



**Universidad
de Medellín**
Ciencia y Libertad

Modelación numérica de transferencia de calor y flujo de másico aplicado a sistemas geotérmicos

DANIEL STIVEN BALZAN ALZATE

**ESTUDIANTE DE INGENIERÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN**

Agradecimientos

María Camila Moreno

Julio Pareja

Idalia Jacqueline López Sánchez

Daniela Blessent

Jerome de la Bernardie

Tanguy Le Borgne





CONTENIDO

1 - INTRODUCCIÓN

¿Qué es geotermia y por qué se habla de geotermia ?

¿Qué es la modelación?

2 - OBJETIVOS

3 - CASOS DE ESTUDIO

A - Transferencia de calor en medio poroso

B - Transferencia de calor en medio poroso fracturado

C - Transporte de soluto y transferencia de calor
en el sitio de Ploemeur (Francia)

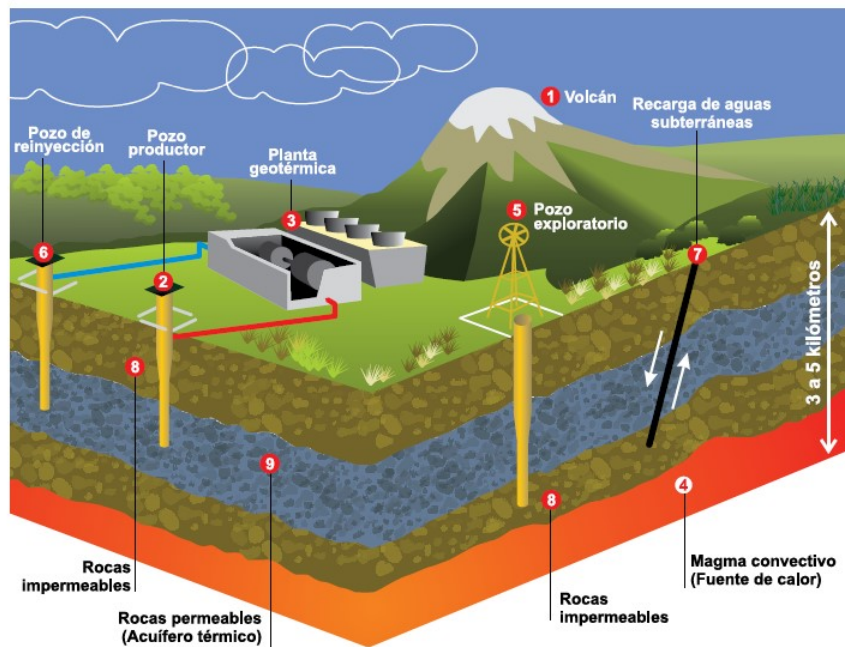
4 - CONCLUSIONES



INTRODUCCIÓN

¿Qué es geotermia y por qué se habla de geotermia ?

Energía de alta entalpia ($T \geq 150^{\circ}\text{C}$)



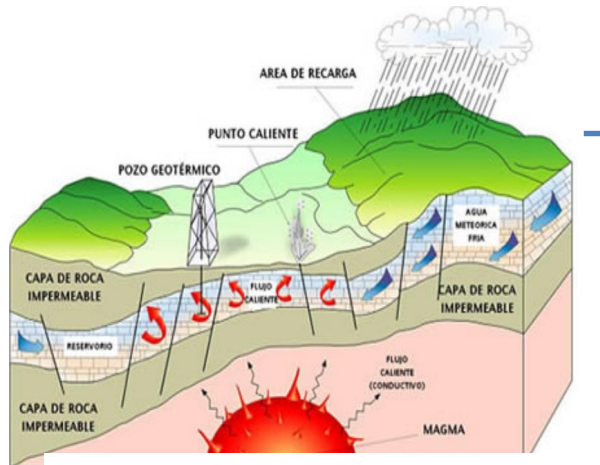
Energía de baja entalpia ($\leq 30^{\circ}\text{C}$)





INTRODUCCIÓN

¿Qué es modelación?



OpenGeoSys

**COMSOL
MULTIPHYSICS®**



Modelo conceptual

Modelos matemáticos

Simulaciones

Resultados numéricos

Toma de decisiones

Aplicación a sistemas geotérmicos



OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Realizar simulaciones numéricas de transferencia de calor en medios porosos y fracturados.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar la capacidad de OpenGeoSys como software de modelación en medios geológicos porosos y fracturados.

Evaluar la capacidad de OpenGeoSys en la modelación de ensayos de transferencia de calor y transporte de soluto realizados en el sitio de Ploemeur (Francia).

Ejecutar análisis de sensibilidad de parámetros hidráulicos que tienen influencia sobre los resultados numéricos.



