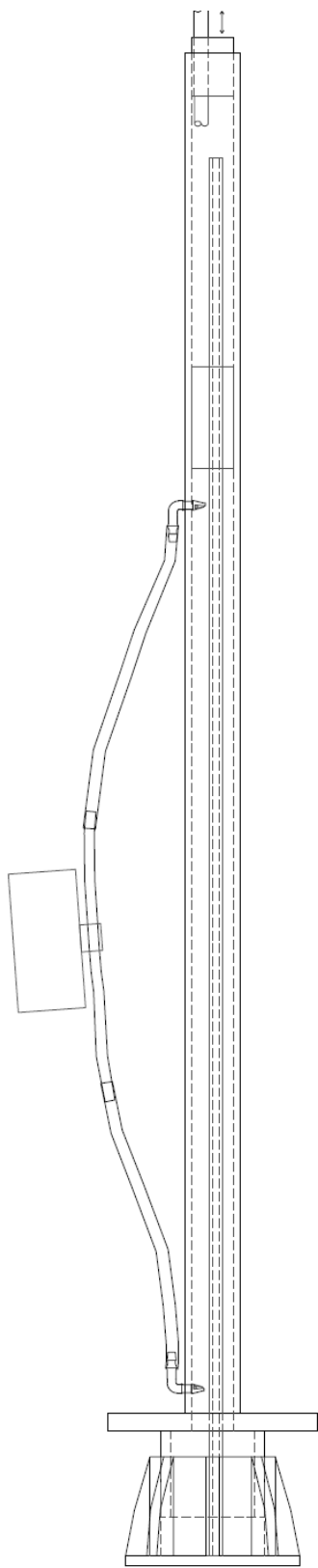
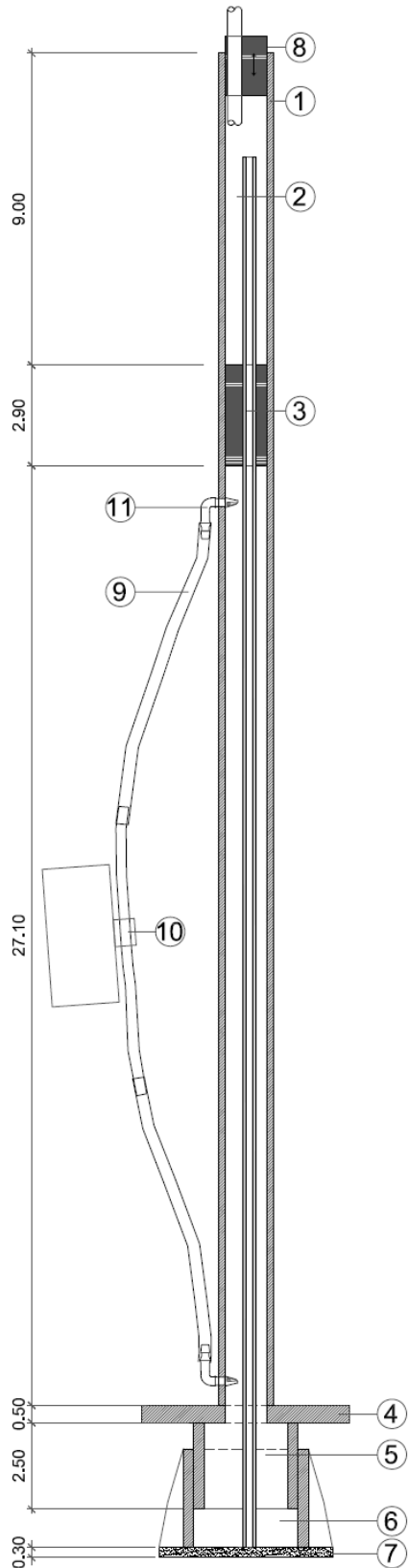


# **ANEXOS**




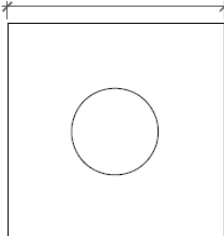

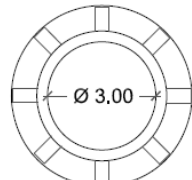
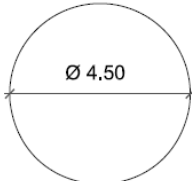

# ANEXO 1



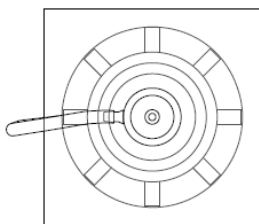
ALZADO



SECCIÓN

- 1-tubo de metacrilato 
- 2-tubo de vidrio 
- 3-tapón 
- 4-placa de metacrilato 
- 5-tubo de metacrilato 
- 6- adaptador 
- 7- filtro 
- 8- tapón de cierre móvil con tubo de vidrio inserto 

