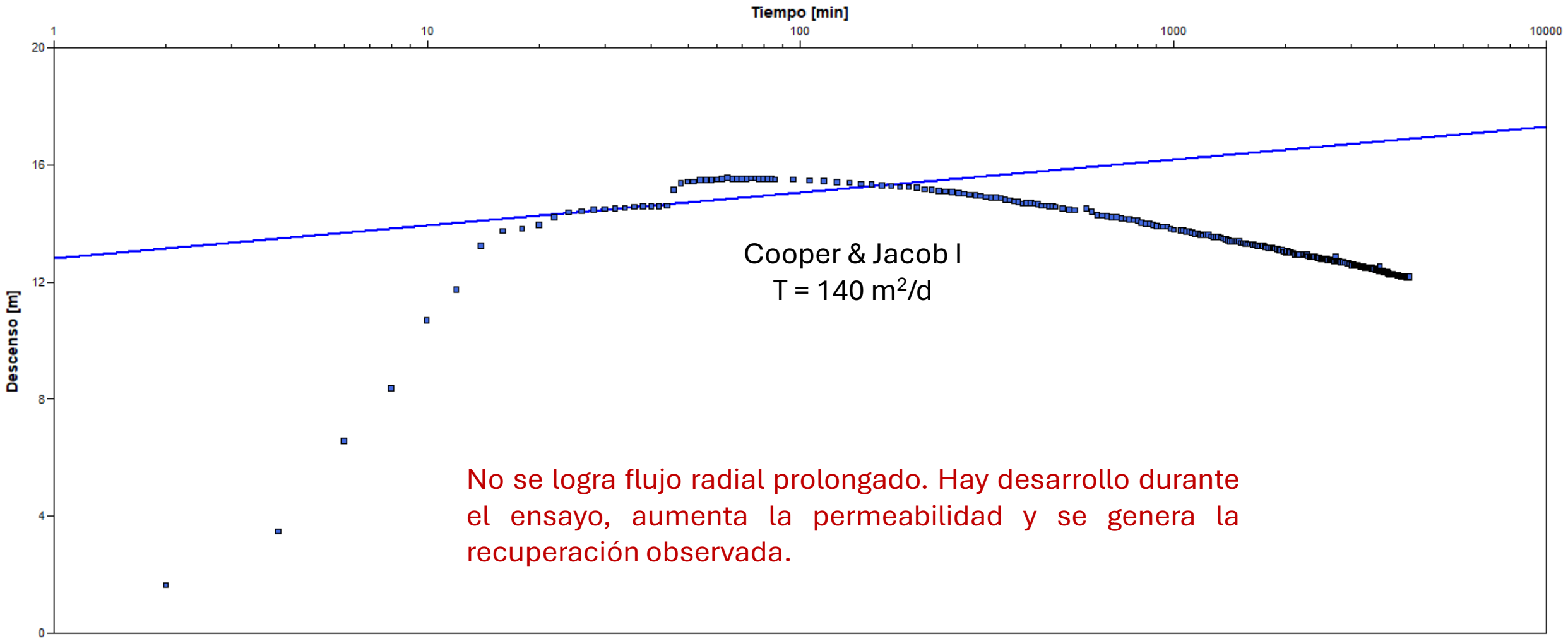
ORT-01(PGC)


Descenso (m)
10,00
1,00
0,10
0,01
0,00
Nueman
T = 700 m²/d
S = 0,34
obs
Ajuste
Theis limits
0
0
1
10
100
1000
10000
100000
Tiempo (min)

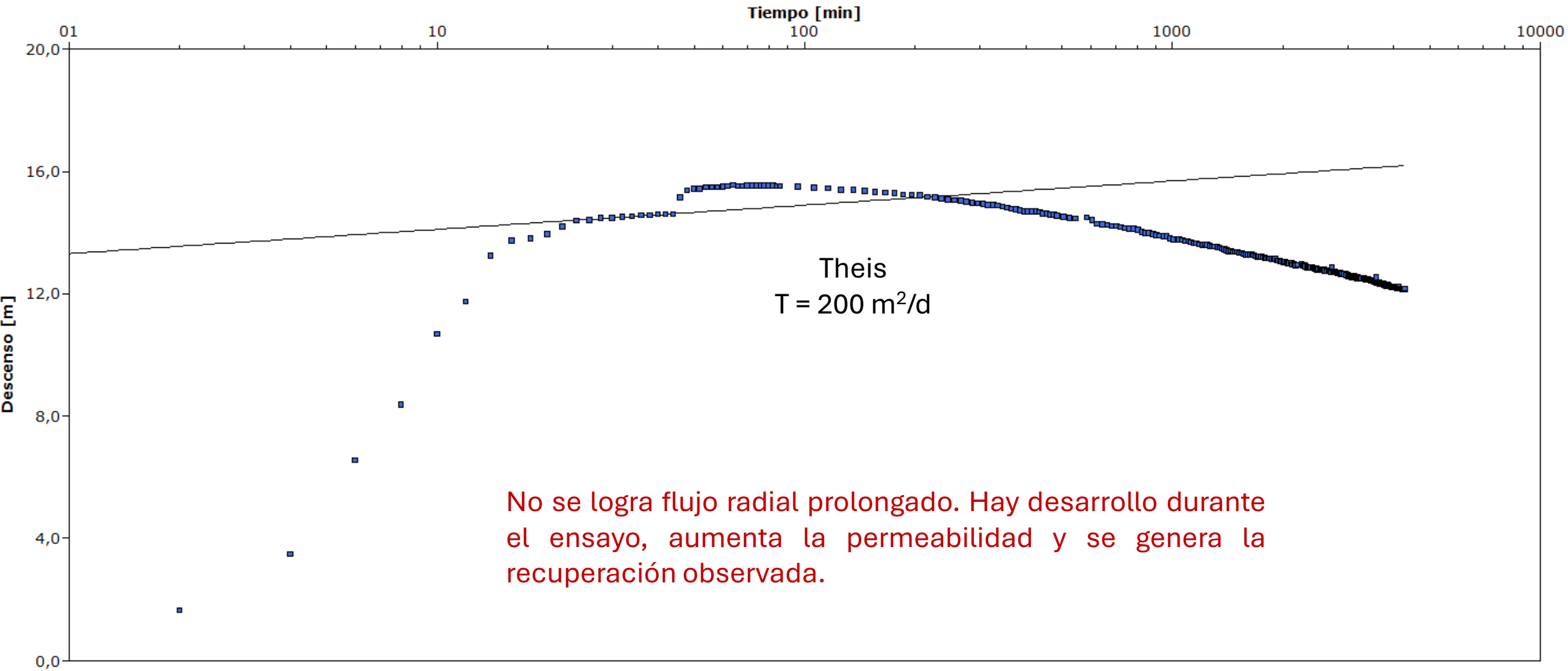
ORT-01 (Recuperación)



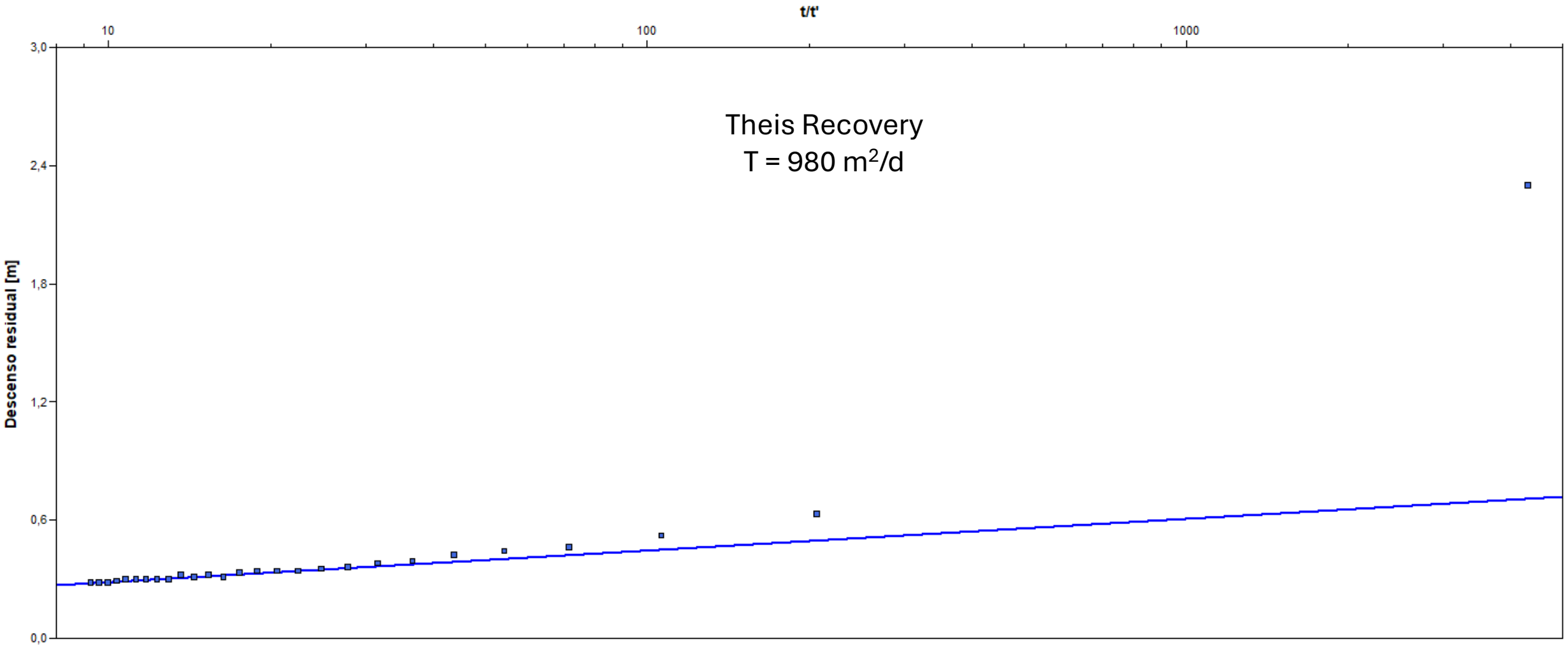
BRT-02 (PGC)


Tiempo [min]
1
10
100
1000
10000
Descenso [m]
0
4
8
12
16
20
Cooper & Jacob I
T = 140 m²/d
No se logra flujo radial prolongado. Hay desarrollo durante el ensayo, aumenta la permeabilidad y se genera la recuperación observada.

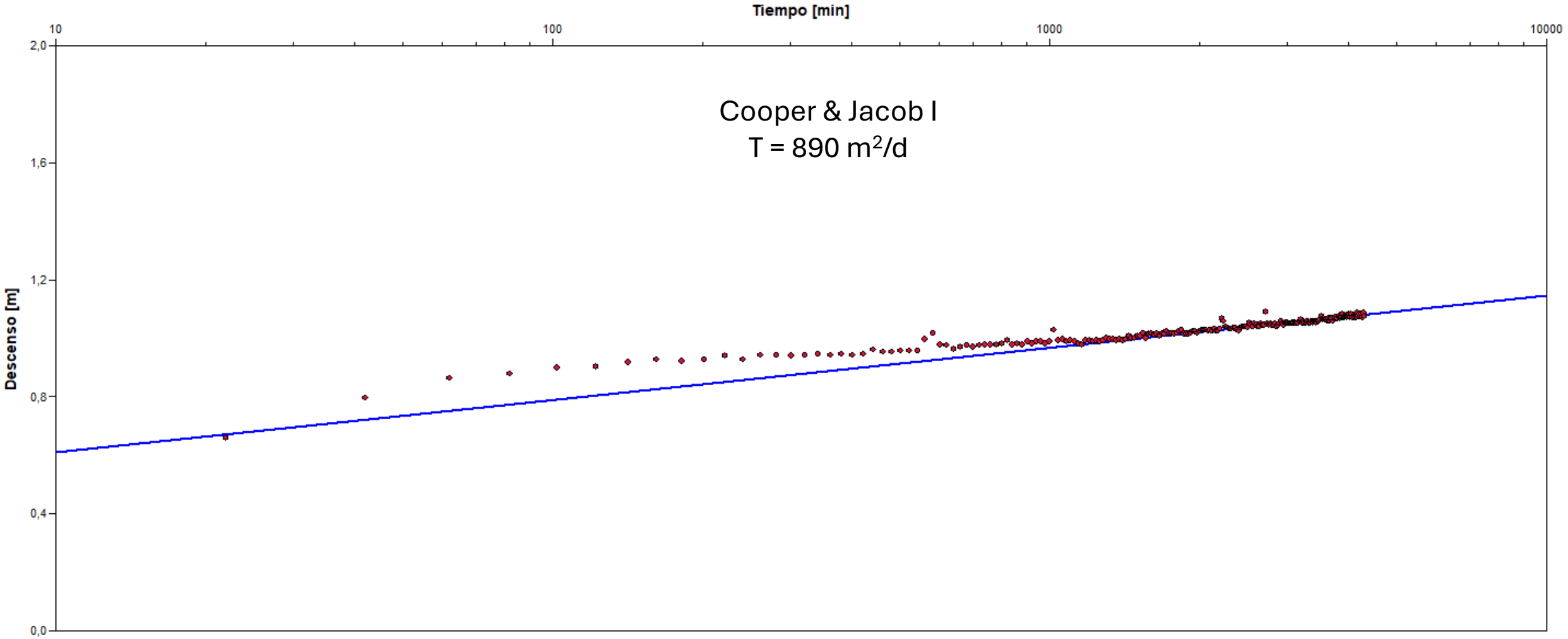
BRT-02 (PGC)


Tiempo [min]
01
10
100
1000
10000
20,0
16,0
12,0
8,0
4,0
0,0
Descenso [m]
Theis
T = 200 m²/d
No se logra flujo radial prolongado. Hay desarrollo durante el ensayo, aumenta la permeabilidad y se genera la recuperación observada.