CASOS DE ESTUDIO

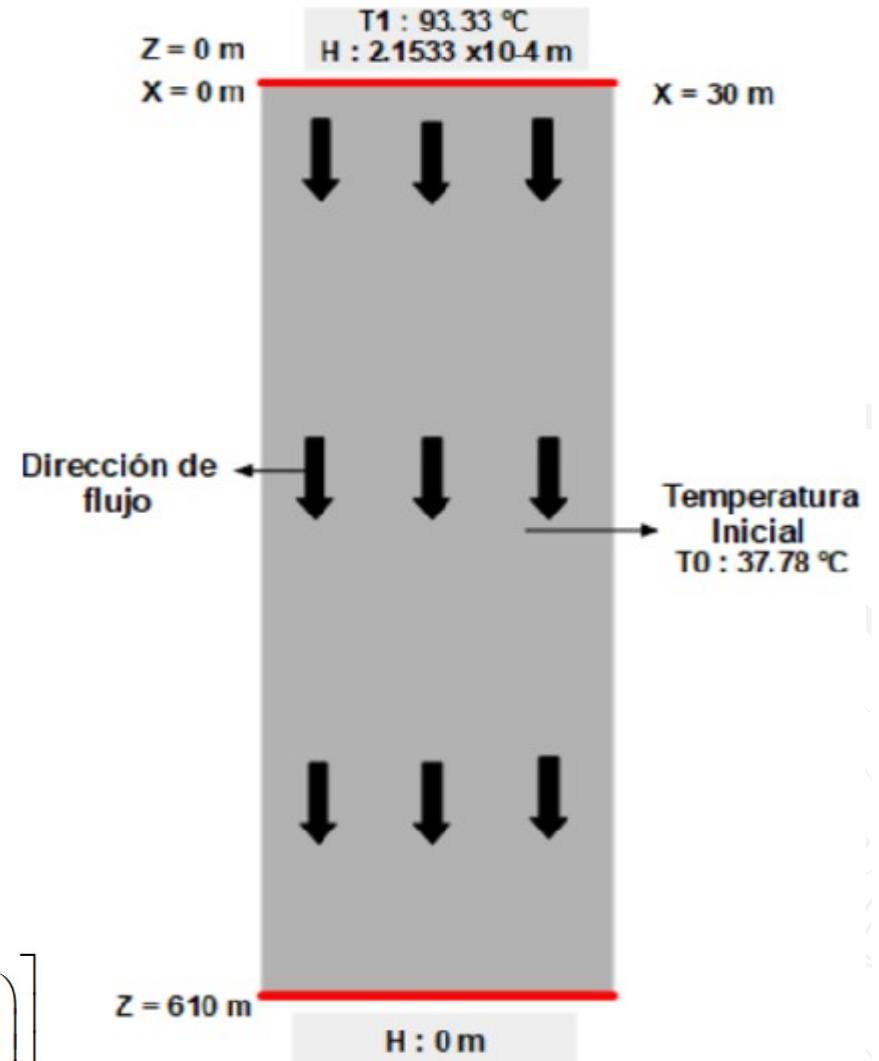
Medio poroso (Aquanty, 2013)

Tabla 1. Parámetros input para medio poroso

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica del medio (k_b)	2.16	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Capacidad calórica del solido (C_s)	1254.682	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del solido (ρ_s)	1602	kg m^{-3}
Capacidad calórica del agua (C_l)	4185	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del fluido (ρ_l)	1000	kg m^{-3}
Coefficiente de dispersión de calor (D_{th})	1.15×10^{-5}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Conductividad hidráulica del medio (K)	1	ms^{-1}
Porosidad de la matriz (ϕ)	0.1	-
Coefficiente de retardación térmica (R_{th})	5.323	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Velocidad de retardo (v_{th})	6.63×10^{-7}	m s^{-1}
Dispersión longitudinal (α_L)	14.4	m
Tiempos de visualización (t_1, t_2)	2148, 4262	días

Cálculo de la temperatura T_m :

$$\frac{T_m - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{z - v_{th}t}{2\sqrt{D_{th}t}} \right) + \exp \left(\frac{v_{th}z}{D_{th}} \right) \text{erfc} \left(\frac{z + v_{th}t}{2\sqrt{D_{th}t}} \right) \right]$$