- 9- tubo de polietileno
- 10- chip conectado con ordenador
- 11- codo de unión



PLANTA

Elaboración propia

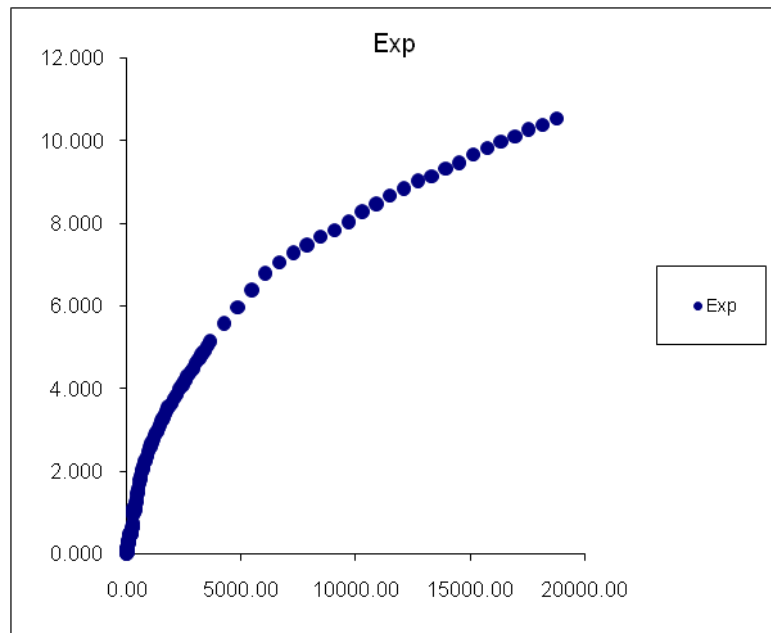
## INFILTRÓMETRO



## ANEXO 2

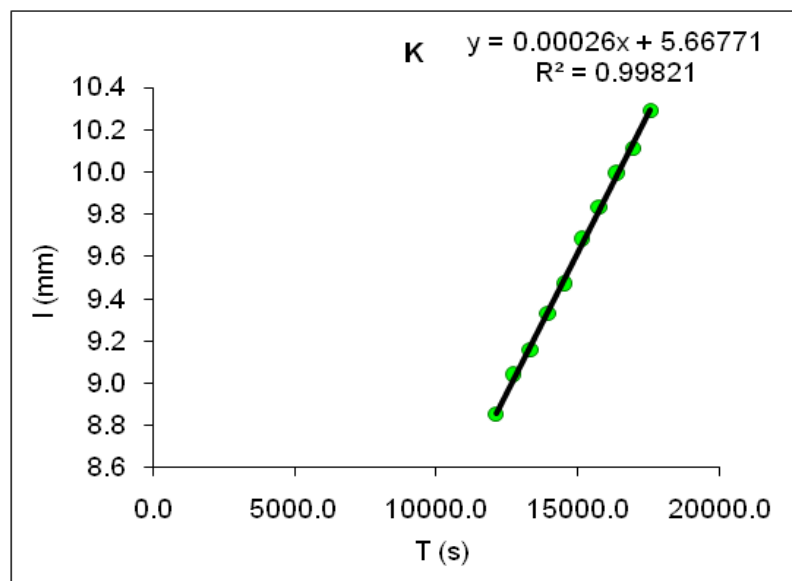
Gráficas y listado de cálculos utilizados para el cálculo de valores de coeficiente de absorción y permeabilidad.

Para el cálculo del coeficiente de absorción y permeabilidad nos basaremos en los datos de infiltración acumulada como los de la gráfica 1.



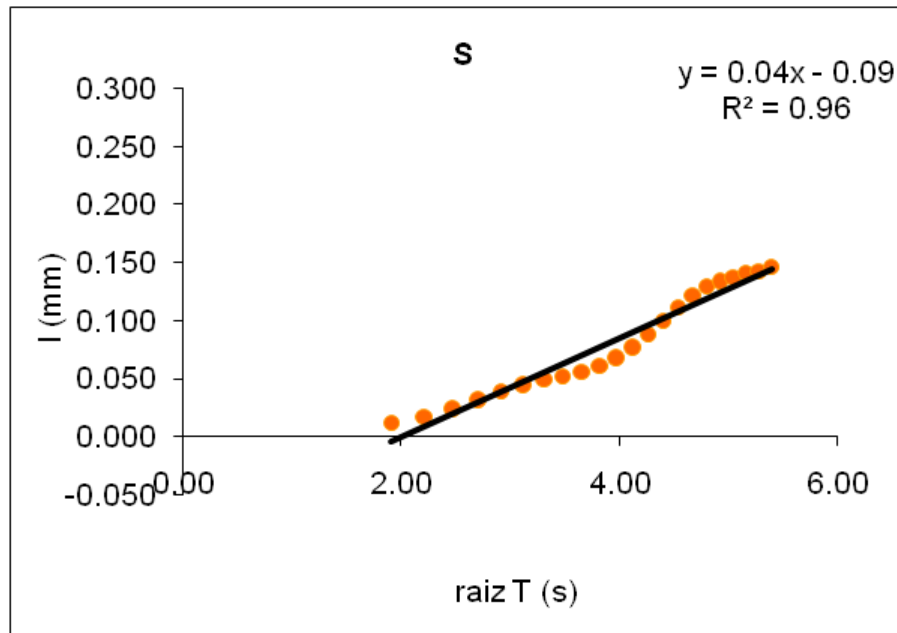
Gráfica 1: Valores experimentales obtenidos para probeta de ejemplo.

A partir de estos valores calculamos el coeficiente de permeabilidad con los últimos valores de infiltración ver gráfica 2. La parte final de la recta con pendiente constante en la que la probeta está saturada, siendo aplicable la ley de Darcy y gotea.

