

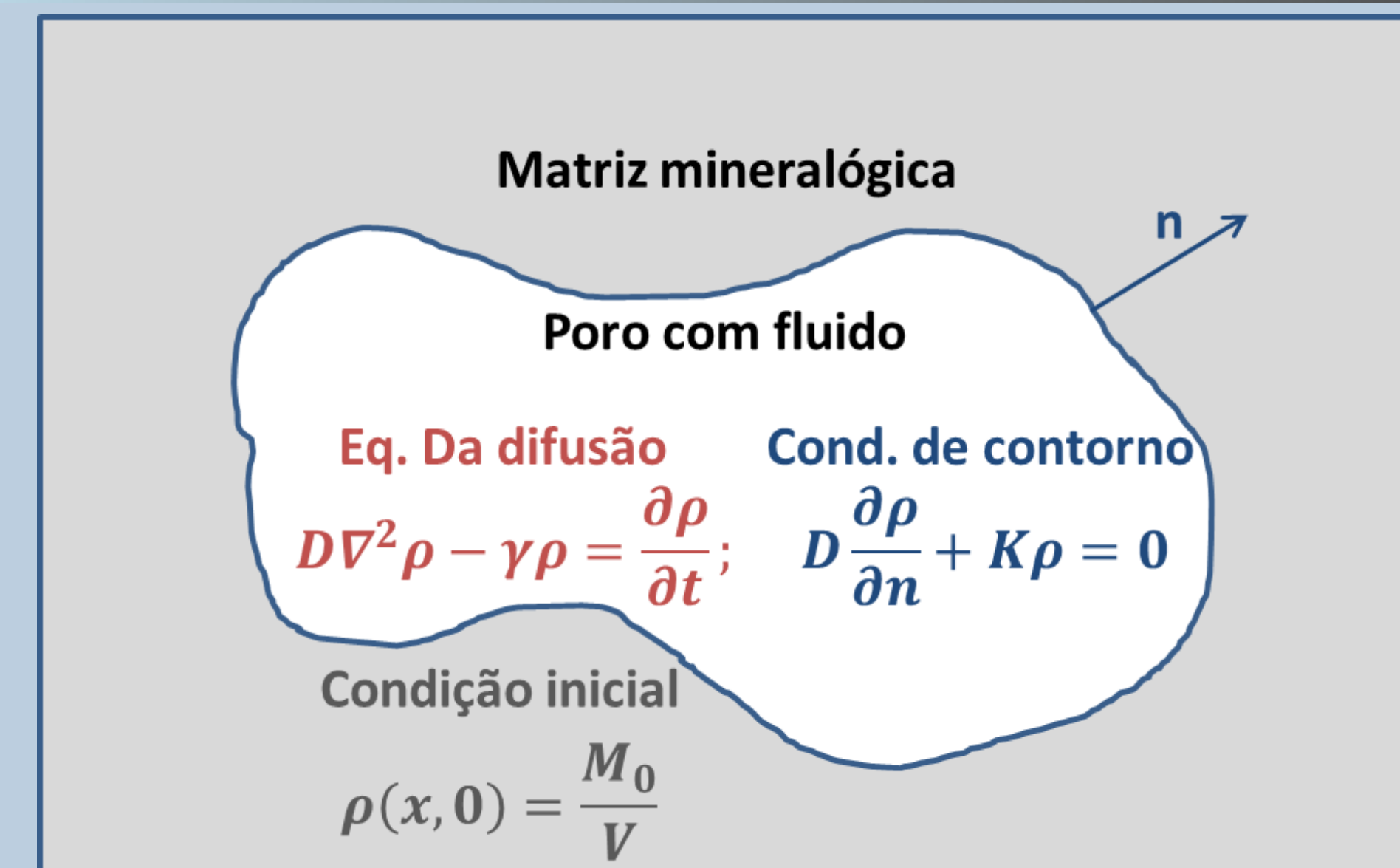
q-Estatística em rochas reservatório de petróleo: modelagem direta de dados de RMN

Maury D. Correia, I. S. Oliveira, A. M. Souza, J. P. Sinnecker, R. S. Sarthour
maury.duarte@petrobras.br

Resumo

A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) é uma importante ferramenta na prospecção de hidrocarbonetos. Em praticamente todos os poços do pré-sal corre-se uma ferramenta de ressonância. Com dados de RMN pode-se obter informações sobre a porosidade, tipo de fluido (água, gás ou óleo) e até mesmo permeabilidade da rocha [1]. Contudo, um dos problemas associados à interpretação dos dados de RMN é a técnica de inversão do decaimento para o cálculo da distribuição de T_2 . Em geral assume-se que o decaimento da magnetização é uma multi-exponencial e utiliza-se a regularização de Tikhonov para inversão [2]. Nesse trabalho propomos uma modelagem direta baseada na q-estatística e na superestatística [3, 4], na qual ajustamos no máximo 3 q-exponenciais aos dados experimentais, e a partir desse ajuste temos os parâmetros para prever a distribuição de T_2 , de onde se extrai as interpretações petrofísicas. Mostramos que o valor de q é uma medida da razão entre a largura da distribuição e o quadrado da média do inverso das taxas de relaxação.