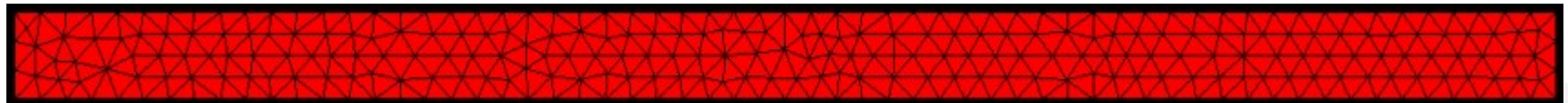


CASOS DE ESTUDIO

Medio poroso

$X = 30 \text{ m}$

Malla



$Z = 0 \text{ m}$

$X = 0 \text{ m}$

$Z = 610 \text{ m}$

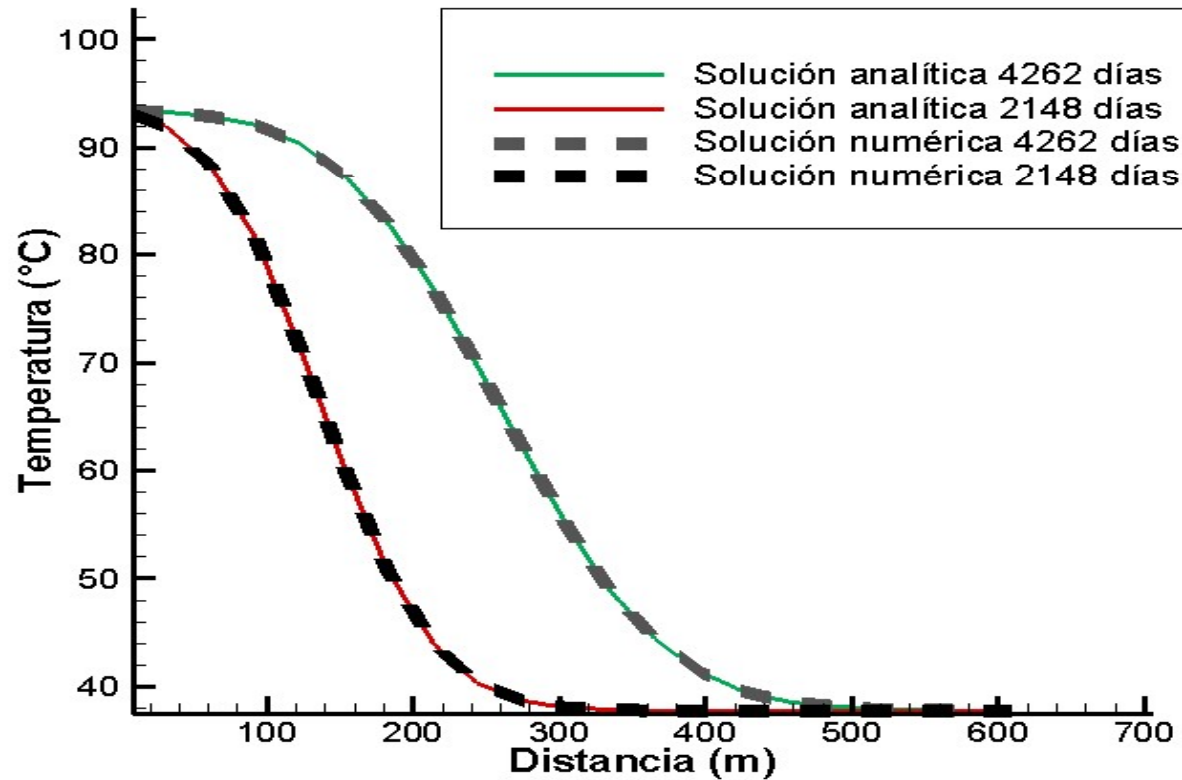
↓
Características

- 1- Malla Triangular
- 2- Nodos: 303
- 3- Gasto computacional: 4-5 s



CASOS DE ESTUDIO

Medio poroso





CASOS DE ESTUDIO

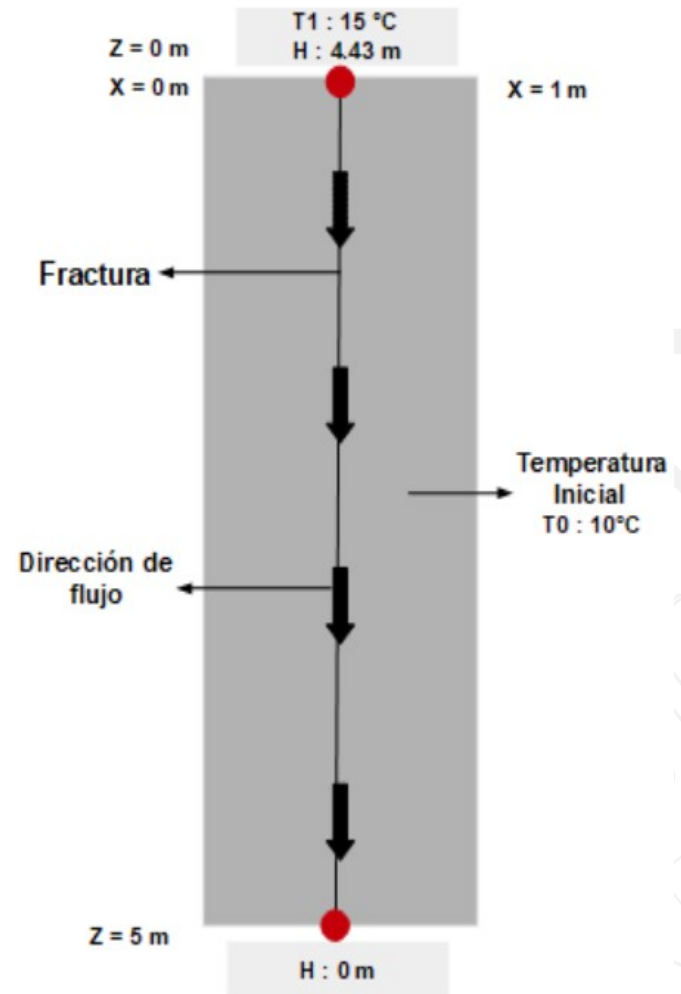
Medio poroso fracturado (Aquanty, 2013)

Tabla2. Parámetros input para medio poroso fracturado

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica del medio (k_b)	3.4	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Capacidad calórica del solido (C_s)	908	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del solido (ρ_s)	3063	kg m^{-3}
Capacidad calórica del agua (C_l)	4187.6	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del fluido (ρ_l)	997	kg m^{-3}
Velocidad en la fractura (v^{fr})	0.05	ms^{-1}
Viscosidad del agua	1.124×10^{-3}	Pa s
Conductividad hidráulica de la matriz (K)	3×10^{-50}	ms^{-1}
Porosidad de la matriz (ϕ)	0.2	-
Puntos de análisis (Z_1, Z_2)	0.1, 0.61	m
Tiempos de visualización (t_1, t_2)	5000, 1000	s

Cálculo de la temperatura T^{fr} :

$$\frac{T^{fr} - T_0}{T_1 - T_0} = \text{erfc} \left(\frac{z \sqrt{k_b \rho_b c_b}}{2 v^{fr} \rho_l c_l b \sqrt{t - z/v^{fr}}} \right)$$





CASOS DE ESTUDIO

Medio poroso fracturado

Comparación de parámetros que afectan el comportamiento hidráulico de la fractura

Tabla 3. Parámetros input a softwares

	HGS	OGS
Apertura de la fractura (2b)	0.3 mm	0.3 mm
Conductividad hidráulica (Kf)	-	0.0564 m/s

Transmisividad
(Ley cubica)