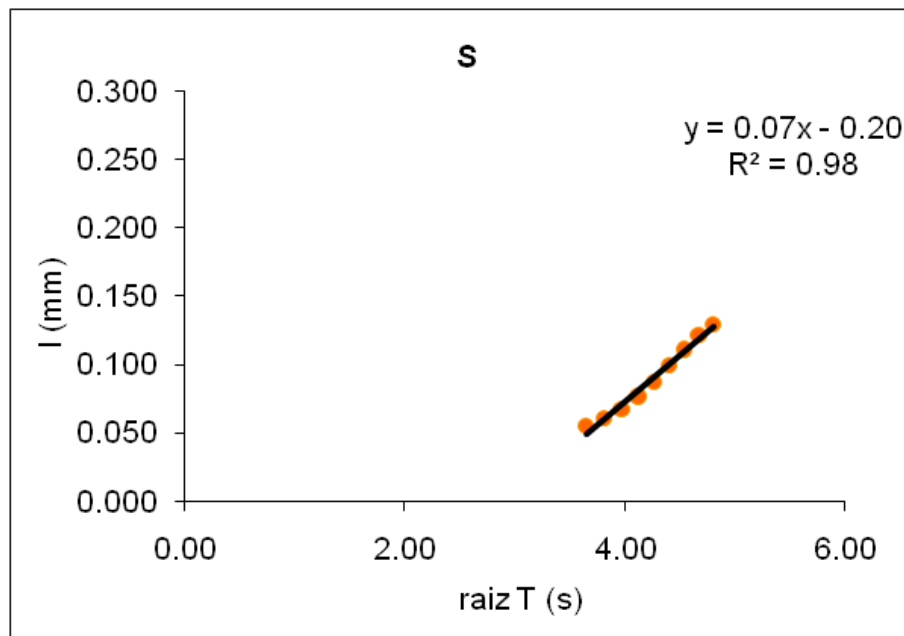


Gráfica 2.: El valor del coeficiente de permeabilidad (k) es la pendiente de la recta: 0.00026 mm/s.

El coeficiente de absorción (S) se mide gráficamente con el método de la estimación con los valores infiltración temprana, "CL". Se crea la gráfica con la I y los valores de la raíz del tiempo identificando el primer trozo con comportamiento de línea recta, su pendiente será el coeficiente. Identificar este segmento inicial puede ser complicado como vemos en las gráficas 3 y 4.



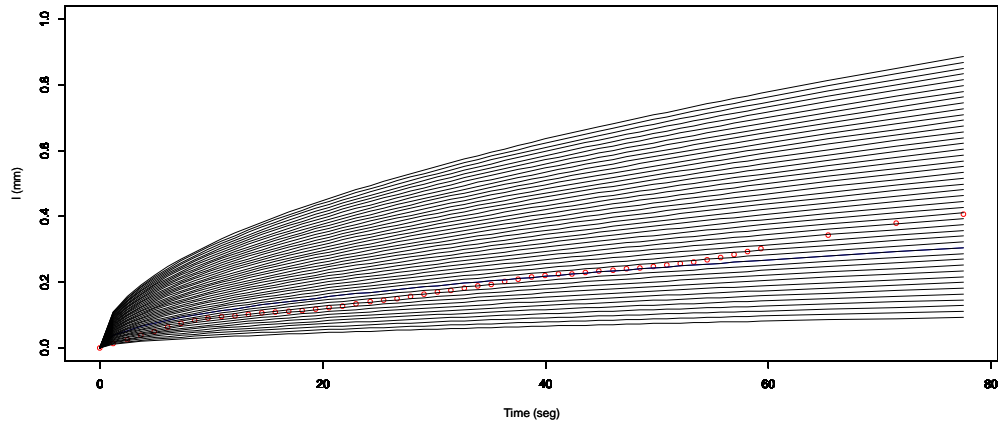
Gráfica 3. Datos iniciales infiltración por raíz del tiempo sin acotar segmento a utilizar.



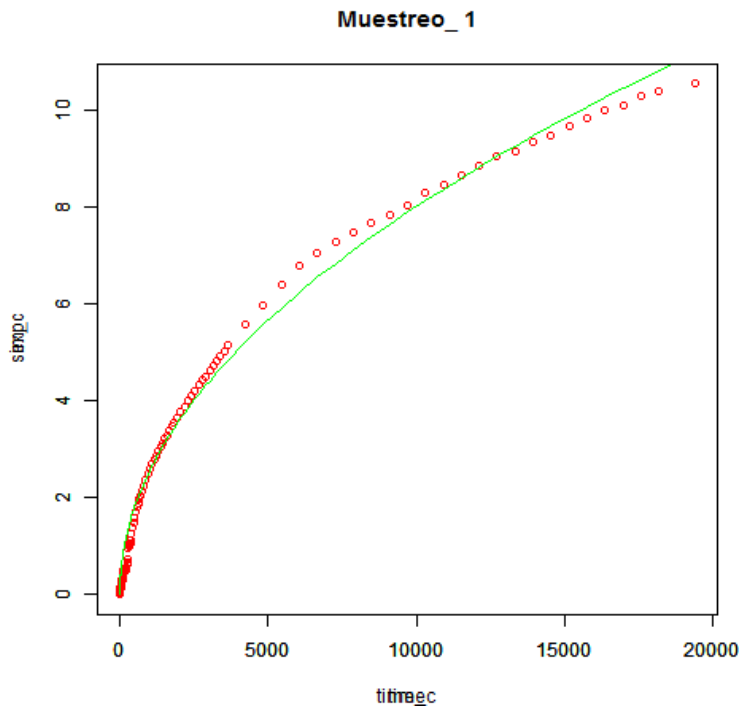
Gráfica 4: Datos iniciales infiltración por raíz del tiempo acotando segmento a utilizar para el cálculo del coeficiente de absorción, será la pendiente del mismo, 0,07 mm/ s<sup>1/2</sup>.