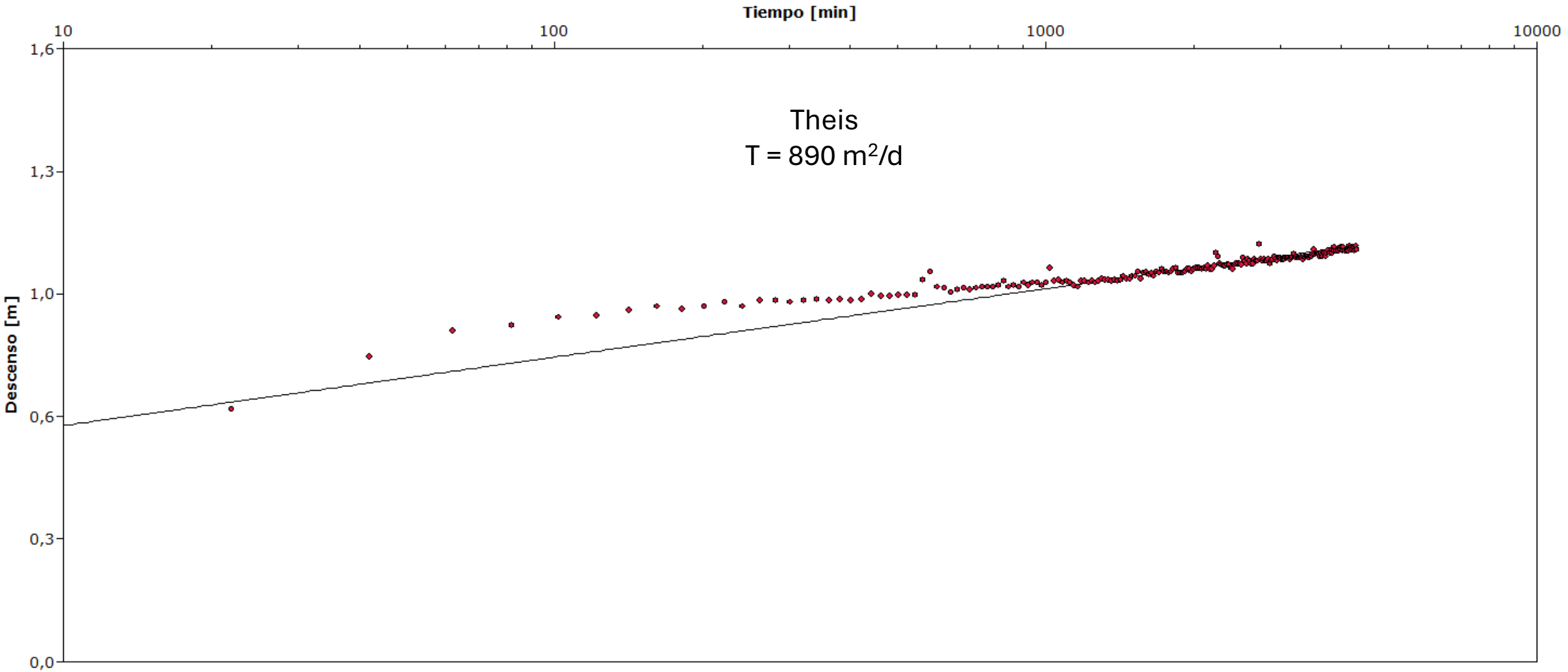
BRT-02 (Recuperación)



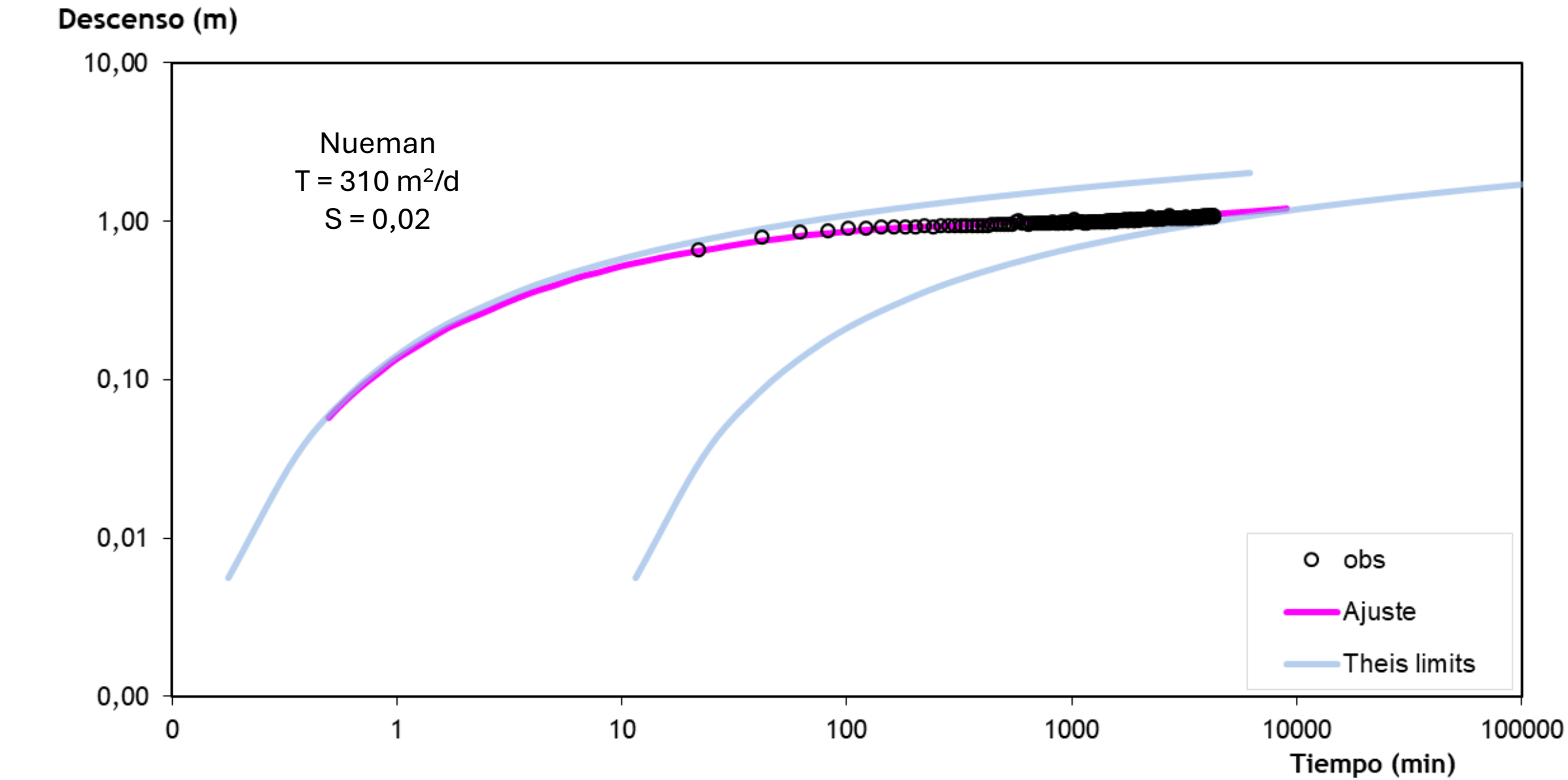
PCH-14 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
2,0
1,6
1,2
0,8
0,4
0,0
Descenso [m]
Cooper & Jacob I
T = 890 m²/d

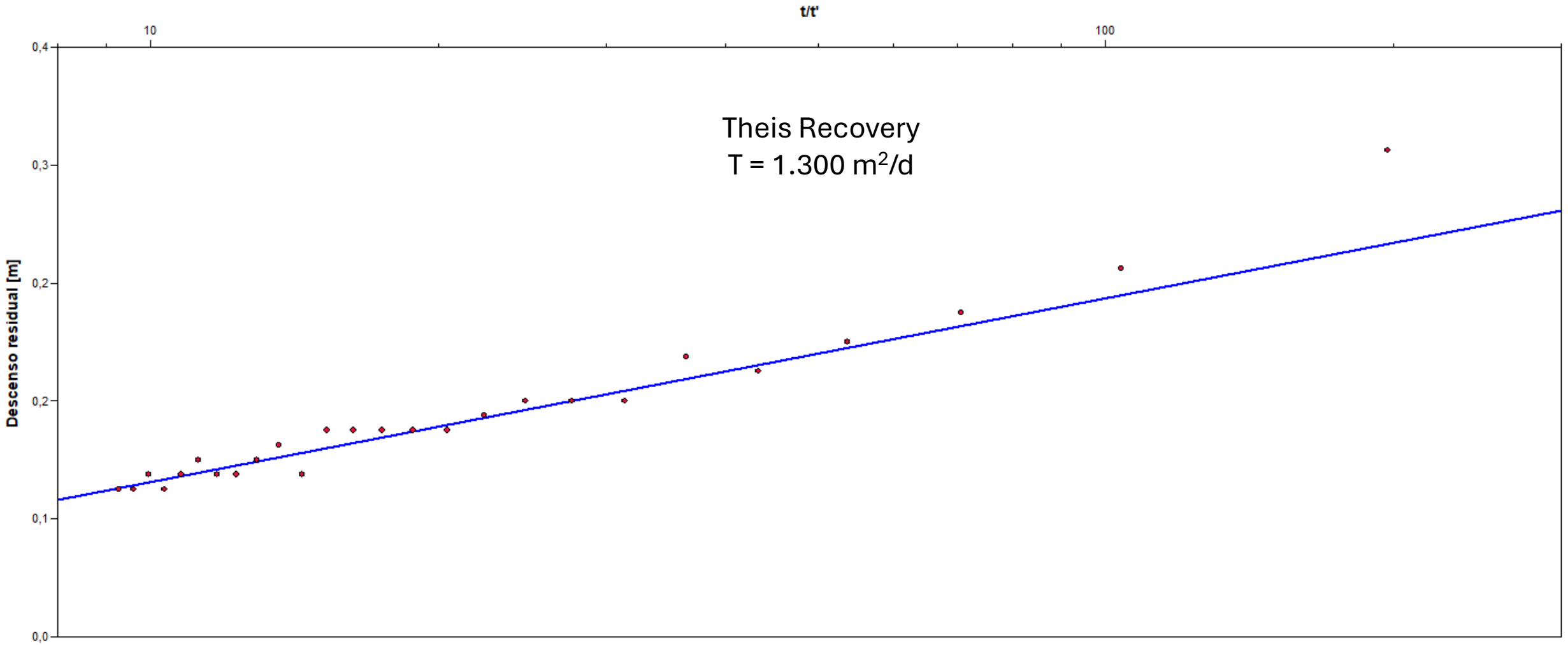
PCH-14 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
1,6
1,3
1,0
0,6
0,3
0,0
Descenso [m]
Theis
T = 890 m²/d

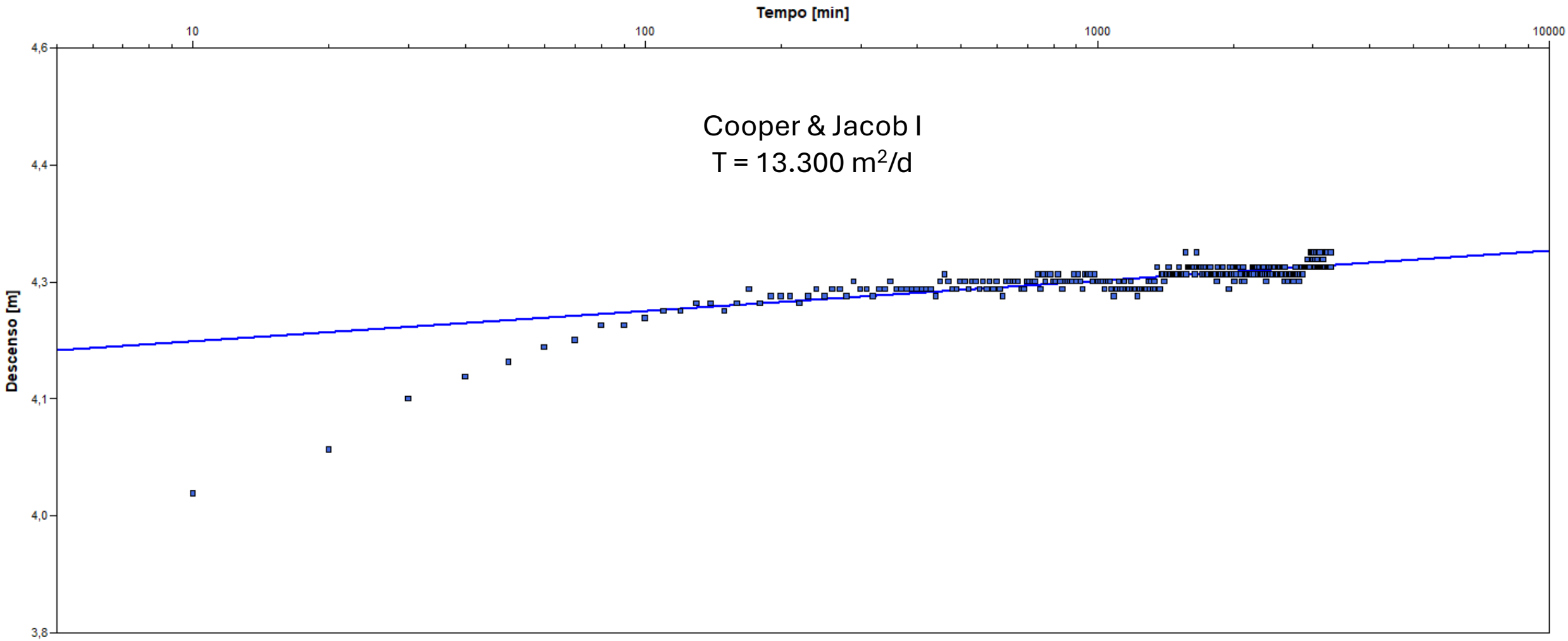
PCH-14 (PGC)