$$T = \frac{(2b)^2 \gamma}{12\mu} (2b)$$

Conductividad
hidráulica

$$k_f = \frac{(2b)^2 \gamma}{12\mu}$$

Ley de Darcy

$$v = k_f \frac{\nabla h}{\nabla l}$$

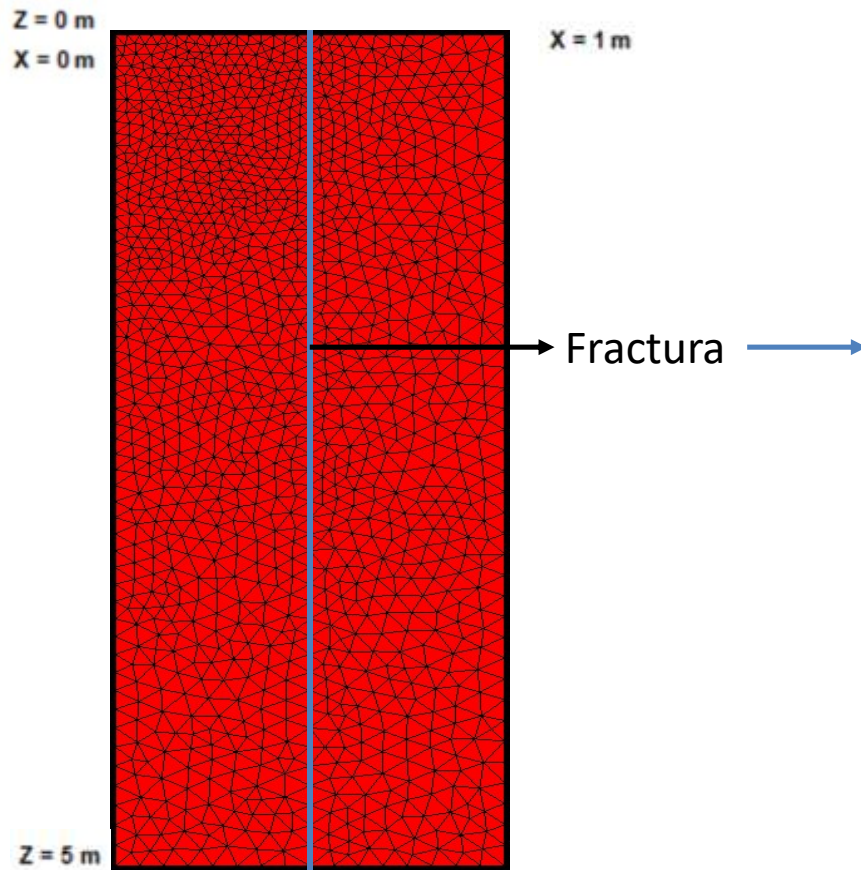
Tabla 4. Velocidad en la fractura calculada por los softwares

	HGS	OGS
Velocidad de Darcy	0.05 m/s	0.05 m/s



CASOS DE ESTUDIO

Medio poroso fracturado



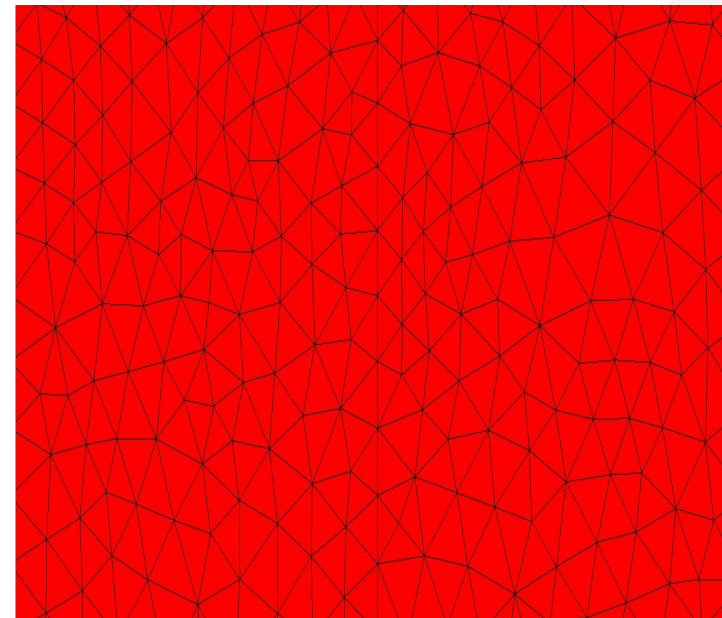
Características:

1-Malla triangular

2-Nodos: 1310

3-Gasto computacional: 6-9 s

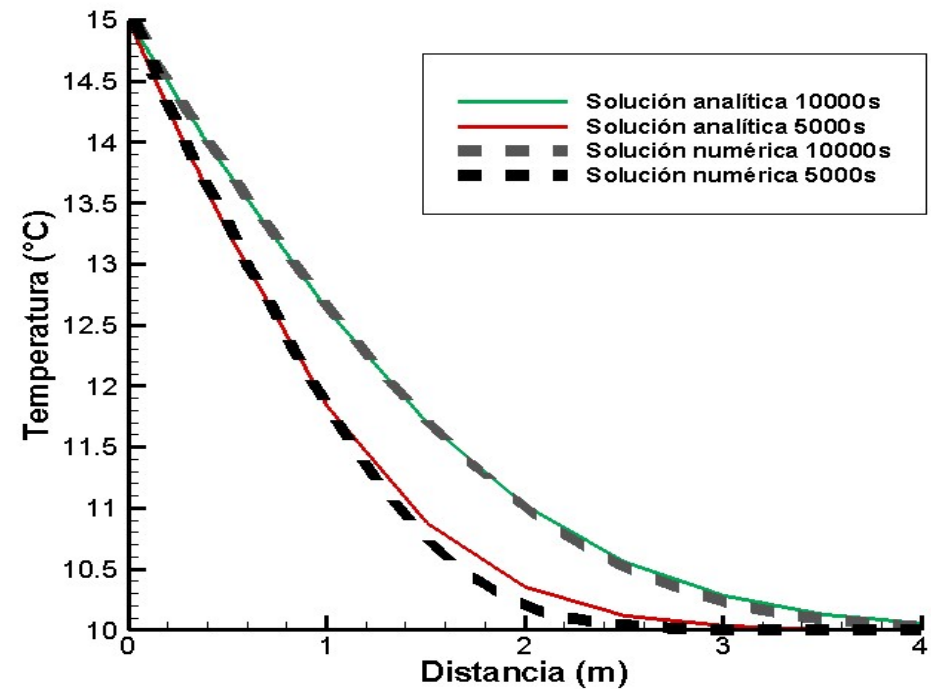
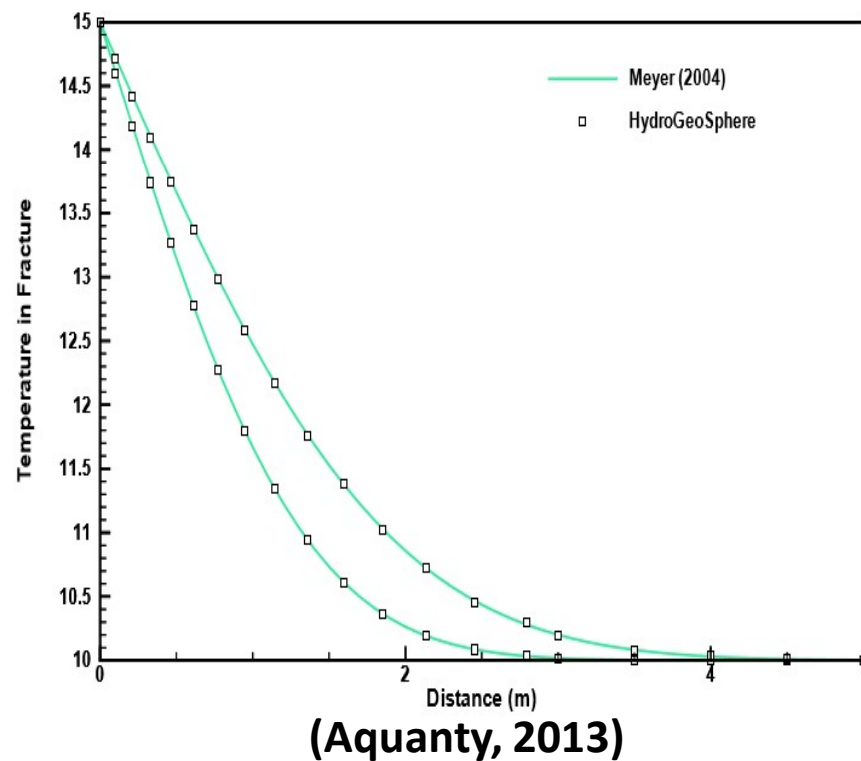
Zoom a la malla