### Gráficas métodos de optimización numérica.

Los métodos de Haverkamp y de Latorre utilizan el programa de cálculo Rcommander para hallar la trayectoria teórica asociada con unos valores determinados de los coeficientes de absorción y permeabilidad que mejor se adapten a los datos experimentales. El método de Haverkamp (Gráfica 5) utiliza los datos iniciales para el cálculo del coeficiente de absorción y el de Latorre (Gráfica 6) todo el conjunto de datos para el cálculo de ambos coeficientes. Listados de cálculos a continuación.



Gráfica 5: Datos experimentales en rojo y trayectorias calculadas para los primeros segundos de infiltración. Se calcula el coeficiente de absorción a partir de los primeros datos experimentales de infiltración.



Gráfica 6: Datos experimentales, en rojo, y trayectoria teórica calculada en verde para todo el conjunto de datos. Se calcula la trayectoria teórica a la que le corresponden valores determinados de coeficientes de absorción y permeabilidad utilizando todos los datos de infiltración disponibles.

## Listado de operaciones a utilizar con el R-commader con el método de optimización numérica utilizando la ecuación simplificada de Haverkamp.

Page 1

```
# cargar inf_exp.csv
# _____

madre = "C:/carpeta/"

Datos <- read.table(paste(madre, "inf_exp.csv", sep=""), header = TRUE, sep = ";")

K <- 0.00011 # mm/s Coeficiente de permeabilidad a introducir.
beta <- 0.12

S <- seq (0.01,0.1,0.002)

T <- 80# s Selecion segundos a utilizar.

Time <- Datos [,1]# s
T <- which (Time <= T)
T <- max(T)
t <- Time[T]

Datos <- Datos [1:T,]

Time <- Datos [,1]# s
I <- Datos [,2] # mm
L <- nrow (Datos)
Nrow<- length(I)

RMSE <- c()
for (i in c(S))
{
  Cap <- (Time^0.5 * i) + (K * ((2-beta)/3))*Time
  AD<-(I-Cap)^2
  rmse = sqrt( sum(AD) / (L-1))
  RMSE <- c(RMSE, rmse)
}

min <- min(RMSE)
minim <- which(RMSE == min)

S <- as.matrix (S)
S_minim <- S [minim]
S [minim]

I_opt <- (Time^0.5 * S_minim) + (K * ((2-beta)/3))*Time

plot (Time,I, type="p", xlim=c(0,t), ylim=c(0,1), col = "red", xlab = "Time (seg)", ylab = "I (mm)")
par(new=TRUE)
plot (Time,I_opt, type="l", xlim=c(0,t), ylim=c(0,1), col = "blue", xlab = "Time (seg)", ylab = "I (mm)")
for (i in c(S))
{
  par(new=TRUE)
  Cap <- (Time^0.5 * i) + (K * ((2-beta)/3))*Time
  plot(Time ,Cap, type="l", xlim=c(0,t), ylim=c(0,1), xlab = "", ylab = "" )
}
```

## Listado de operaciones a utilizar con el R-commader con el método de optimización numérica utilizando el método de Latorre.

Page 1

```
# install.packages("Rcpp")

# library("Rcpp")
# sourceCpp("haverkamp-v0.3.cpp")

# inf <- read.table(header = TRUE, text = "
# time s inf mm
# 0 0
# 5 2.49
# 10 3.58
# 20 5.29
# 30 6.53
# 40 7.7
# 50 8.88
# 380 34.74
# ")

# Función experimental o teórica

# ===== optimización inf 3D

# opt <- inf_ld_opt(inf, 0.00, beta)

# inf_ld_opt(curve, kn, be, rs = 0)
# rs vale 0 ó 1 e indica si se quita la capa de arena o no
# So (mm/s^0.5) y Ko (mm/s) están en la última columna del resultado que devuelve la función.

# =====

# cargar fichero con dartos experimentales "inf.csv
# INTERVALOS TIEMPOS DE 1 S DURANTE LOS PRIMEROS 15 S

beta = 1.201

# =====

madre = "C:/Carpeta/Latorre/"

install.packages("Rcpp")

library("Rcpp")
sourceCpp("haverkamp-v0.6.cpp")

datos <- read.table(paste(madre, "inf.csv", sep=""), header = FALSE, sep = ";")
C <- ncol (datos)
LL <- C-1

S <- c()
K <- c()
Er <- c()
tsand <- c()

for (i in c(1:LL))
{

# i = 1
datos <- read.table(paste(madre, "inf.csv", sep=""), header = FALSE, sep = ";")

Col <- ncol (datos)
Row <- nrow (datos)

name <- datos [1,]
```

```

name <- name [2:Col]

Datos <- datos [2:Row,]

Time <- Datos [,1]
Time <- as.matrix(Time)
Time <- as.numeric (Time)

Exp_t <- Datos [,2:Col]
Exp_t <- Exp_t [,1]
Exp_t <- as.matrix(Exp_t)
Exp_t <- as.numeric (Exp_t)
Exp_t <- na.omit (Exp_t)
inf <- as.numeric (Exp_t)
L <- length (inf)

time <- Time [1:L]

Infil <- data.frame (time, inf)

plot (Infil)

opt <- inf_1d_opt(Infil, 0.00, beta, 0)

Opt <- as.matrix(opt)

time <- Opt [,1]
time <- as.numeric(time)

exp <- Opt [,2]
exp <- as.matrix(exp)
exp <- as.numeric(exp)

sim <- Opt [,3]
sim <- as.matrix(sim)
sim <- as.numeric(sim)

param <- Opt[,4]
param <- as.matrix(param)

s <- param [1,]
k <- param [2,]
er <- param [3,]
t_sand <- param [4,]

s <- as.numeric(s) # mm/s^0.5
k <- as.numeric(k) # mm/s
er <- as.numeric(er)
t_sand <- as.numeric(t_sand)

# _____ Gráficos

t_i <- which (time <= t_sand)
mx_ti <- max (t_i)
t_s <- which (time >= t_sand)
min_ts <- min (t_s)
EXP_int <- (mx_ti + min_ts)/2
EXP_int <- exp[EXP_int]

loc_t <- t_sand - time[mx_ti]
inter_exp <- (exp[min_ts] - exp[mx_ti])/5
exp_int <- loc_t * inter_exp

exp_sand <- ifelse (exp_int == 0, EXP_int, exp_int)

sim_c <- sim + exp_sand
time_c <- time + t_sand

<- nrow (datos)

<- datos [1,]