Descenso (m)
10,00
1,00
0,10
0,01
0,00
Nueman
T = 310 m²/d
S = 0,02
obs
Ajuste
Theis limits
0
1
10
100
1000
10000
100000
Tiempo (min)

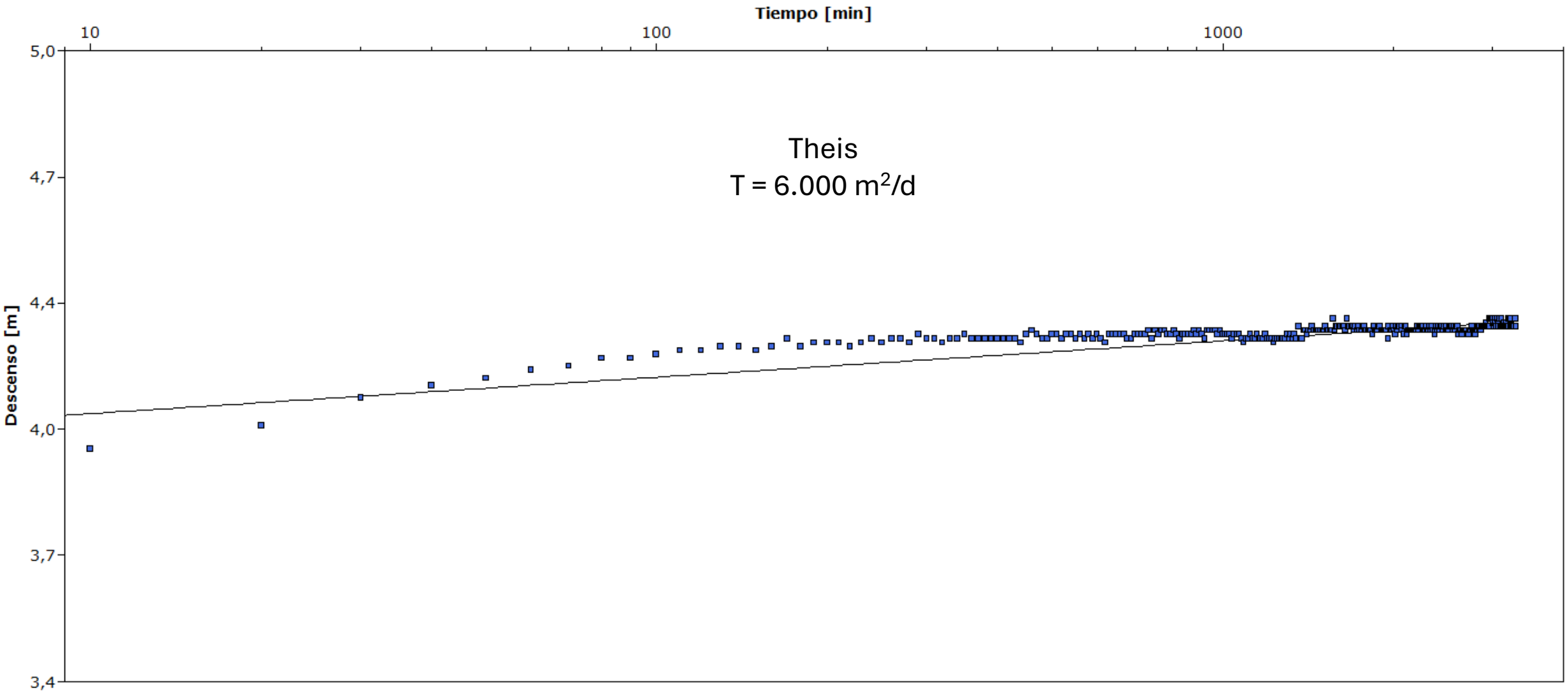
PCH-14 (Recuperación)



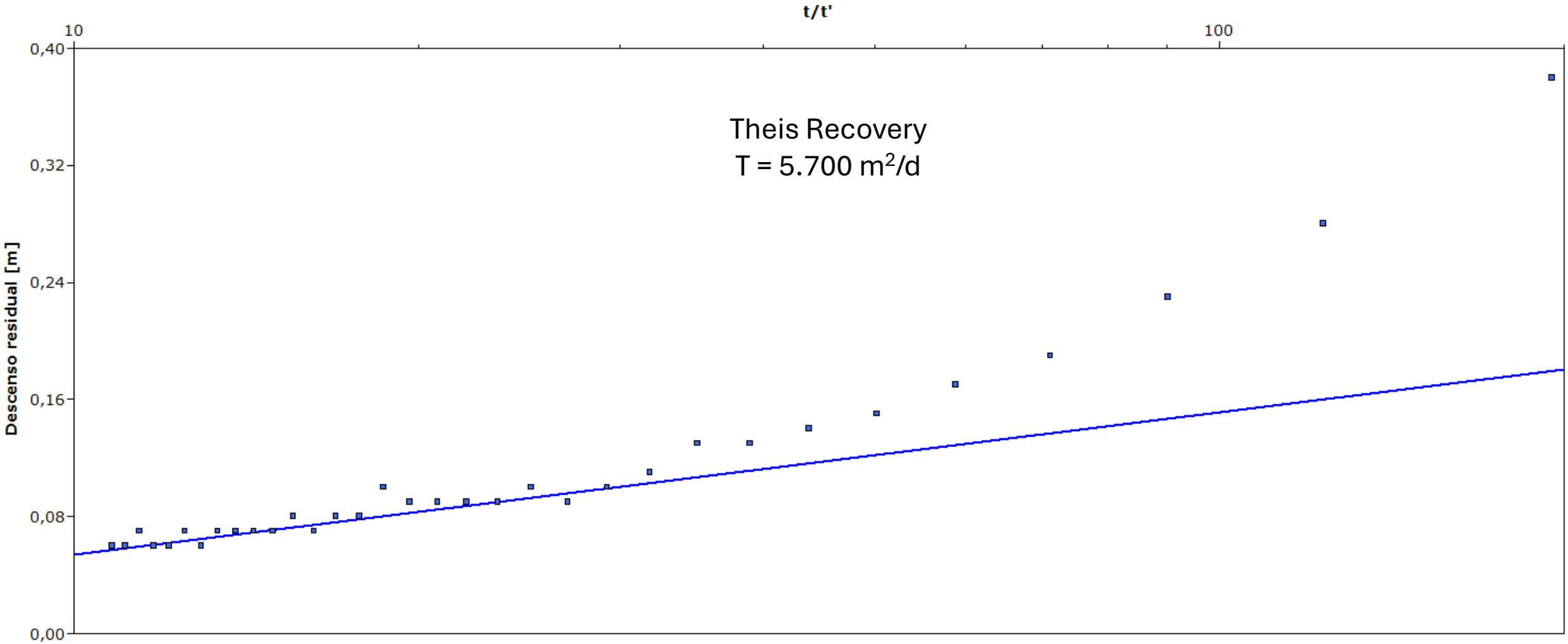
BRT-03 (PGC, 55 hrs)



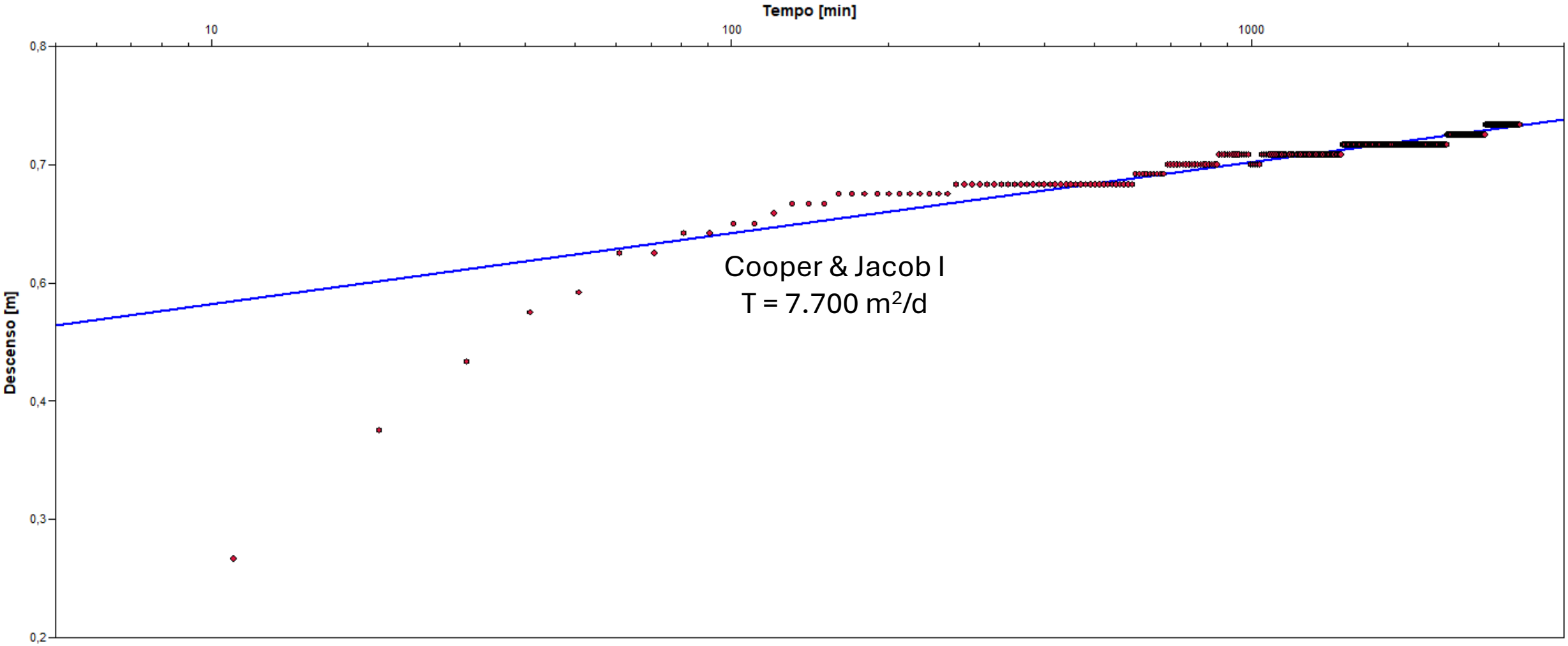
BRT-03 (PGC, 55 hrs)



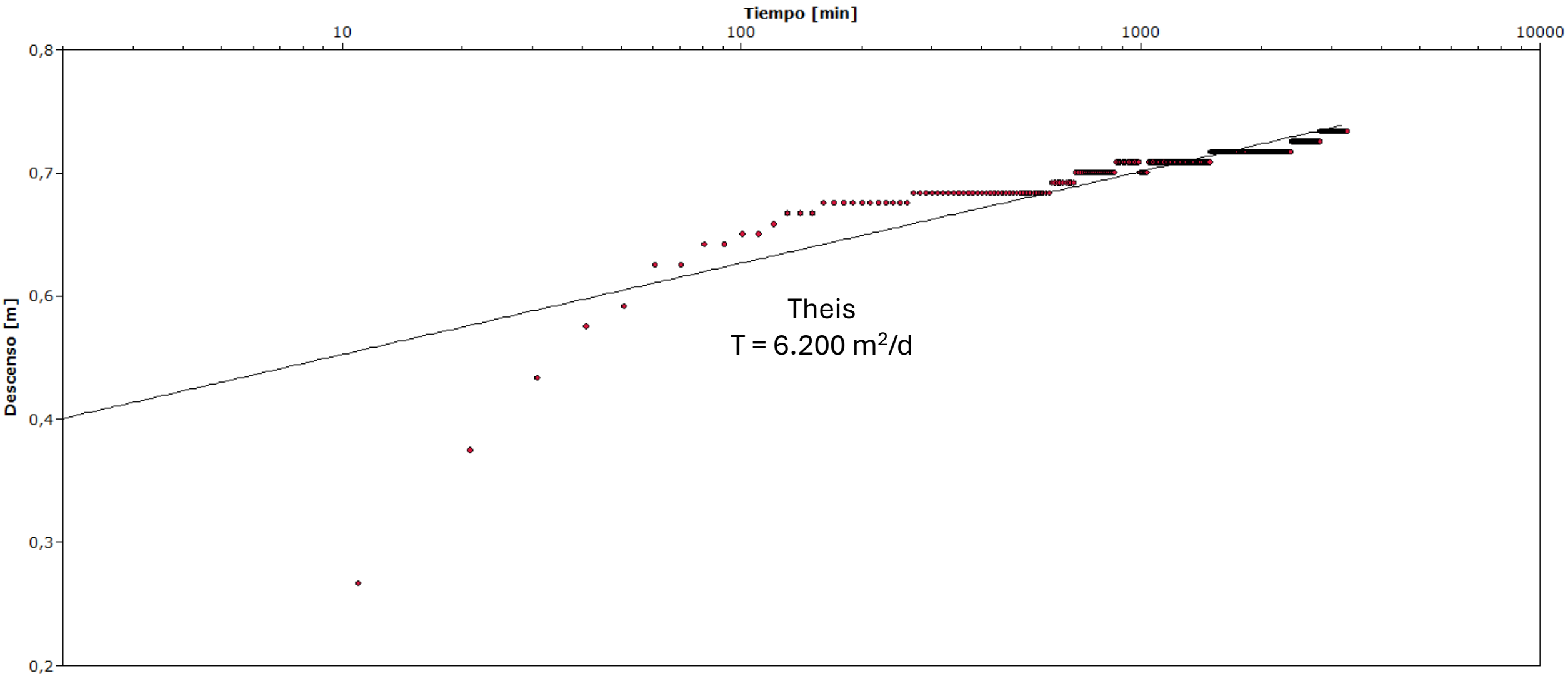
BRT-03 (PGC 55 hrs, Recuperación)