CASOS DE ESTUDIO

Medio poroso fracturado



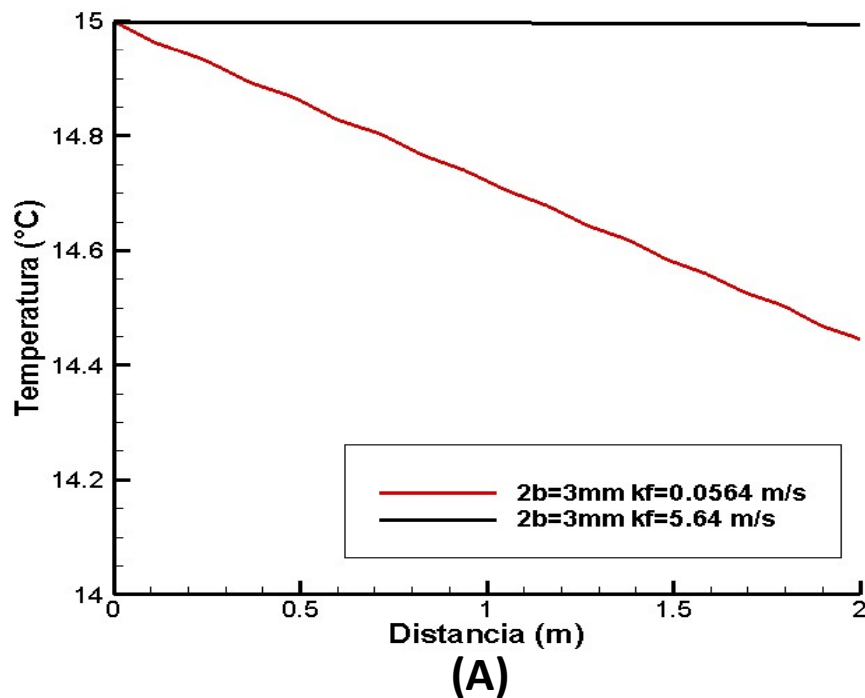


CASOS DE ESTUDIO

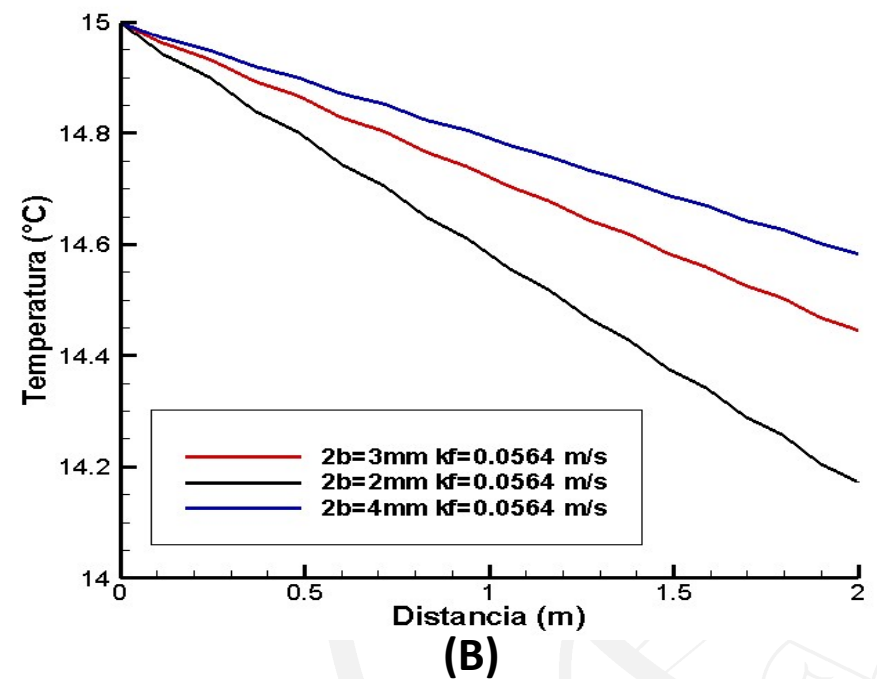
Medio poroso fracturado

Análisis de sensibilidad de los parámetros

Conductividad hidráulica de la fractura:



Apertura de la fractura :