Magnetização em um poro



Solução multiexponencial:

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n F_n(\vec{r}) e^{-t/T_{2n}} \quad (1)$$

Equação de autovalor:

$$-D\nabla^2 F_n = \frac{1}{T_{2n}} F_n \quad (2)$$

Condição de contorno sobre os autovetores:

$$D\frac{\partial F_n}{\partial n} + K F_n = 0 \quad (3)$$

Devido as propriedades de ortogonalidade dos autovetores do operador de Laplace, os coeficientes são:

$$A_n = \frac{M_0}{V} \frac{\int F_n(\vec{r}) d\tau}{\int F_n^2(\vec{r}) d\tau} \quad (4)$$

$$I_n = \frac{1}{V} \frac{[\int F_n(\vec{r}) d\tau]^2}{\int F_n^2(\vec{r}) d\tau} \quad (5)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} I_n = 1 \quad (6)$$

Magnetização:

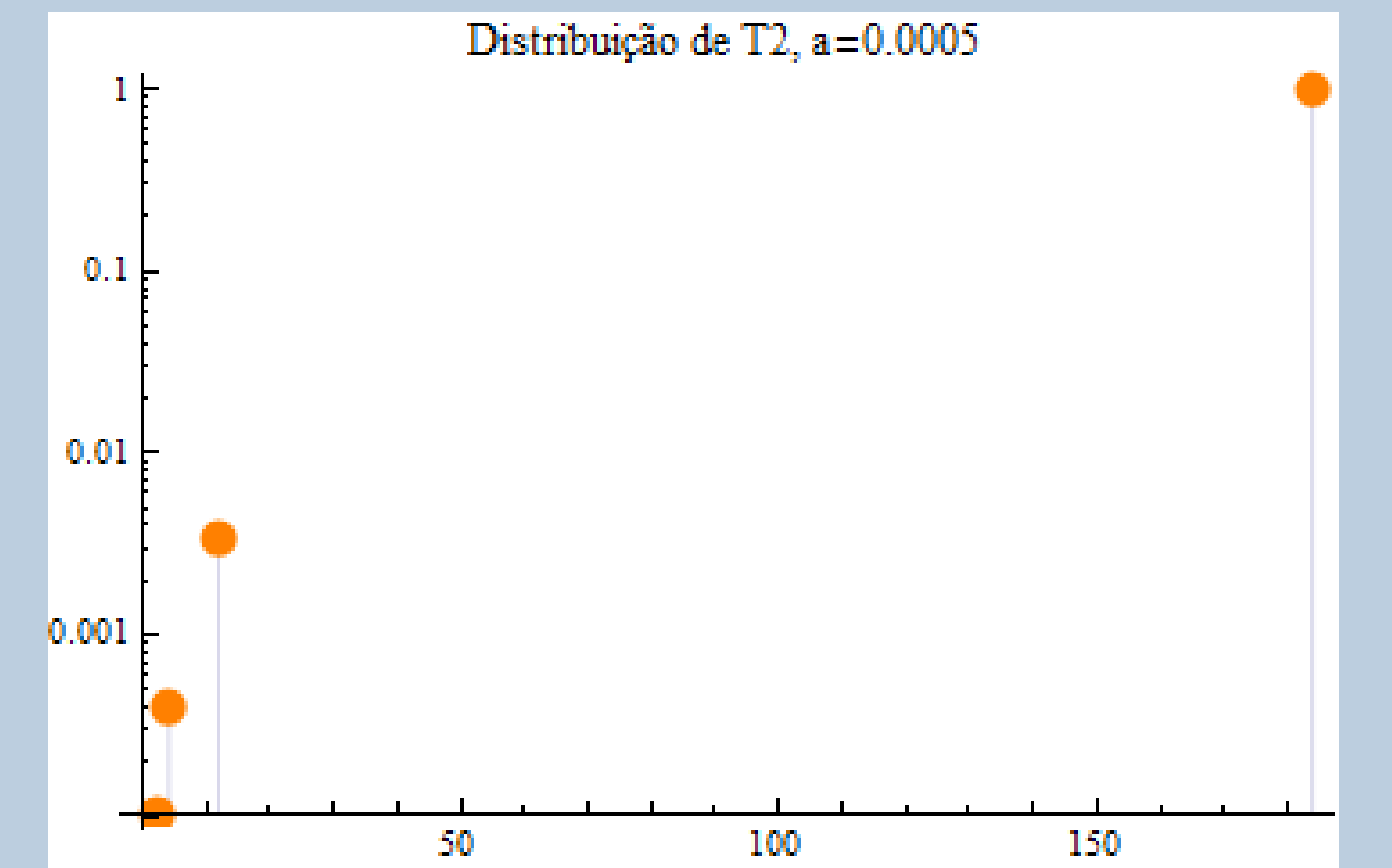
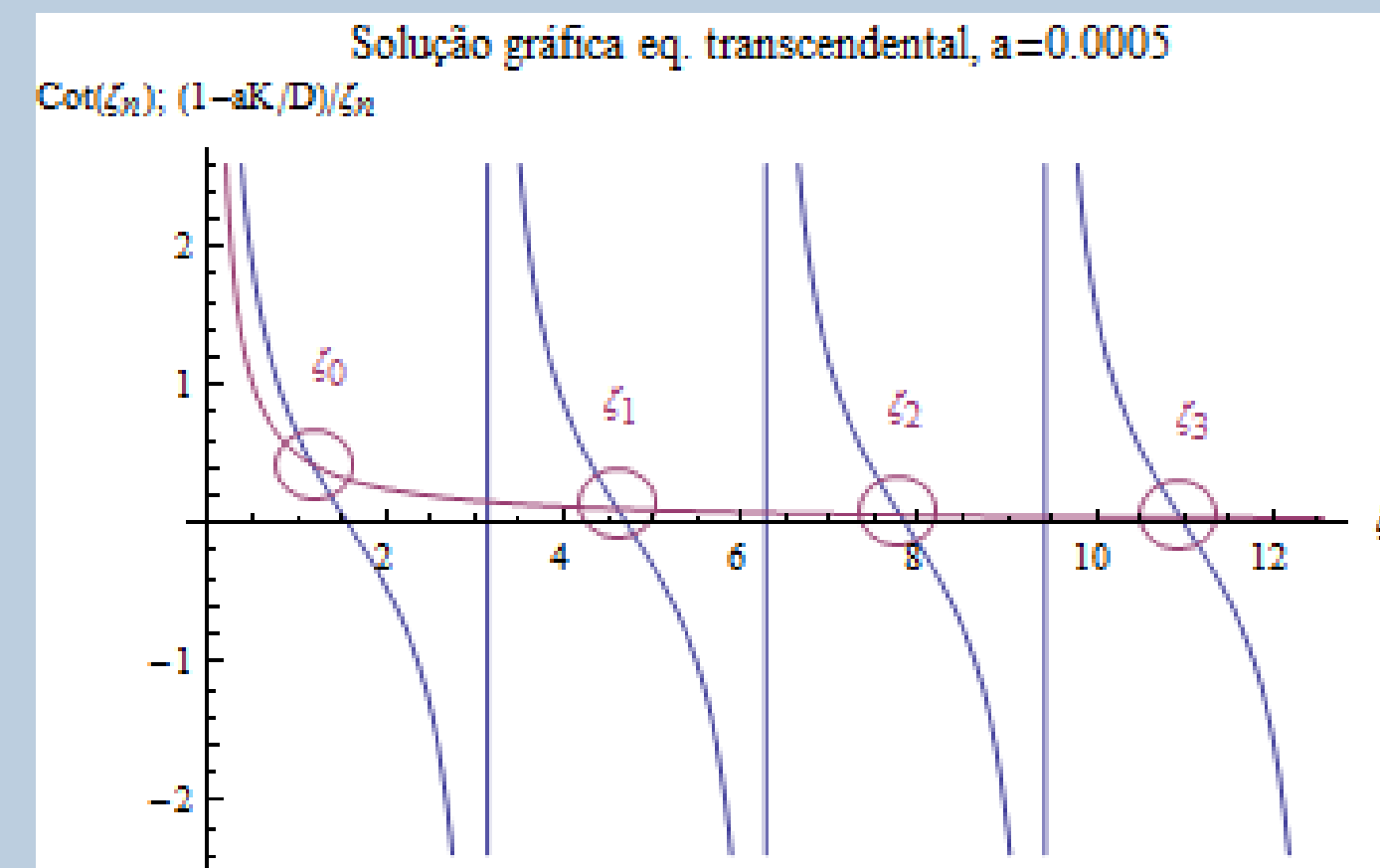
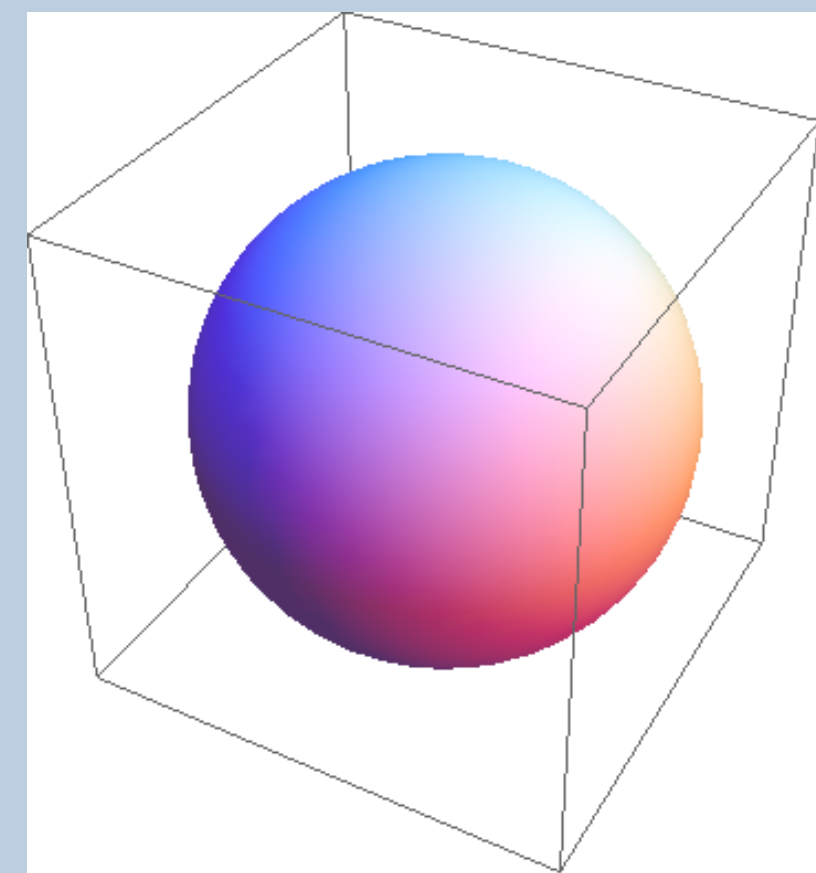
$$M(t) = M_0 \sum_{n=0}^{\infty} I_n e^{-t/T_{2n}} \quad (7)$$