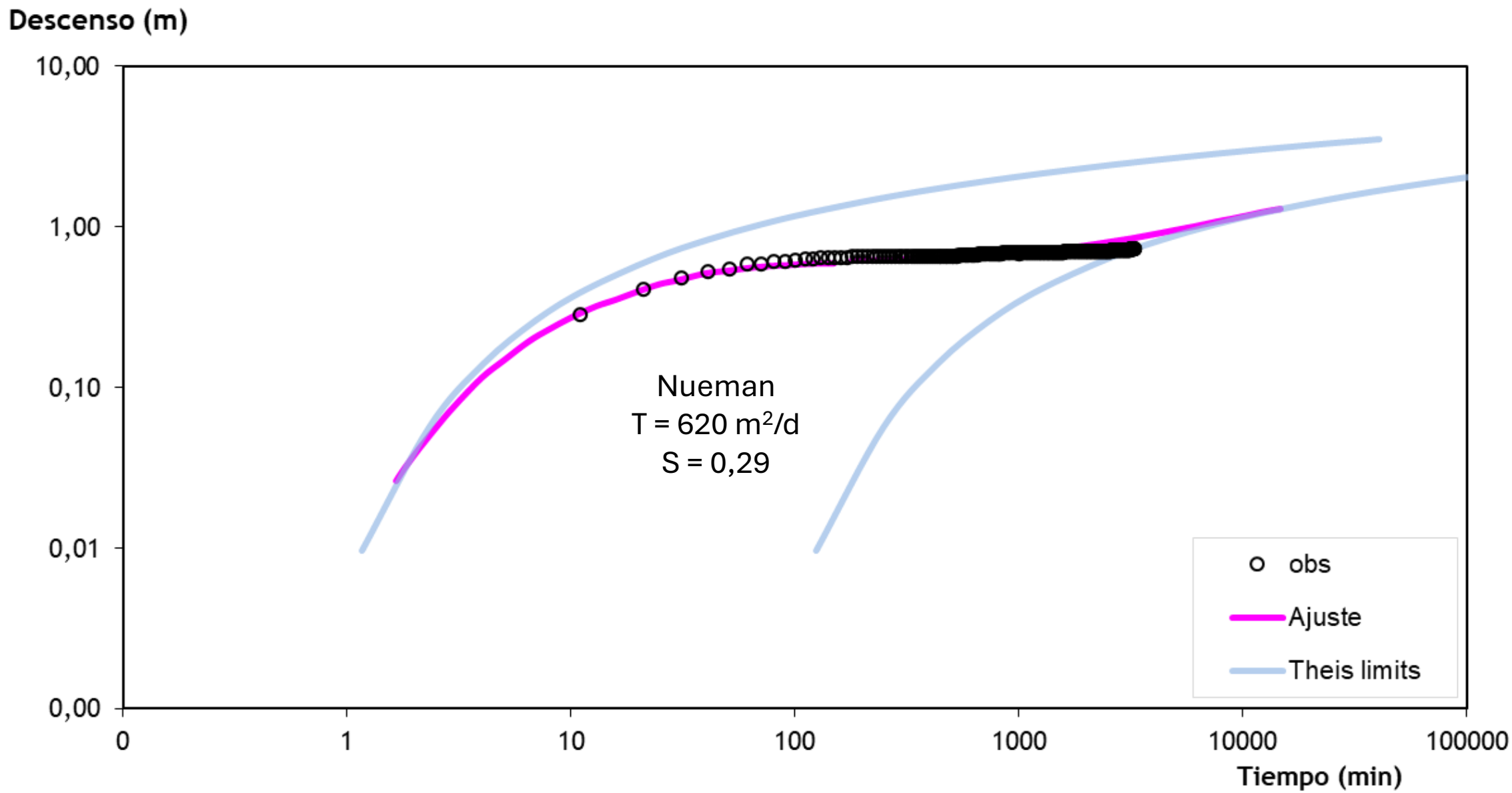
ORT-03 (PGC 55 hrs)



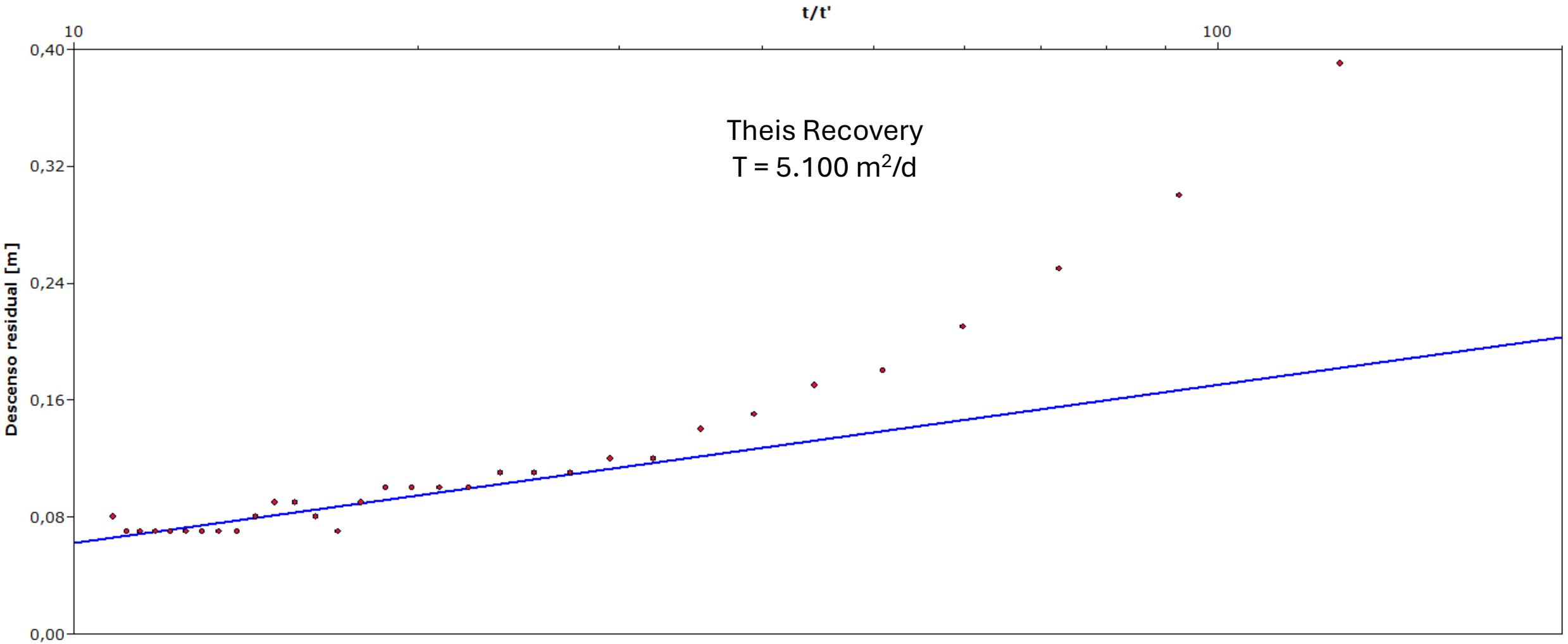
ORT-03 (PGC 55 hrs)



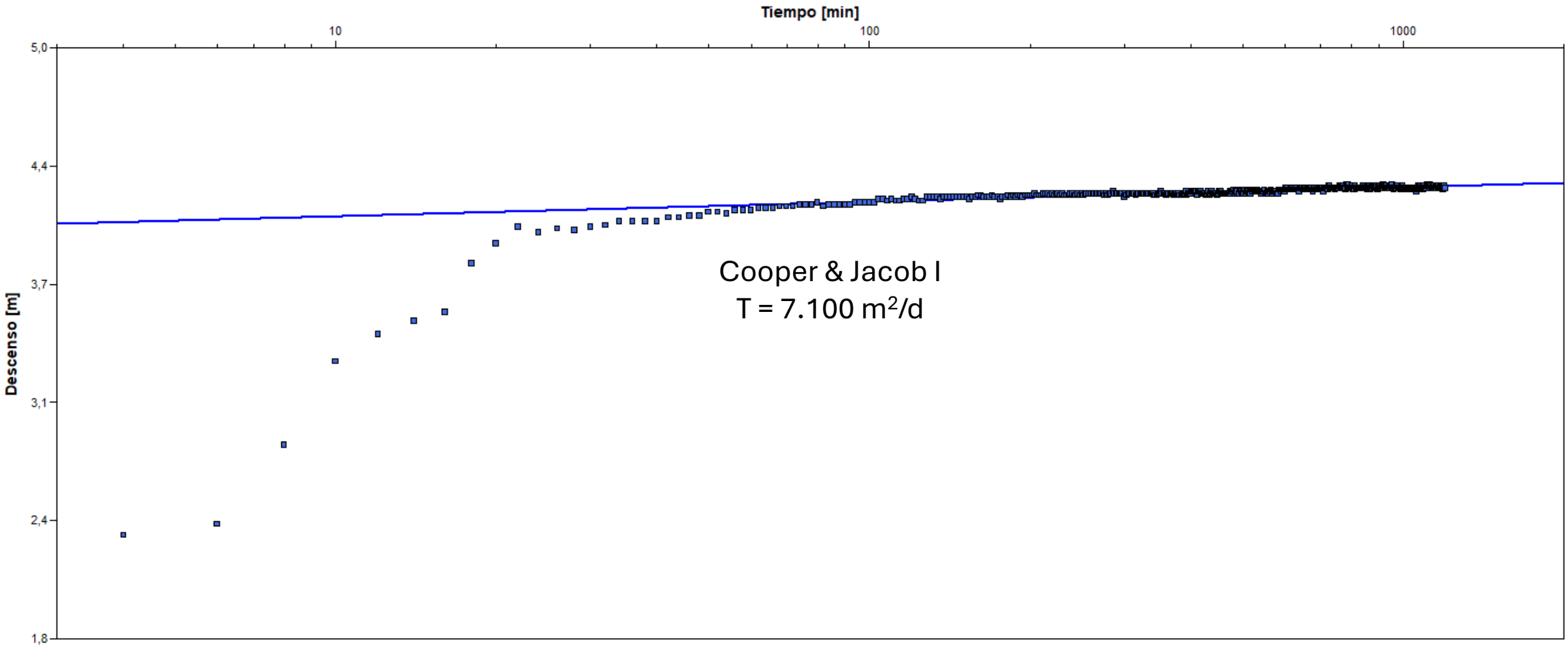
ORT-03 (PGC 55 hrs)