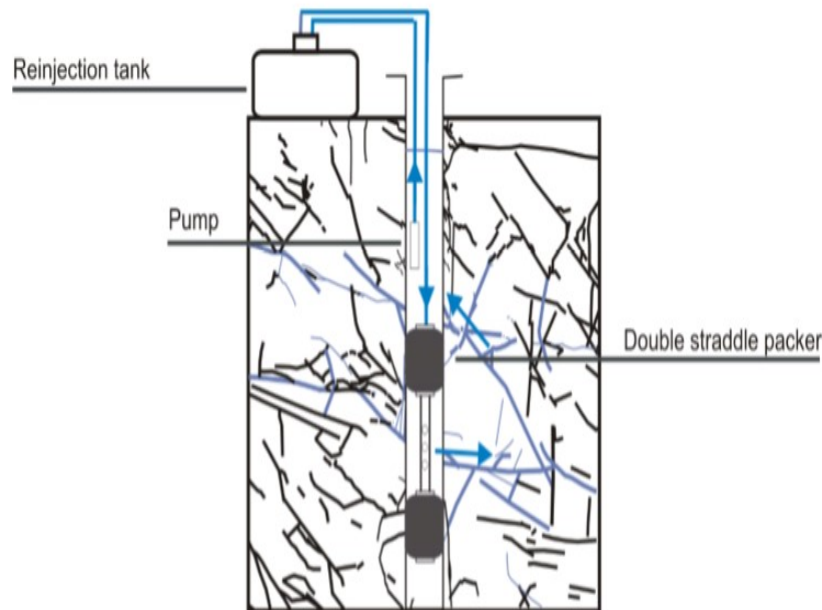




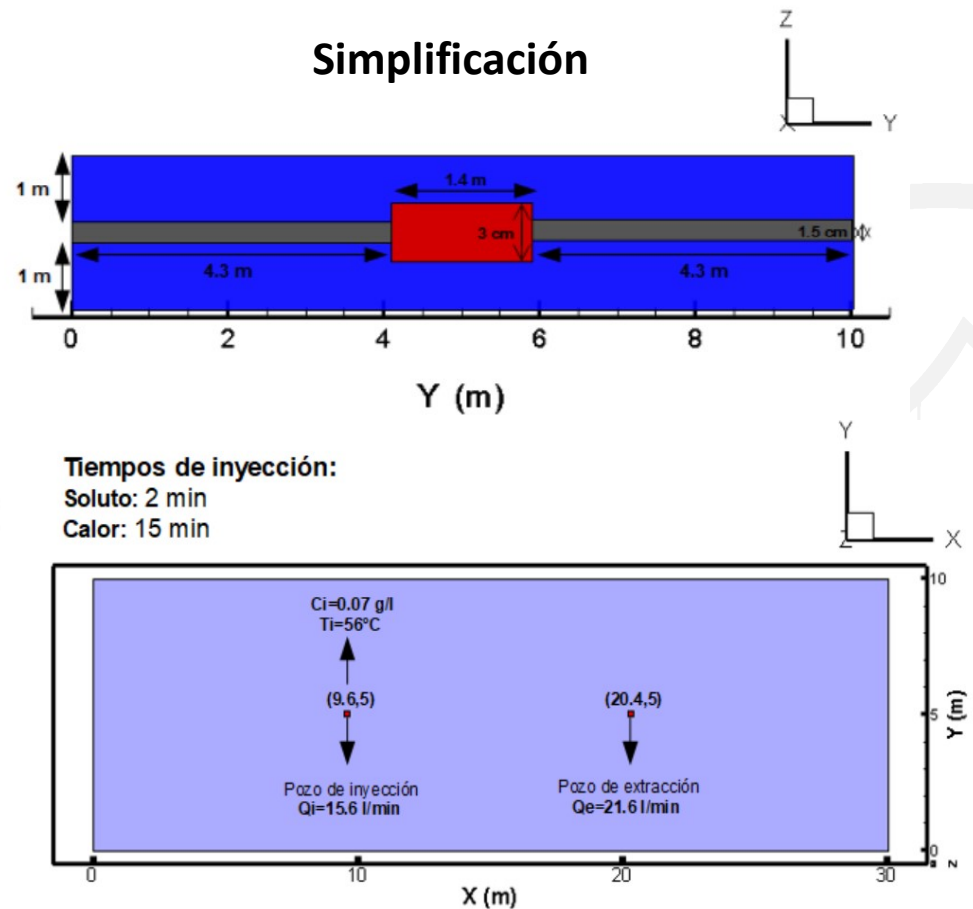
CASOS DE ESTUDIO

Caso Ploemeur-Francia (de La Bernardie, 2017)