```



```

dev.new()

png (file =(paste(madre, paste("plot_", name[i], ".jpg", sep="")))
mytitle = paste("Muestreo_", name[i])

maxT <- max(time)
maxI <- max (exp)

plot (time, exp, xlim=c(0, maxT), ylim=c(0, maxI), col = "red", main = mytitle )
par (new=TRUE)
plot (time_c, sim_c, xlim=c(0, maxT), ylim=c(0, maxI), type = "l", col = "green")

dev.off()

# ===== Mapas sensibilidad K

k_m <- k / 1000# m/s
s_m <- s / 1000# m/s^0.5

INF_opt <- inf_ld (Infil, s_m, k_m, 0.00, beta)
INF_opt <- as.matrix (INF_opt)

Time <- INF_opt [,1]
Time <- as.matrix(Time)
Time <- as.numeric(Time)

exp <- INF_opt [,3]
exp <- as.matrix(exp)
exp <- as.numeric(exp)
LL <- length (exp)

delta <- c()

for (f in c(2:LL))
{
Delta <- Time[f]-Time[f-1]
delta <- c(delta, Delta)
}

L_D <- length (delta)
delta_F <- delta[L_D]

delta <- c(delta, delta_F)
length (delta)

int_K <- (6-0)/99
K_log <- seq (-6, -0, int_K)
KK <- 10^(K_log)# mm/s
KK <- KK / 1000# m/s
N_K <- length(KK)

R <- array(Time,c(LL,1))

for (j in 1:N_K)
{
INF <- inf_ld (Infil, s_m, KK[j], 0.00, beta)
INF <- as.matrix (INF)

sim <- INF [,3]
sim <- as.matrix(sim)
sim <- as.numeric(sim)

R <- c(R, sim)

```

```

R <- as.matrix(R)
}

R <- as.numeric (R)
Sims <- matrix(R, ncol=LL, byrow = TRUE)
Sims <- t(Sims)
nSims <- ncol (Sims)

# _____ RMSE

RMSE_K <- c()

for (j in c(2:nSims))
{
Mod <- Sims [,j]
rmse_K = sqrt(sum(delta*(exp - Mod)^2) / (sum(delta)-1))
RMSE_K <- c(RMSE_K, rmse_K)
}

dev.new()

png (file =(paste(madre, paste("Sens_K_", name[i], ".jpg", sep=""))))
mytitle = paste("Sens_K_", name[i])

max_KK <- max(KK)
min_KK <- min(KK)

plot (KK, RMSE_K, type = "l", log = "x", xlim=c(min_KK, max_KK), ylim=c(0, 2), col = "red",
main = mytitle )

dev.off()

# ===== Mapas sensibilidad S

SS <- seq(0.01, 2.5, 0.01)# mm/s^0.5
SS <- SS / 1000# m/s
N_S <- length(SS)

R <- array(Time,c(LL,1))

for (j in 1:N_S)
{
INF <- inf_1d (Infil, SS[j], k_m, 0.00, beta)
INF <- as.matrix (INF)

sim <- INF [,3]
sim <- as.matrix(sim)
sim <- as.numeric(sim)

R <- c(R, sim)
R <- as.matrix(R)
}

R <- as.numeric (R)
Sims <- matrix(R, ncol=LL, byrow = TRUE)
Sims <- t(Sims)
nSims <- ncol (Sims)

# _____ RMSE

RMSE_S <- c()

```

```

for (j in c(2:nSims))
{
Mod <- Sims [,j]
rmse_S = sqrt(sum(delta*(exp - Mod)^2) / (sum(delta)-1))
RMSE_S <- c(RMSE_S, rmse_S)
}

dev.new()

png (file =(paste(madre, paste("Sens_S_", name[i], ".jpg", sep=""))))
mytitle = paste("Sens_S_", name[i])

max_SS <- max(SS)
min_SS <- min(SS)

plot (SS, RMSE_S, log = "x", type = "l", xlim=c(min_SS, max_SS), ylim=c(0, 10), col = "red",
main = mytitle )

dev.off()

# _____
S <- c(S,s)# mm/s^0.5
K <- c(K,k)# mm/s
Er <- c(Er, er)
tsand <- c(tsand, t_sand)
}

# S (mm/s^0.5), K (mm/s)

R <- data.frame (S, K, Er, tsand)

write.table(R, file = paste(madre, "S_K_Er_Tsand.txt", sep=""), append= TRUE, sep=" ",
row.names=FALSE, col.names=FALSE)