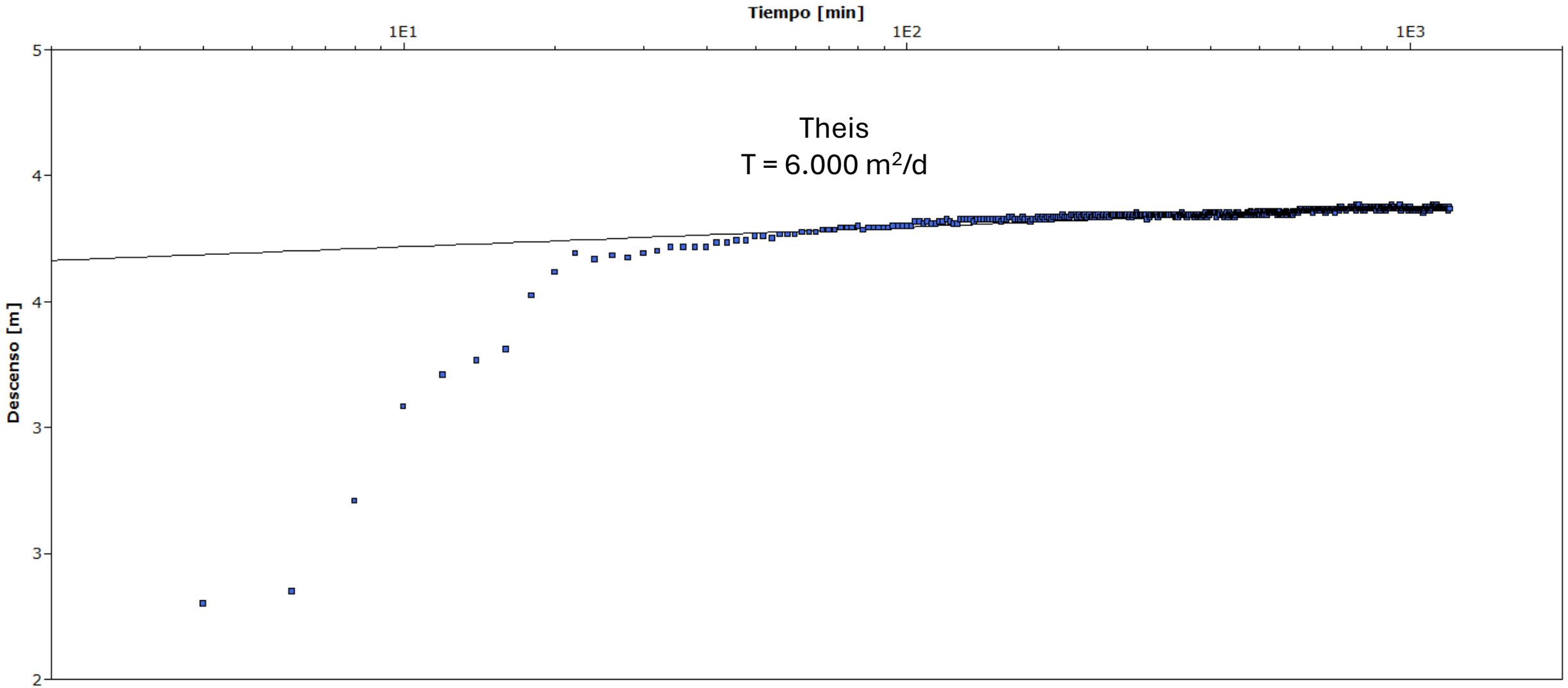
ORT-03 (PGC 55 hrs, recuperación)



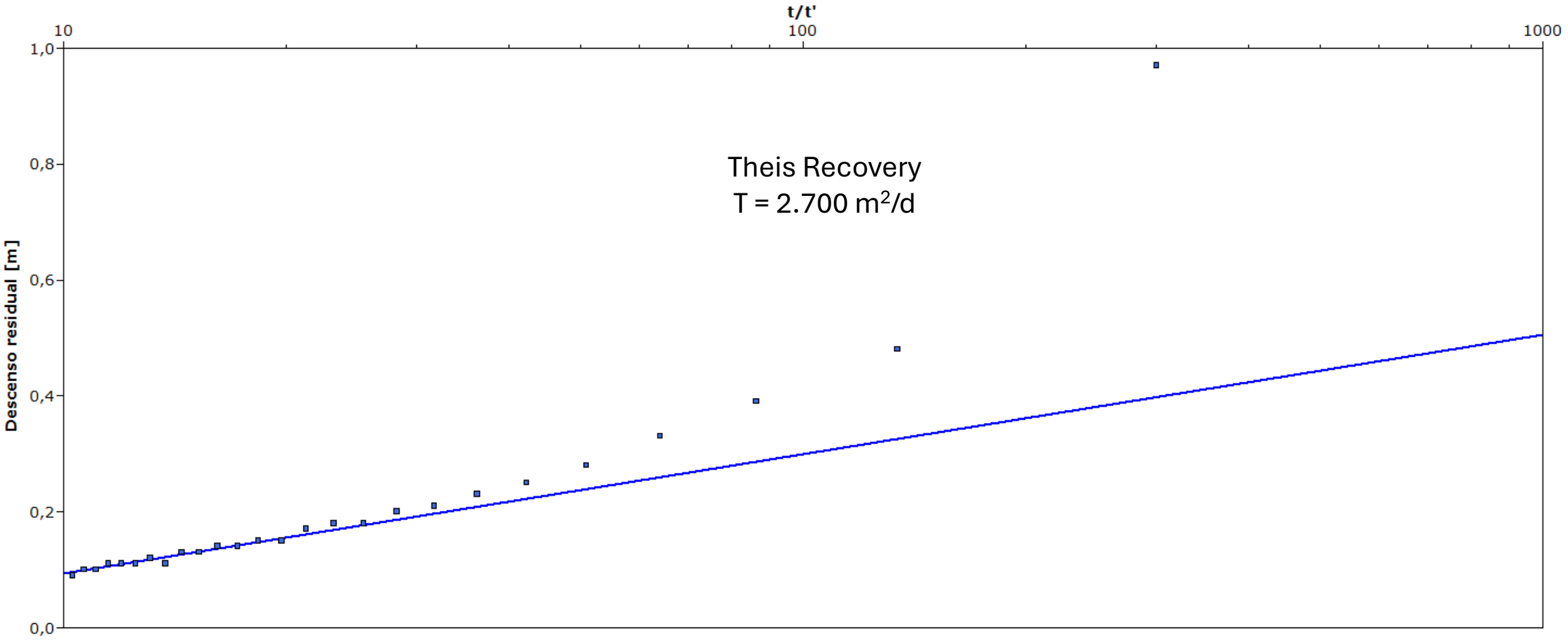
BRT-03 (PGC 20 hrs)



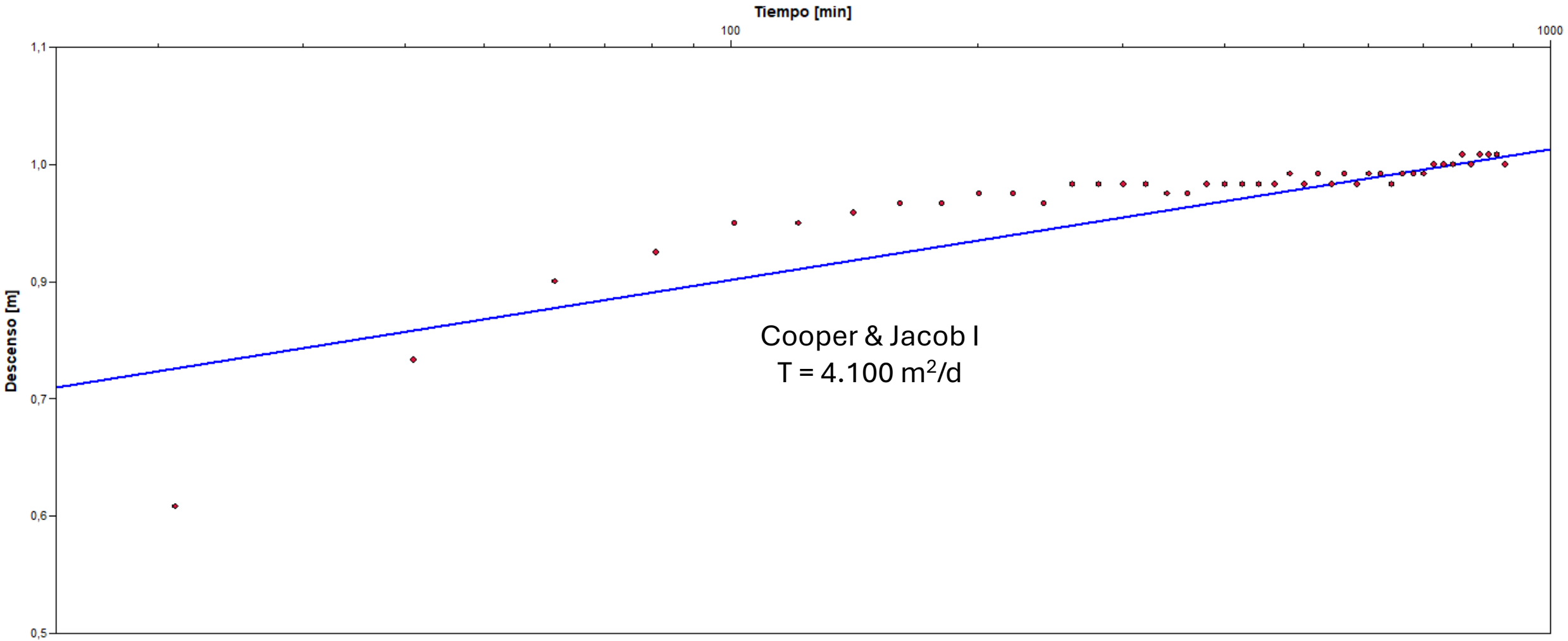
BRT-03 (PGC 20 hrs)



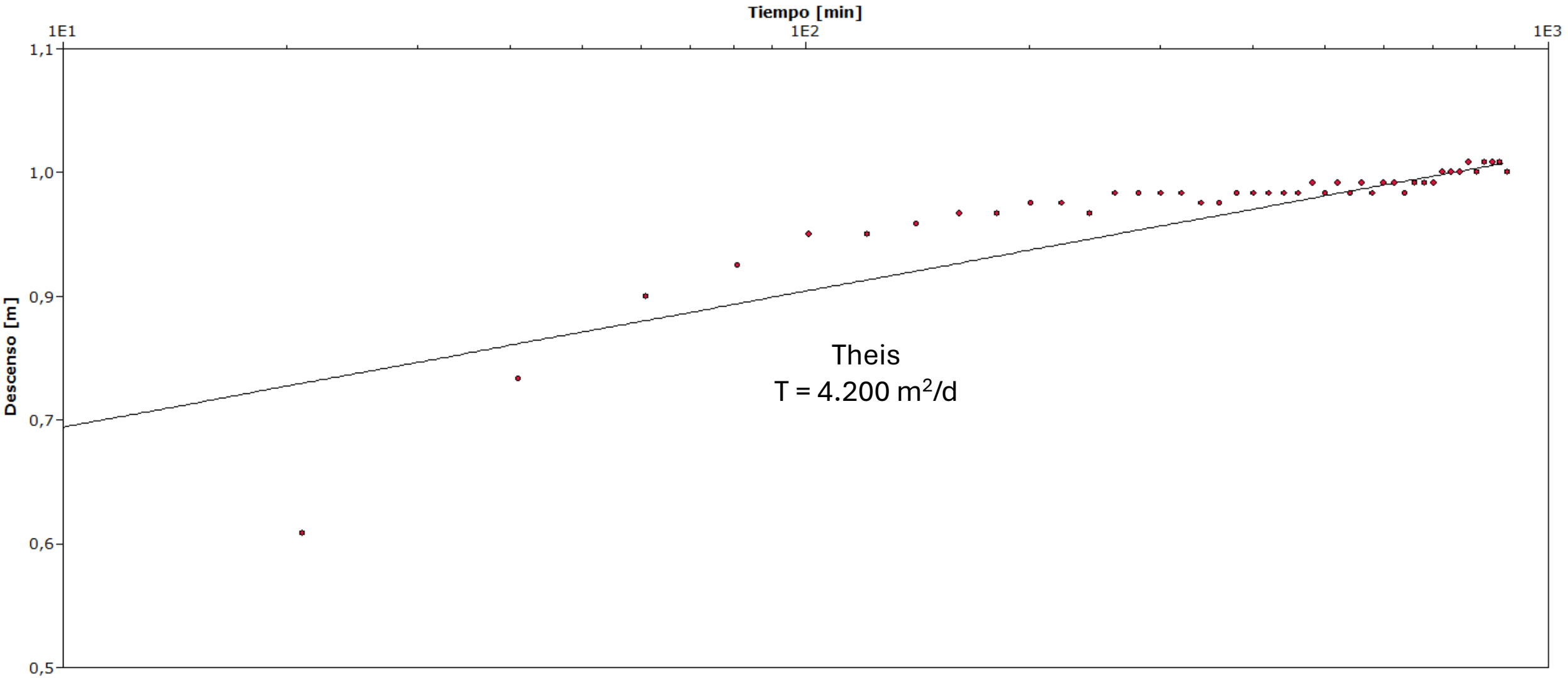
BRT-03 (PGC 20 hrs, recuperación)