Real

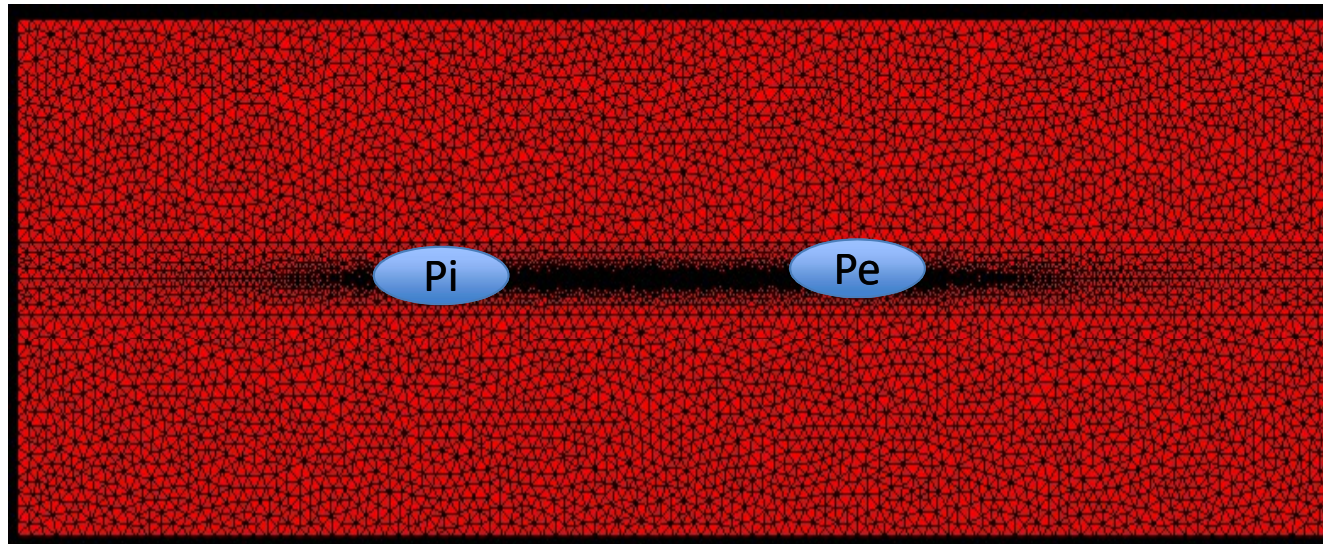


Simplificación



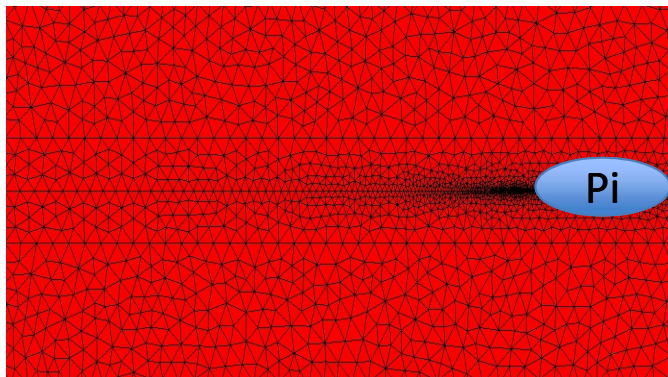


CASOS DE ESTUDIO Caso Ploemeur-Francia (de La Bernardie, 2017)

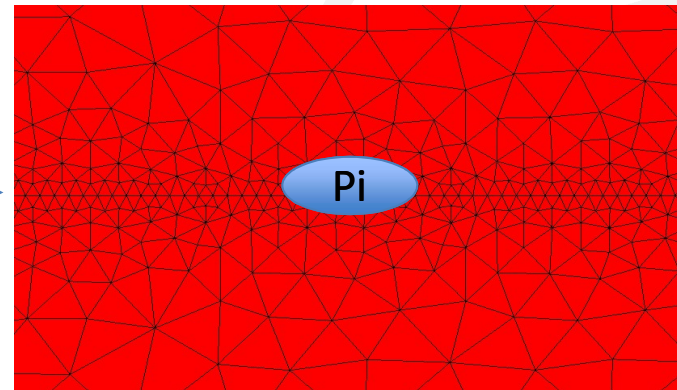


Características:

- Malla triangular y prismática
- Nodos: 62188
- Gasto computacional:
Soluta: 6 min
Calor: 14 min



Zoom en Pi





CASOS DE ESTUDIO

Caso Ploemeur-Francia: transporte de soluto

Tabla 5. Parámetros input del medio poroso

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad de la matriz	2650	kg m ⁻³
Densidad del agua	1000	kg m ⁻³
Conductividad hidráulica de la matriz anisotrópica	3×10^{-13} , 3×10^{-13} , 3×10^{-14}	ms ⁻¹
Porosidad de la matriz	0.01	-
Dispersión longitudinal del soluto	0.5	m
Dispersión transversal del soluto	0.05	m
Coefficiente de difusión	9.29×10^{-12}	m ² s ⁻¹
Tortuosidad	0.25	-

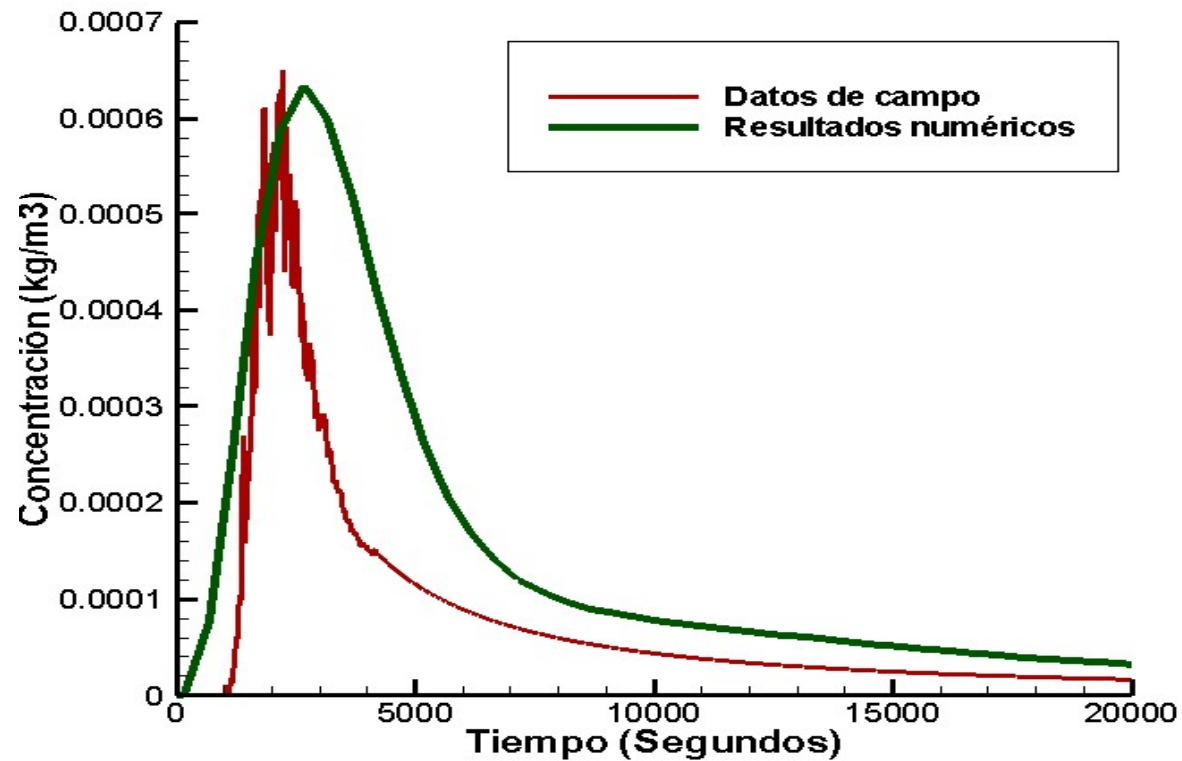
Tabla 6. Parámetros input de la fractura