```

## ANEXO 3

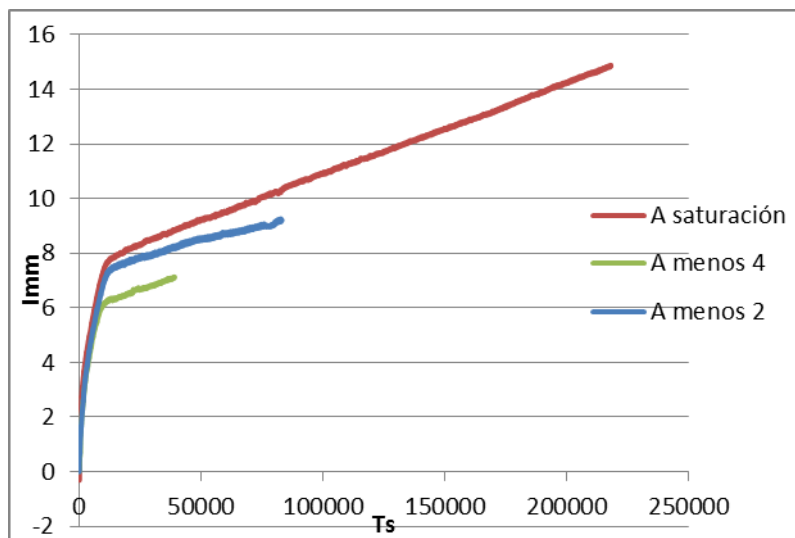
Gráficas de infiltración acumulada por materiales y en función del tiempo. Se han seleccionado ejemplos representativos para cada material.

### Caliza Campanil

Curvas de infiltración acumulada.

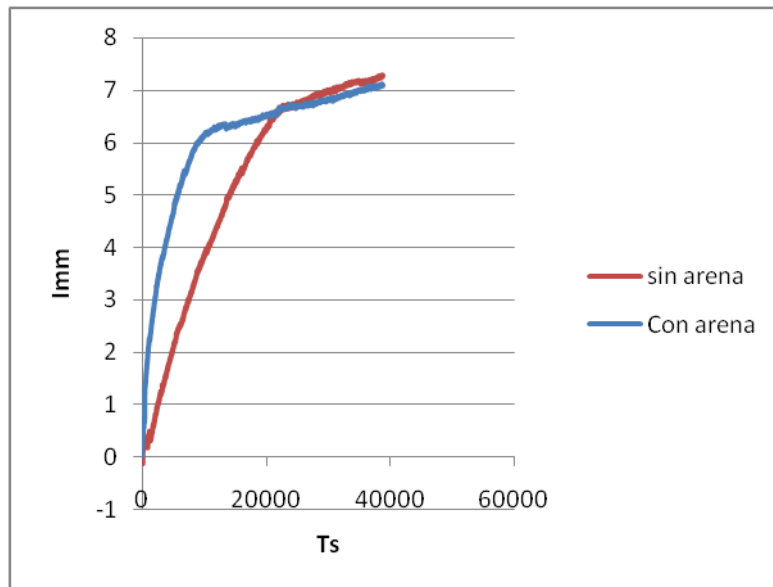
La gráfica 1 es representativa del conjunto de las calizas estudiadas, se puede observar como varían las curvas de infiltración en función de la presión aplicada al superponer los resultados de distintas mediciones en una misma probeta.

Conforme se aplica presión negativa se reduce el tamaño de los poros por los que circulara el agua esto explica los diferentes niveles de infiltración a los que llegara la roca.



Gráfica 1: Curvas de infiltración acumulada Caliza Campanil a presión atmosférica y a negativas, en cm de altura de agua en el infiltrómetro, respecto a esta.

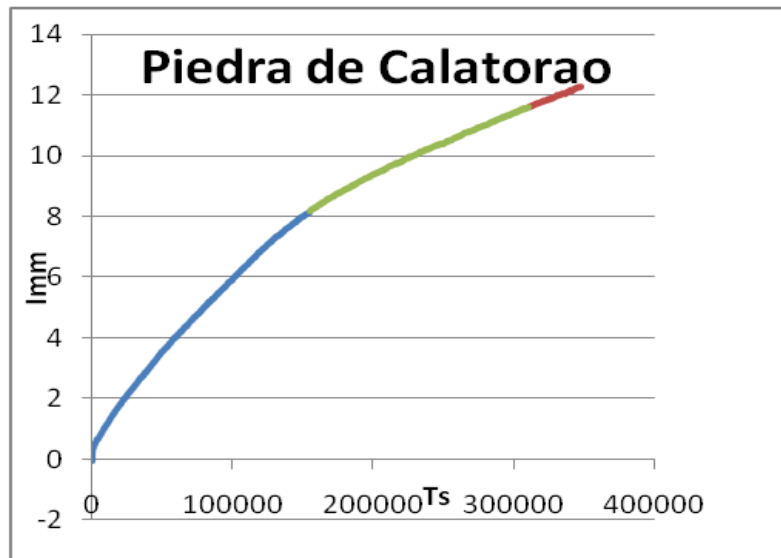
### Efecto de la capa de arena.



Gráfica 2: Comparación entre curvas de infiltración acumulada de una misma probeta a igual presión.

En la caliza campanil debido a su baja permeabilidad hemos añadido una capa de arena para mejorar su infiltración. La gráfica 2 nos muestra dos curvas de infiltración de una misma probeta de Caliza Campanil a una misma presión, la diferencia de los recorridos se debe a que en la curva roja no se ha empleado arena. Se observa que cuando no hay arena la infiltración es más lenta, con valores irregulares al principio fruto de las dificultades para la infiltración, cuando llegan a una situación de saturación el comportamiento es igual en ambas.