Observe que o confinamento define um espectro multiexponencial para o decaimento da magnetização mesmo para um único poro!

Referências

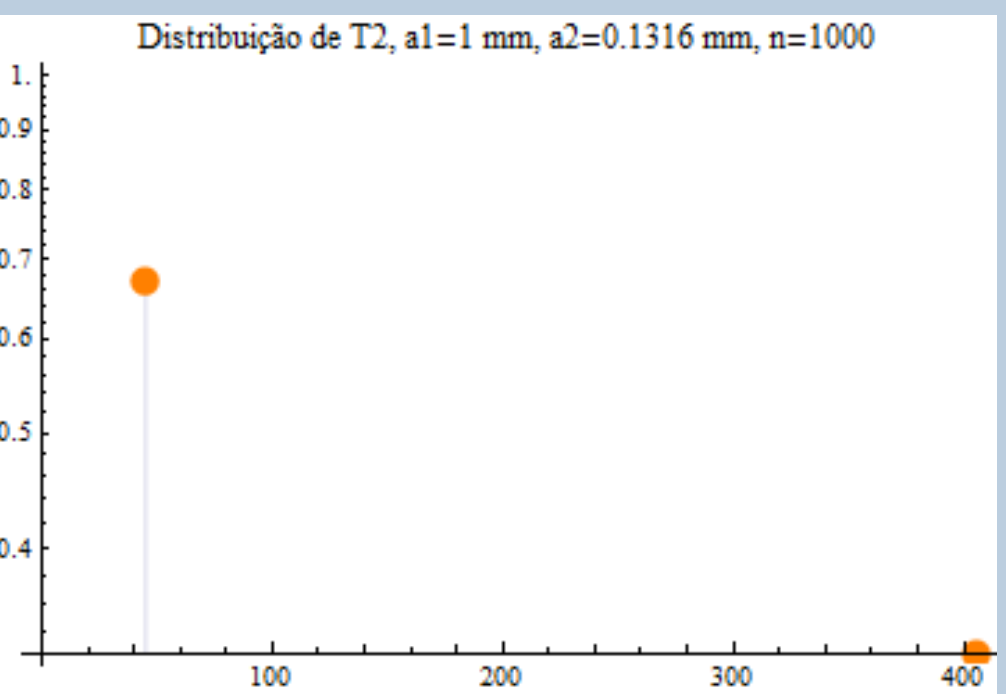
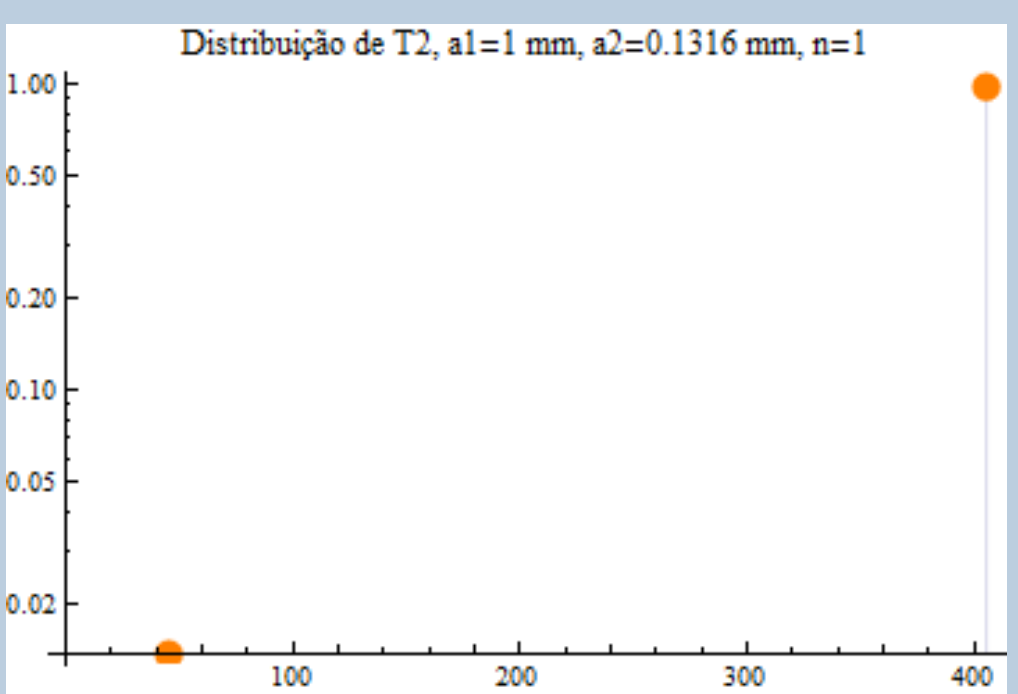
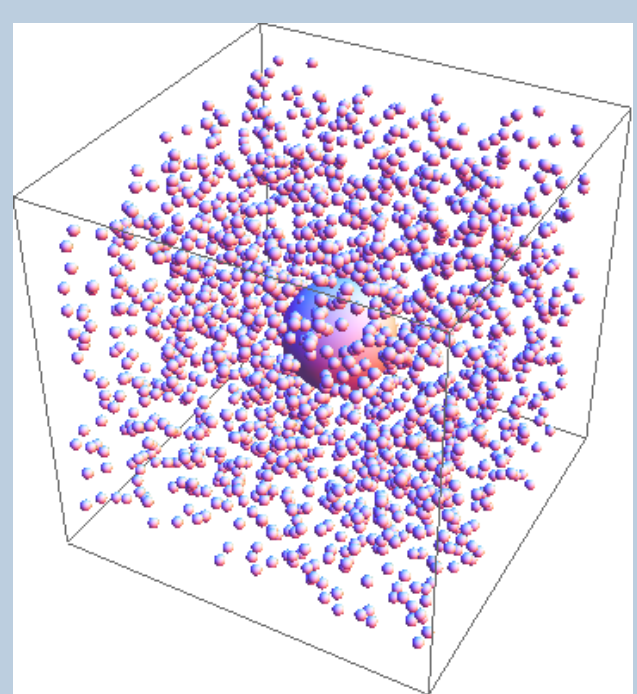
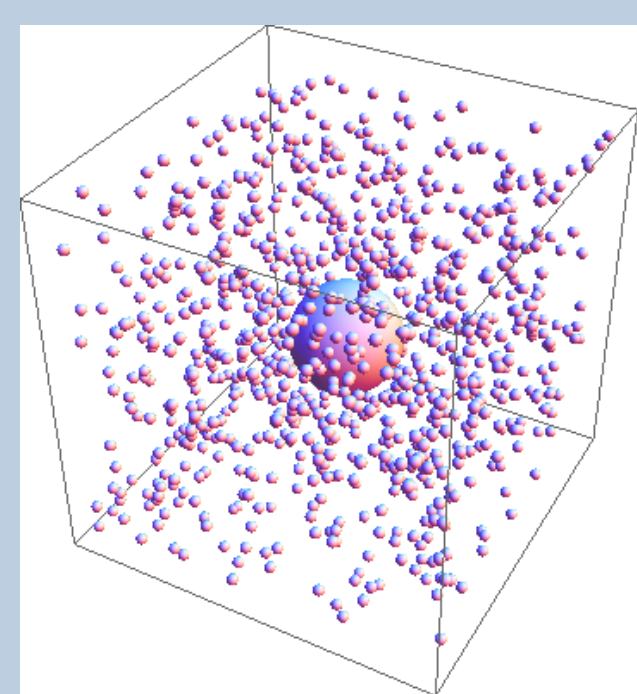
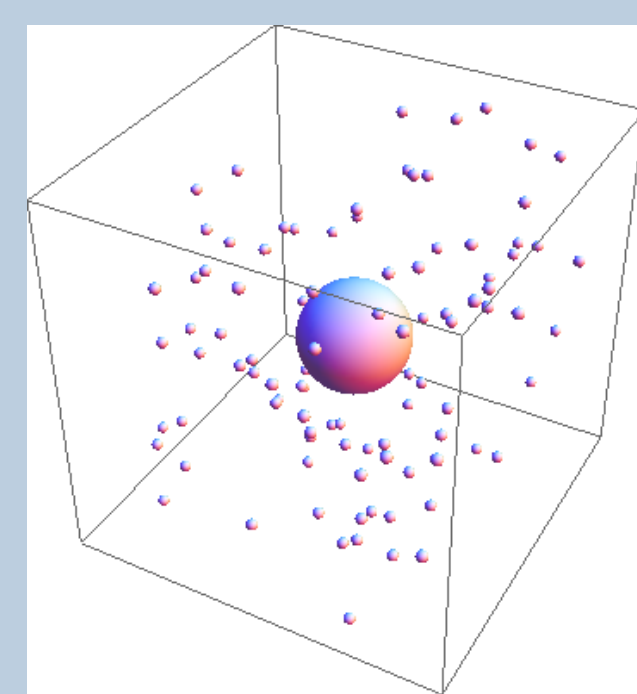
- [1] George R. Coates, Lizhi Xiao and Manfred G. Prammer, "NMR Logging Principles & Applications", Halliburton Energy Services Publication H02308, Houston, 1999.
- [2] J.P. Butler, J.A. Reeds and S.V. Dawson, "Estimating solutions of the first kind integral equations with nonnegative constraints and optimal smoothing", SIAM J. Numer. Anal., vol. 18, no. 3, 1981, pp. 381397.
- [3] C. Tsallis "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics", Journal of Statistical Physics 52: 479487, 1988.
- [4] C. Beck and E.G.D. Cohen, "Superstatistics", Physica A 322, 267 (2003).