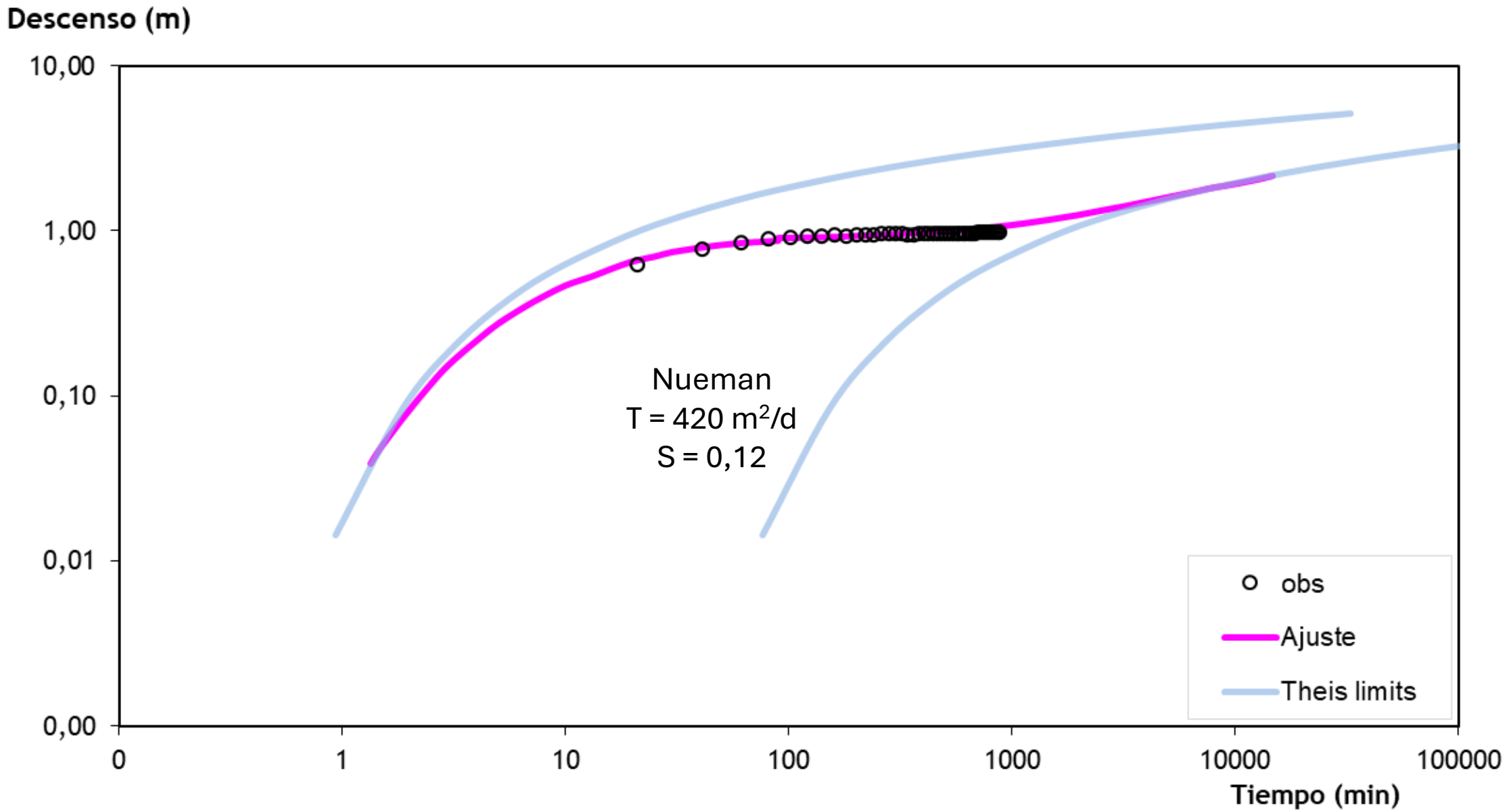
ORT-03 (PGC 20 hrs)



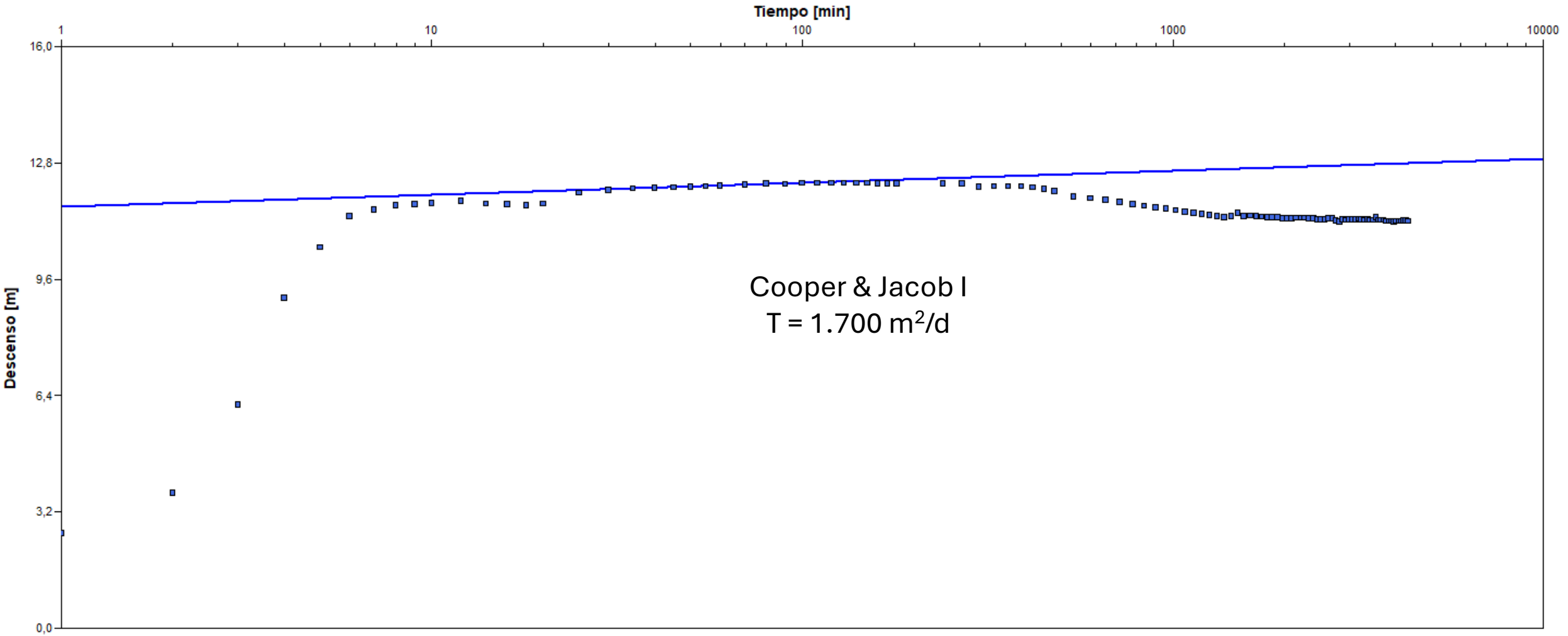
ORT-03 (PGC 20 hrs)



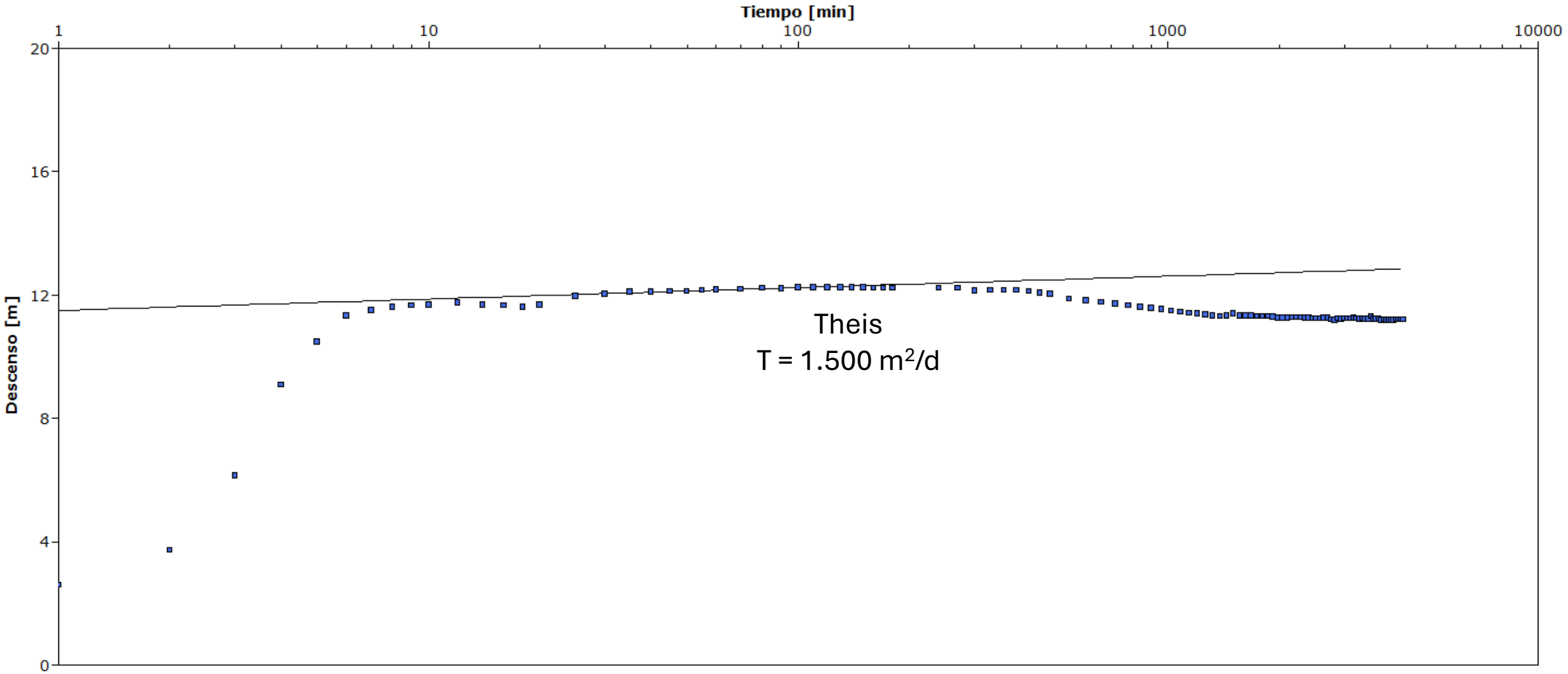
ORT-03 (PGC 20 hrs)



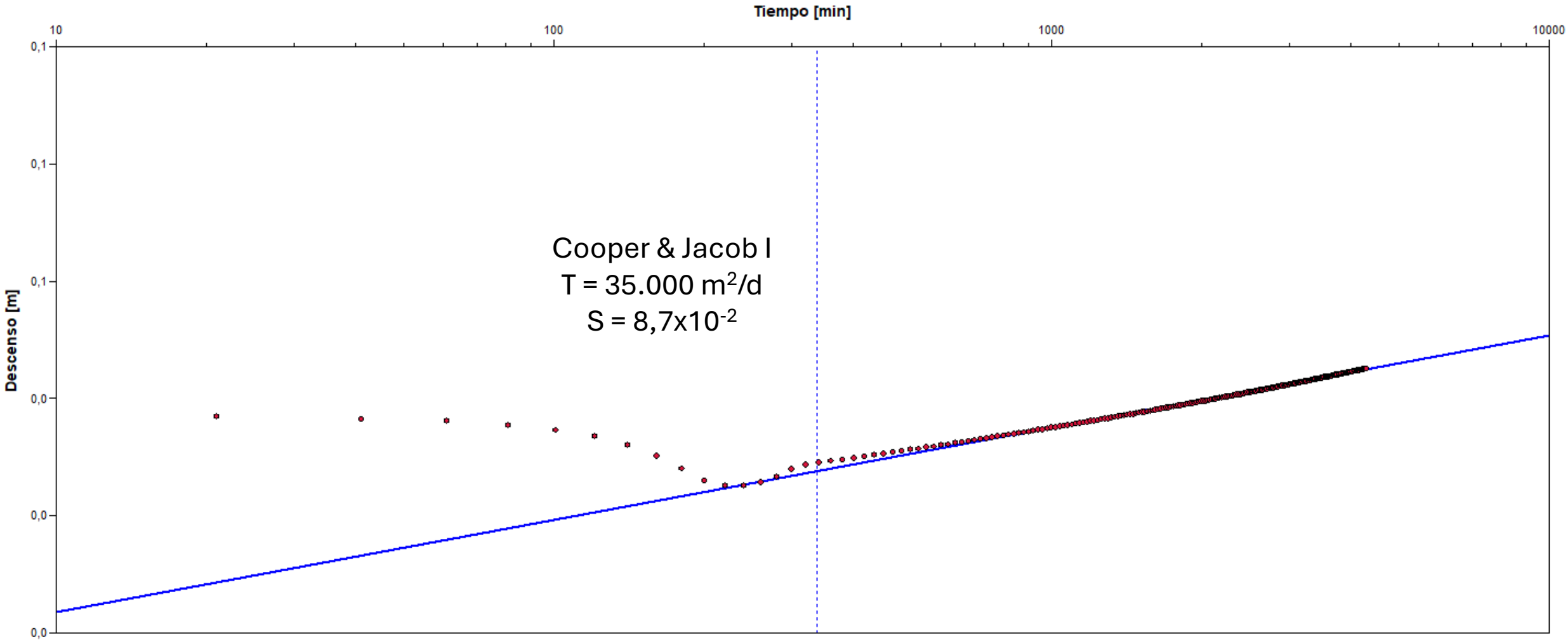
BRT-04 (PGC)


Tiempo [min]
1
10
100
1000
10000
16,0
12,8
9,6
6,4
3,2
0,0
Descenso [m]
Cooper & Jacob I
T = 1.700 m²/d