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad de la fractura	2650	kg m ⁻³
Densidad del agua	1000	kg m ⁻³
Porosidad de la matriz	1	-
Dispersión longitudinal del soluto	0.5	m
Dispersión transversal del soluto	0.05	m
Coefficiente de difusión	9.29×10^{-12}	m ² s ⁻¹
Tortuosidad	0.25	-



CASOS DE ESTUDIO

Caso Ploemeur-Francia transporte de soluto





CASOS DE ESTUDIO

Caso Ploemeur-Francia: transferencia de calor

Tabla 7. Parámetros input del medio poroso

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica de la matriz	2	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Capacidad calórica del solido	951	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del solido	2650	kg m^{-3}
Capacidad calórica del agua	4200	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Densidad del agua	1000	kg m^{-3}
Conductividad hidráulica de la matriz anisotrópica	3×10^{-13} , 3×10^{-13} , 3×10^{-14}	ms^{-1}
Porosidad de la matriz	0.025	-
Dispersión longitudinal del calor	0.5	m
Dispersión transversal del calor	0.05	m
Tortuosidad	0.25	-

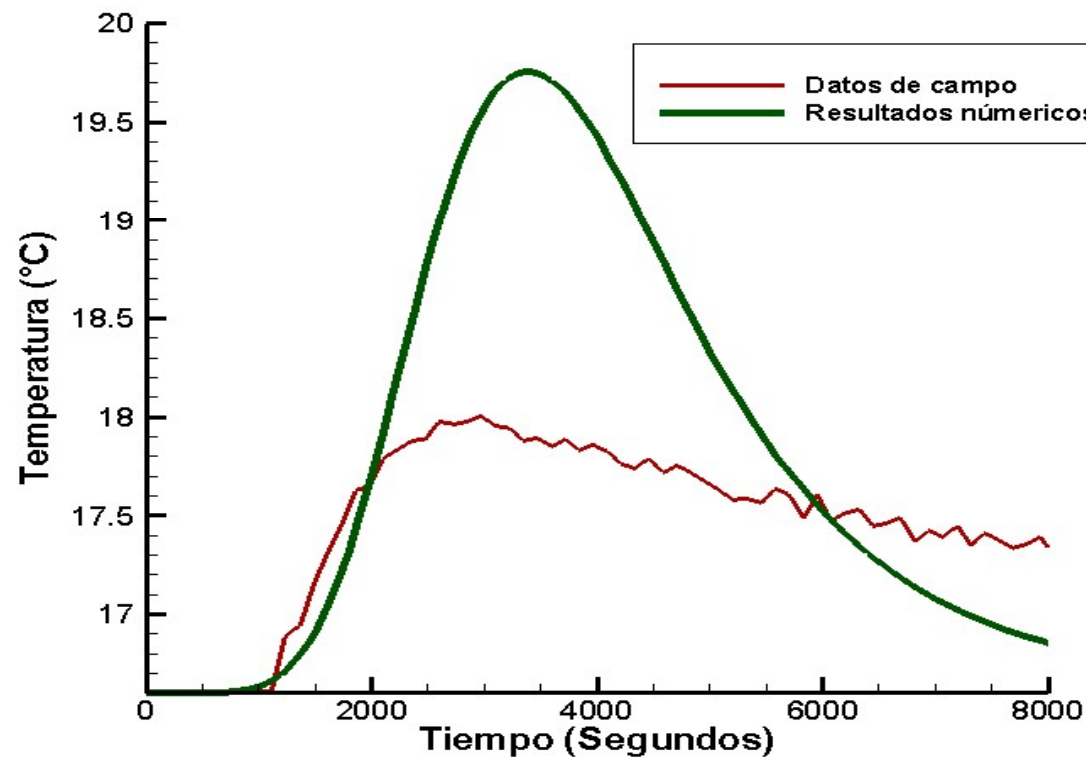
Tabla 8. Parámetros input de la fractura

Parámetro	Valor	Unidades
Conductividad térmica de la fractura	3	$\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$
Capacidad calórica de la fractura	3	$\text{Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$
Densidad de la fractura	2650	kg m^{-3}
Capacidad calórica del agua	4200	$\text{Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$
Densidad del fluido	1000	kg m^{-3}
Porosidad de la fractura	1	-
Dispersión longitudinal de la fractura	0.5	m
Dispersión transversal de la fractura	0.05	m
Tortuosidad	0.25	-



CASOS DE ESTUDIO

Caso Ploemeur-Francia: transferencia de calor





CONCLUSIONES

Se pudo evaluar la capacidad de OpenGeoSys como software de modelación en medios geológicos porosos y fracturados, obteniendo así ajustes adecuados con los resultados analíticos.

Se pudo evaluar la capacidad de OpenGeoSys en la modelación de ensayos de transferencia de calor y transporte de soluto realizados en el sitio de Ploemeur (Francia).

Se pudo concluir que la conductividad hidráulica que es ingresada al software OGS es calculada a partir de la ley cubica.

Se compararan los resultados obtenidos con OGS con los resultados obtenidos mediante los Softwares HydroGeoSphere y Feflow de los casos estudiados en el presente trabajo.



Gracias



**Universidad
de Medellín**
Ciencia y Libertad



VIGILADA MINEDUCACIÓN