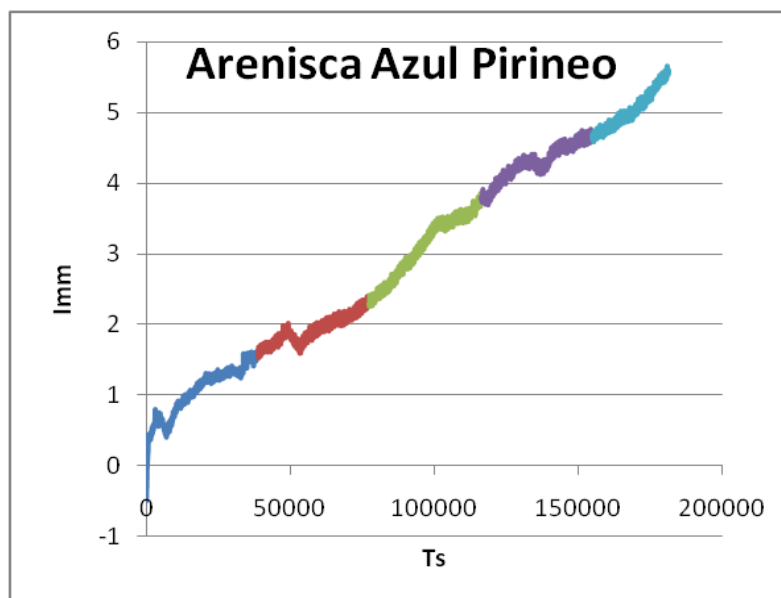
### Piedra de Calatorao



Gráfica 4: Curva de infiltración de la Piedra de Calatorao a saturación.

En la gráfica 4 se observa que es una roca de cuya velocidad de infiltración, ver tiempos de infiltración en la gráfica, es muy baja respecto a los otros materiales aun en saturación debido a ello no es factible realizar más cálculos sobre la Piedra de Calatorao.

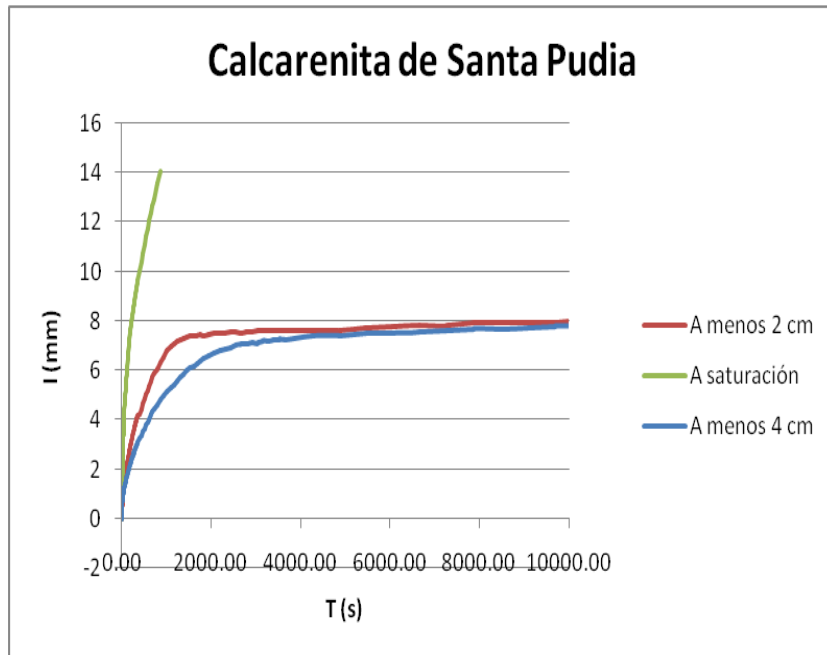
### Arenisca Azul Pirineo



Gráfica 5: Curva de infiltración de Arenisca Azul Pirineo a saturación.

La gráfica 5 de infiltración acumulada muestra un ritmo lento e irregular, que no hace factible profundizar el análisis.

## Calcarenita de Santa Pudia

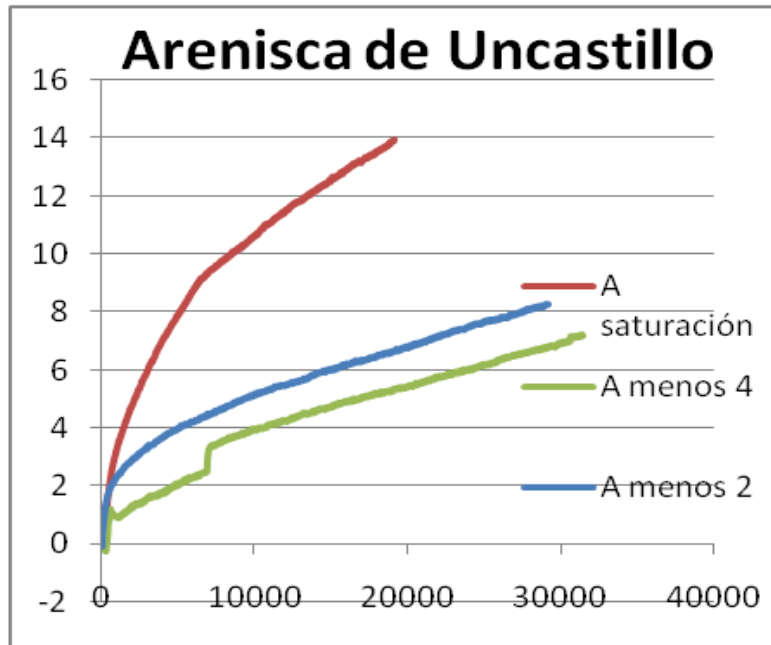


Gráfica 6: Curvas de infiltración a distintas presiones Calcarenita de Santa Pudia.