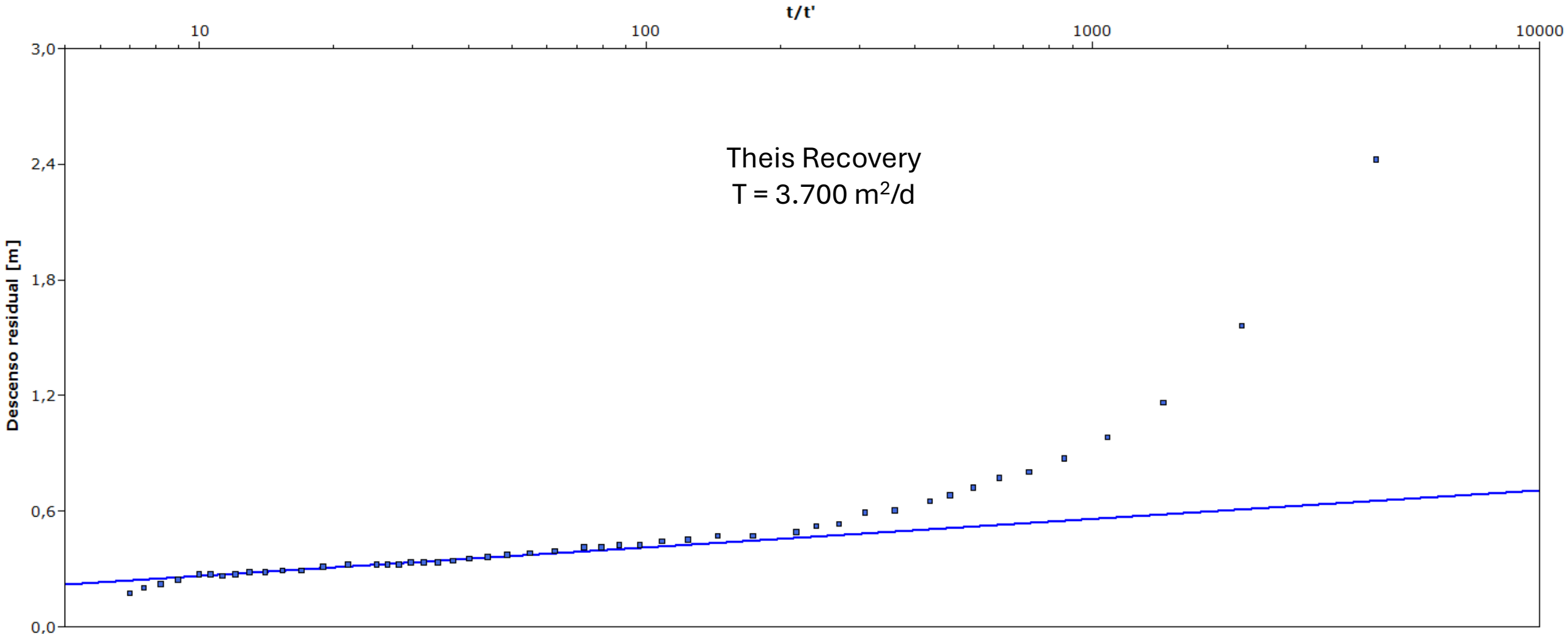
BRT-04 (PGC)


Tiempo [min]
1
10
100
1000
10000
Descenso [m]
0
4
8
12
16
20
Theis
T = 1.500 m²/d

ORT-04 (PGC)


Tiempo [min]
10
100
1000
10000
Descenso [m]
0,1
0,1
0,1
0,0
0,0
0,0
Cooper & Jacob I
T = 35.000 m²/d
S = 8,7x10⁻²

BRT-04 (Recuperación)

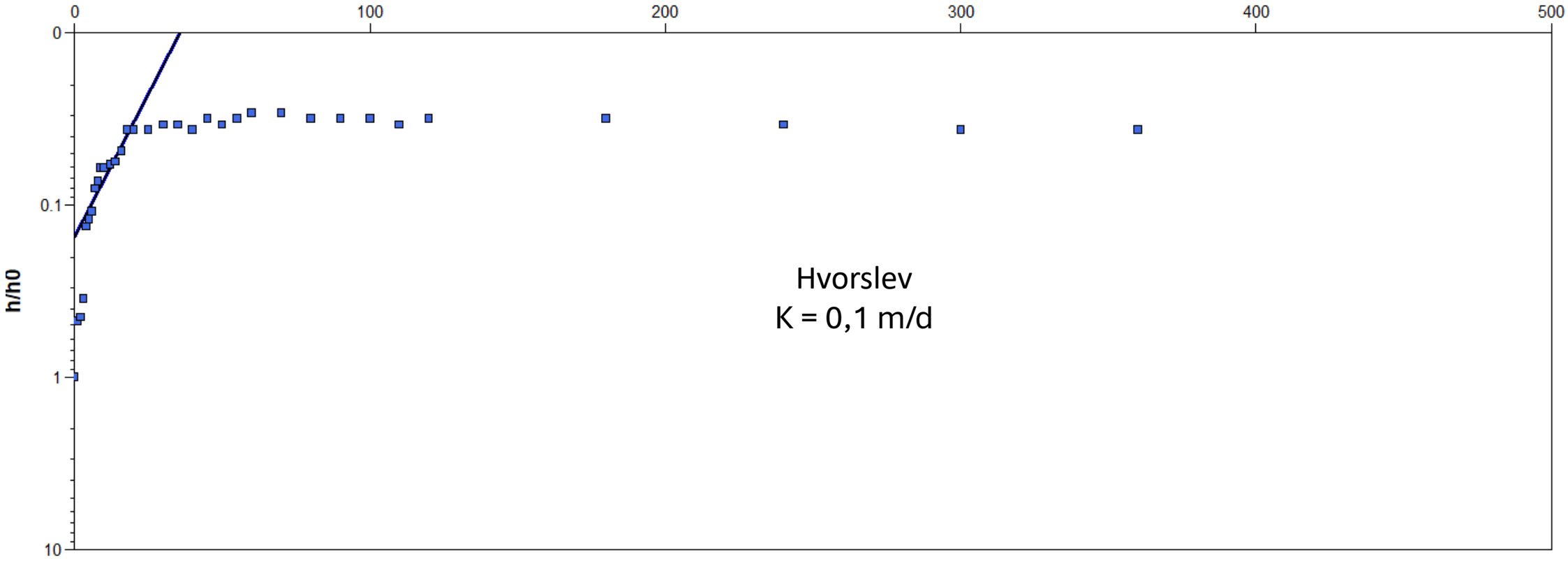


ANEXO B

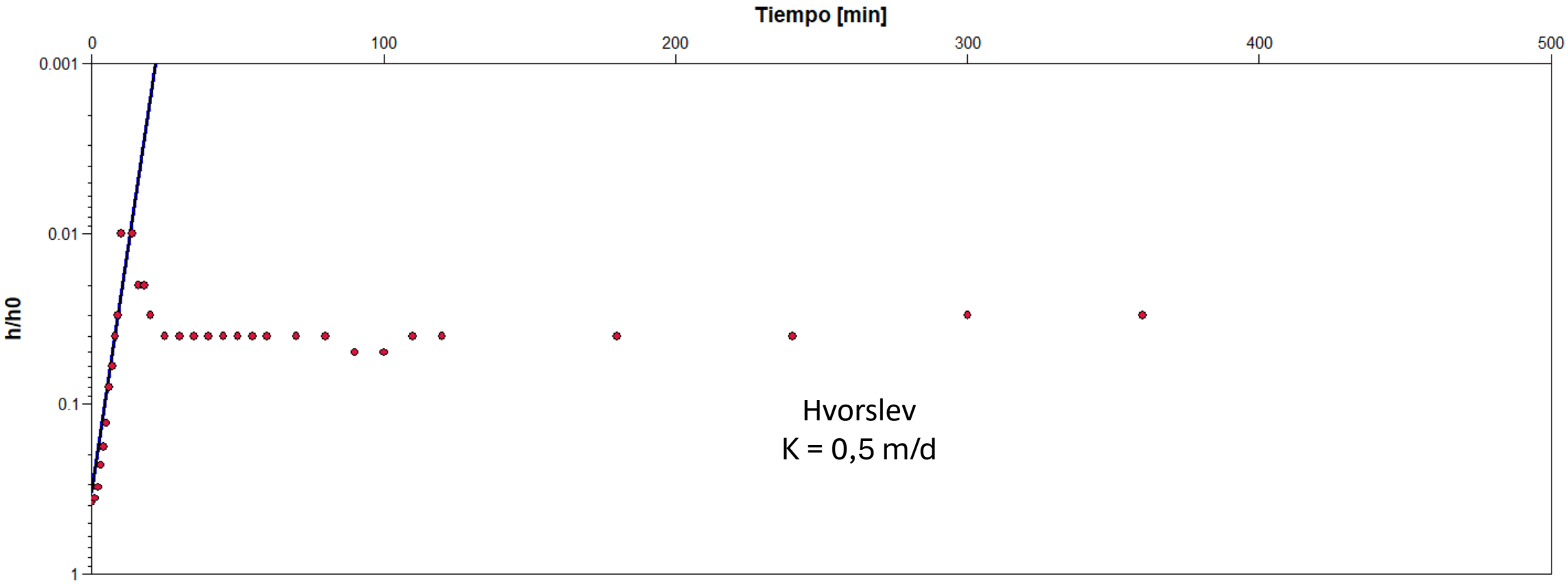
Interpretación de Pruebas de Inyección

Anexo B – Interpretación Pruebas de Inyección

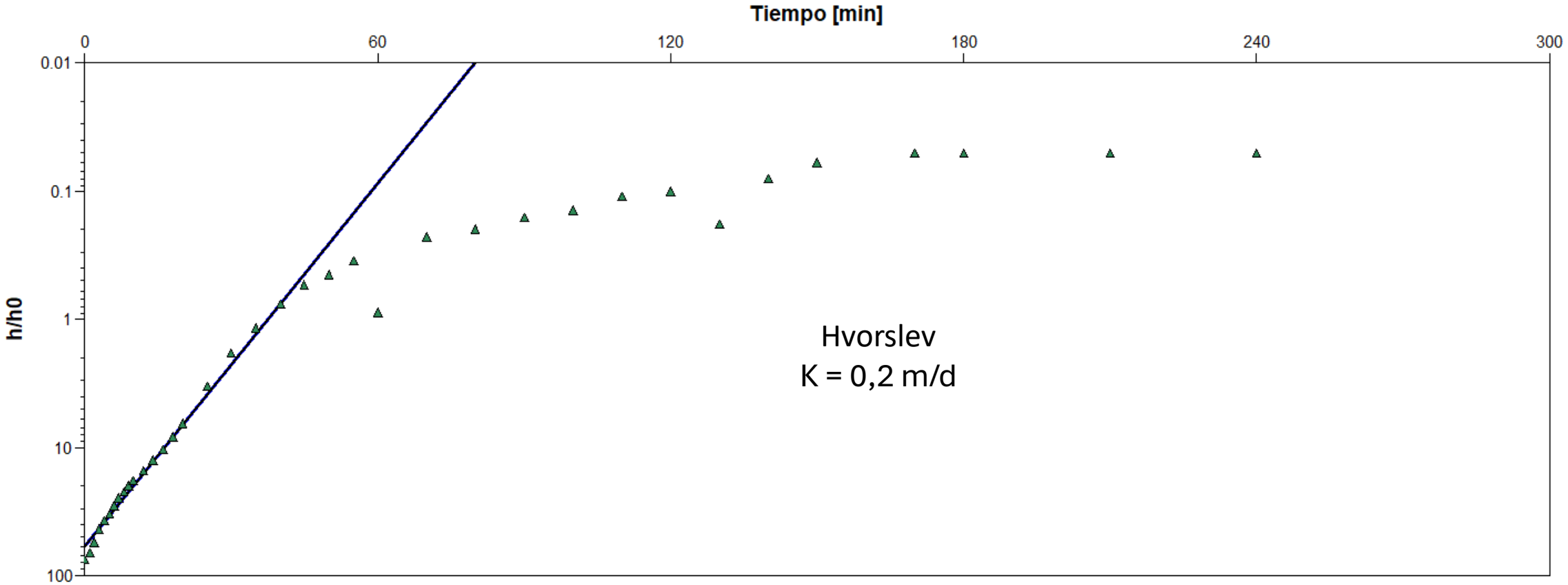
ORT-01



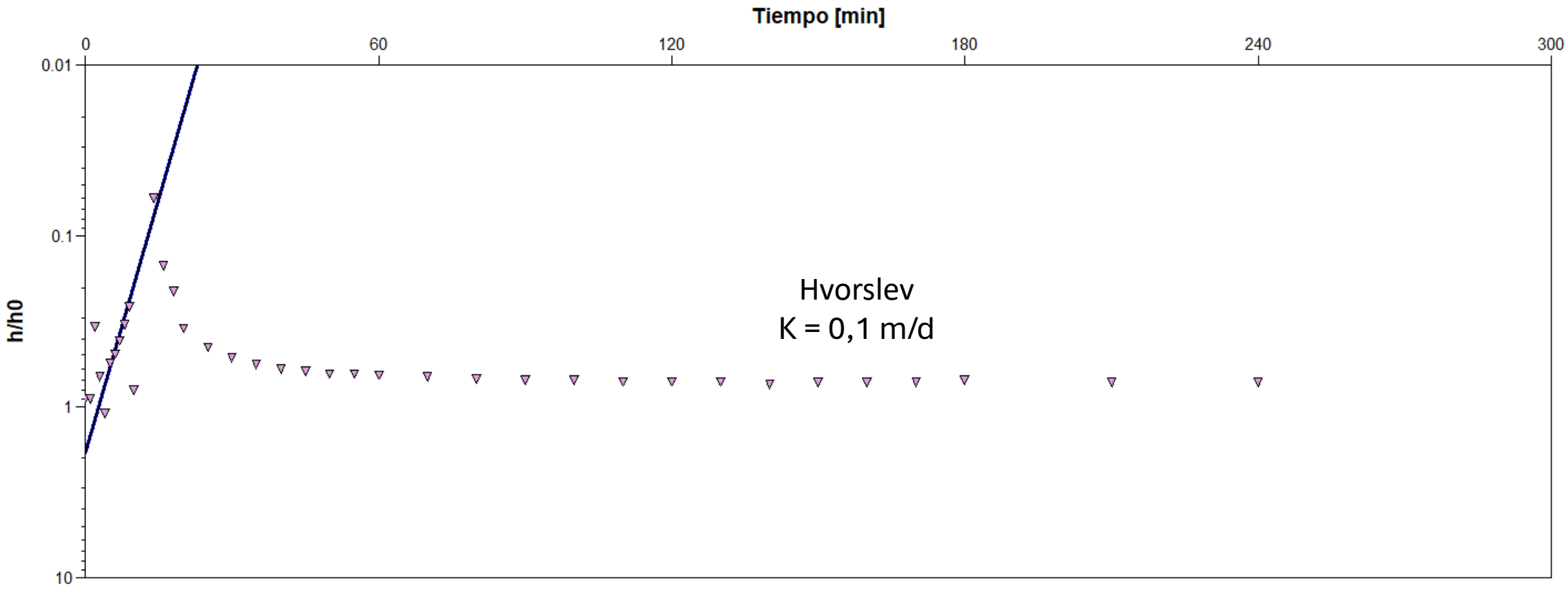
BRT-01


Tiempo [min]
0
100
200
300
400
500
0.001
0.01
0.1
1
h/h0
Hvorslev
K = 0,5 m/d

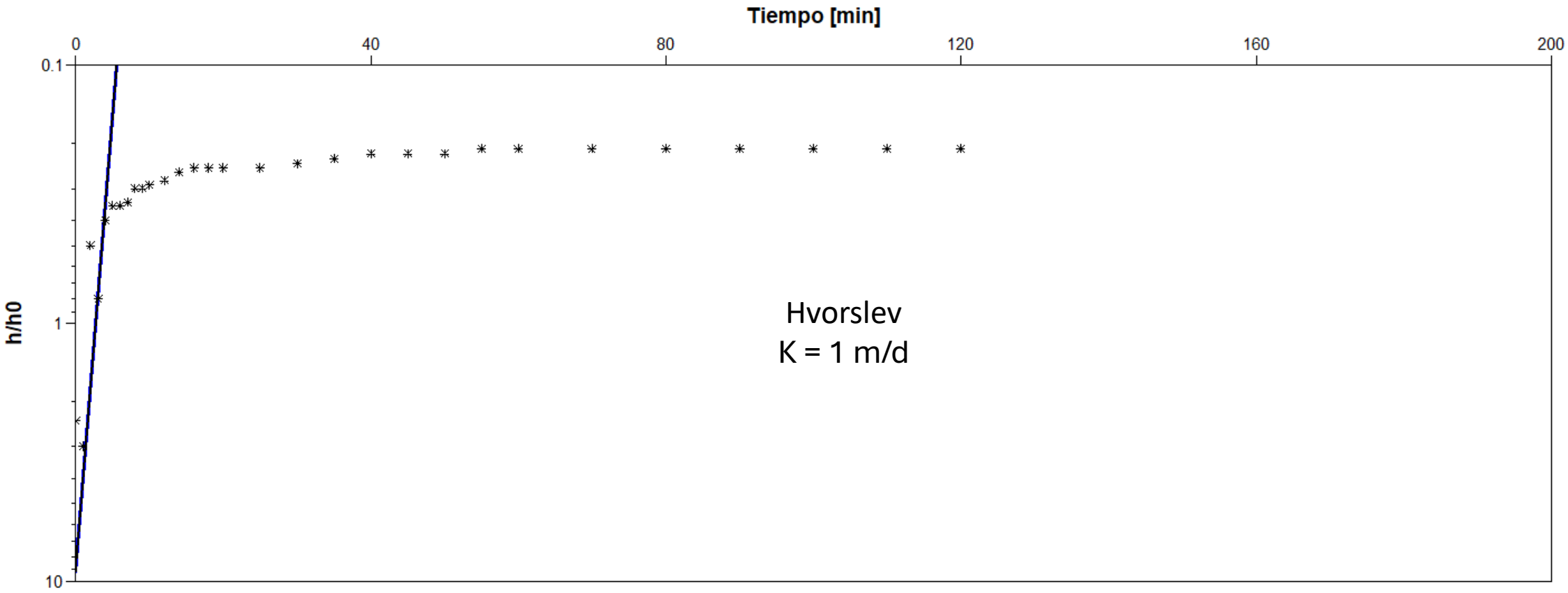
BRT-02


Tiempo [min]
0
60
120
180
240
300
0.01
0.1
1
10
100
h/h0
Hvorslev
K = 0,2 m/d

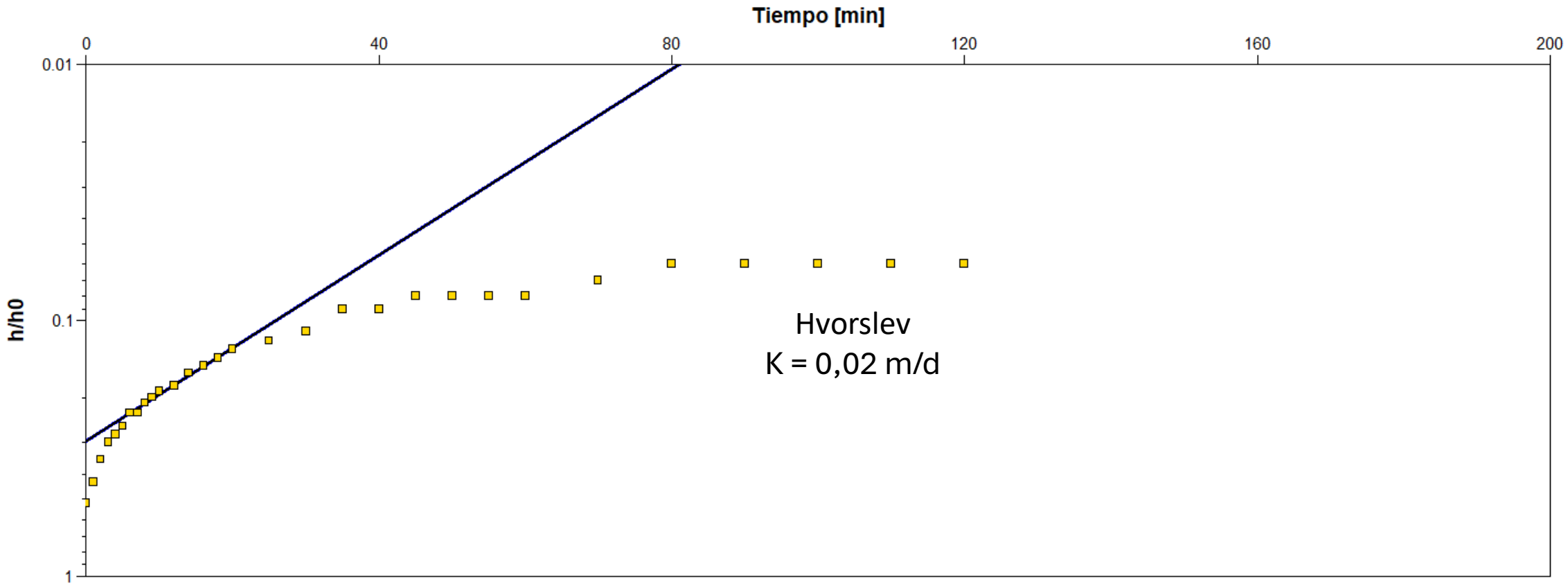
PCH-14



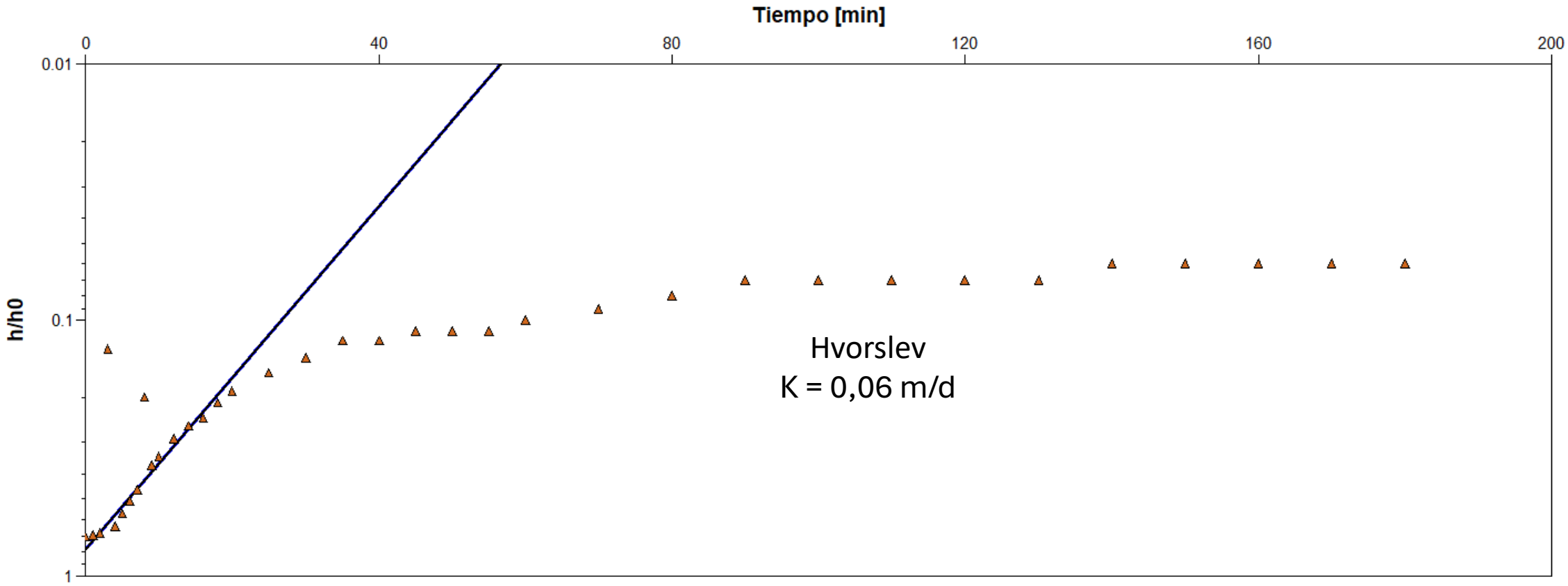
BRT-03



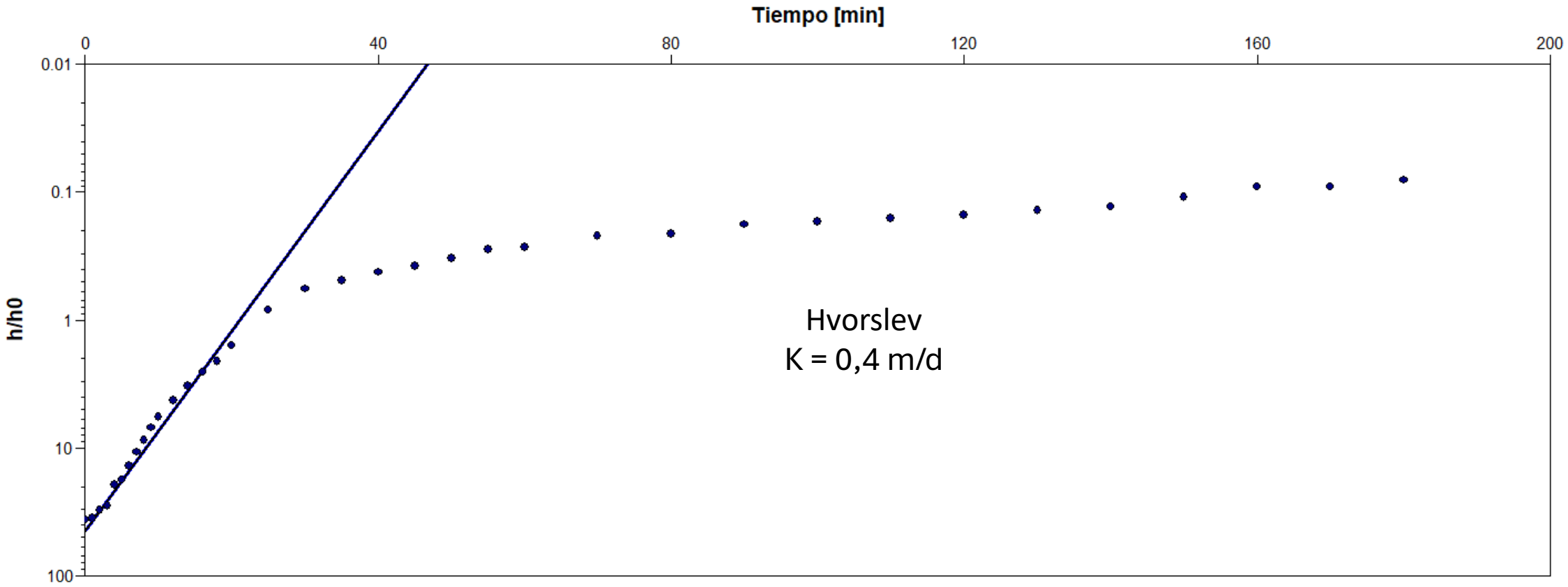
ORT-03



ORT-04



BRT-04


Tiempo [min]
0
40
80
120
160
200
h/h0
0.01
0.1
1
10
100
Hvorslev
K = 0,4 m/d