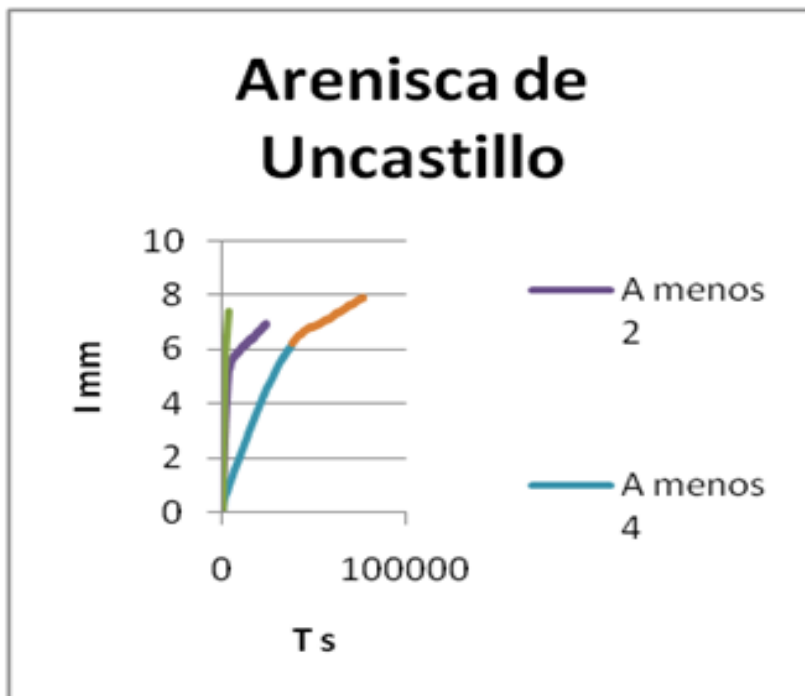
La Calcarenita de Santa Pudia es la roca que presenta una mayor absorción y permeabilidad, como se puede observar en la gráfica 6 la infiltración transcurre a un ritmo notablemente superior que en las otras rocas, a excepción de los travertinos macroporosos a saturación. A presiones negativas respecto a la atmosférica. En este ejemplo se observa que en las medidas a presiones negativas el ritmo de infiltración es menor debido a que se restringe el tamaño de poros por los que el agua puede circular, sumado a la presión extra que la infiltración tiene que vencer. Se observa que a presiones negativas una vez se ha saturado la probeta no se produce drenaje, se observa como la infiltración se detiene, esto es debido a que la resistencia generada por tensión superficial de los poros se impone.

## Arenisca de Uncastillo

La arenisca de Uncastillo es la roca que presenta mayor variabilidad en función de las probetas estudiadas. Se mostraran distintas gráficas para mostrar su variabilidad.



Gráficas 7: Curvas de infiltración de probeta paralela a la estratificación.

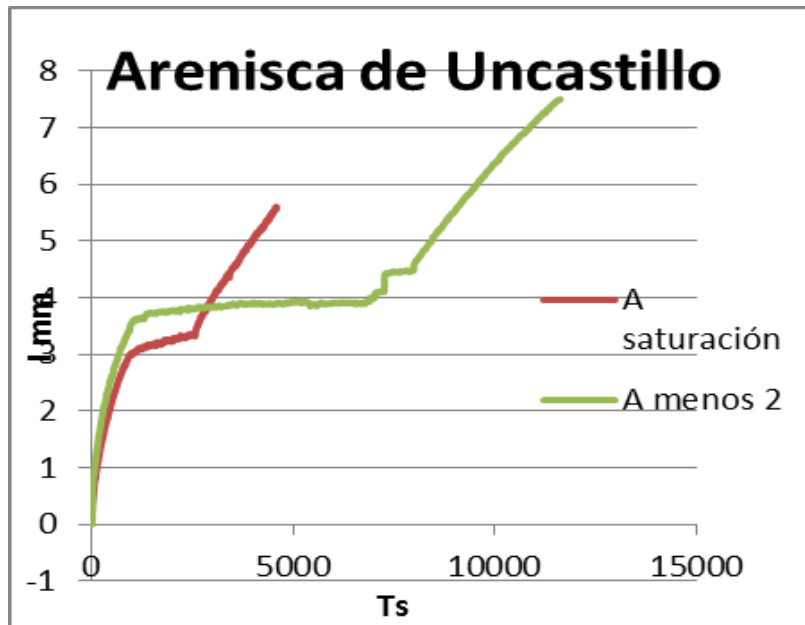


Gráfica 8: Curvas de infiltración de probeta perpendicular a la estratificación.



Se observa que la permeabilidad de las probetas paralelas a la estratificación, gráfica 7, es menor que en las perpendiculares, gráfica 8, efecto que se acentúa a presiones negativas, asimismo en todas las probetas la infiltración desciende a medida que se aplica presión negativa.

Situación particular



Gráfica 9: Comparación curvas de infiltración probeta de Arenisca de Uncastillo.

En algunas de las mediciones en Areniscas de Uncastillo se desarrolla una evolución como las de la gráfica 9. Esta evolución indica una infiltración inicial acorde con los valores de otras probetas para llevar a un punto de estancamiento en el que la infiltración se reduce para pasar de forma subrepticia al goteo por la parte inferior de la probeta. Esto nos indica que existe un periodo de transición entre la incapacidad para gotear de una roca y que lo haga de forma directa, en este caso una vez se ha completado la primera fase de infiltración de la roca la tensión superficial de los poros impide el goteo y la infiltración se reduce pasando a aumentar lentamente la presión hasta que se vence la resistencia al goteo.