Um poro esférico



Observe que para apenas um poro temos um espectro multiexponencial porém o primeiro modo corresponde a mais de 98% do sinal.

Distribuição bimodal de poros



Observe que variando a distribuição de poros podemos achar a forma que quisermos para a distribuição de T_2 . Considerando que uma rocha tem uma distribuição aleatória de tamanhos de poros, supomos que tal distribuição é uma χ^2 . Isso nos leva necessariamente a um decaimento q-exponencial.

Modelo q-estatístico

$$M(t) = a \int_0^{\infty} f(\beta) e^{-\beta t} d\beta$$

$$= a \int_0^{\infty} g(T_2) e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 \quad (8)$$

$$= a \times e_q^{-\frac{t}{\langle T_2 \rangle}} \quad (9)$$

$$g(T_2) = \frac{(q-1)^{\frac{1}{1-q}}}{\Gamma(\frac{1}{q-1})} \langle T_2 \rangle^{\frac{1}{q-1}} T_2^{-\frac{q}{q-1}} e^{-\frac{t}{(q-1)T_2}} \quad (10)$$

Observe que temos uma forma analítica para a distribuição de T_2 baseado em um modelo físico bem simples de distribuição de poros esféricos. A variável superestatística intensiva é: $\beta = 1/T_2$

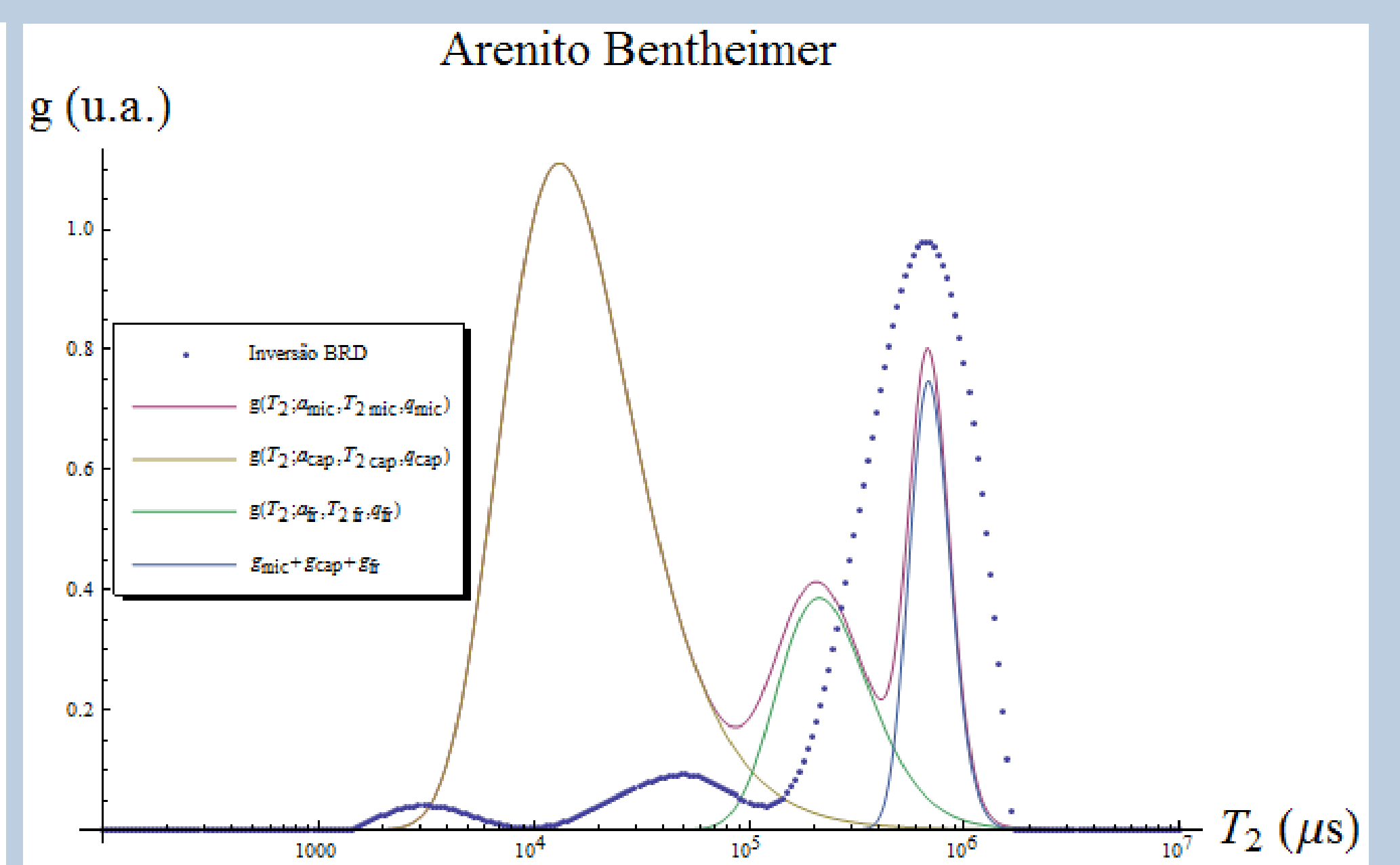
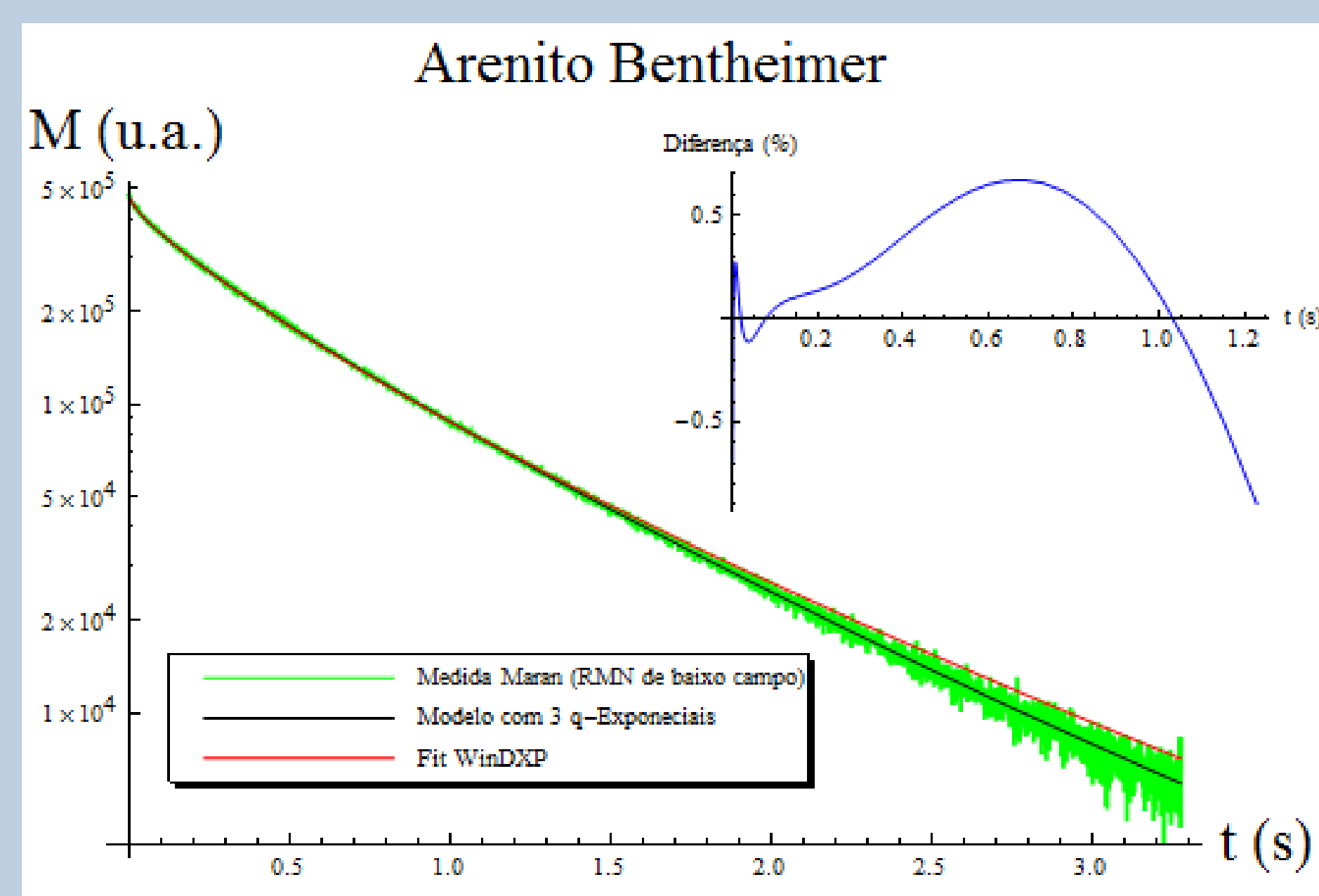
Rochas de afloramento



Resultados para rochas

O modelo proposto tem 9 parâmetros sendo que $(a_{mic}, \langle T_2 \rangle_{mic}, q_{mic})$ e $(a_{cap}, \langle T_2 \rangle_{cap}, q_{cap})$ descrevem a população de spins que pertencem ao fluido preso na estrutura porosa e $(a_{fr}, \langle T_2 \rangle_{fr}, q_{fr})$ nos quantifica o volume de fluido livre:

$$M(t) = a_{mic} \times e_{q_{mic}}^{-\frac{t}{\langle T_2 \rangle_{mic}}} + a_{cap} \times e_{q_{cap}}^{-\frac{t}{\langle T_2 \rangle_{cap}}} + a_{fr} \times e_{q_{fr}}^{-\frac{t}{\langle T_2 \rangle_{fr}}} \quad (11)$$



$$q = \frac{\sigma^2}{\langle \beta \rangle^2} + 1 \quad (12)$$

	a (u.a.)	$\langle T_2 \rangle$ (s)	q
microporosity	52077.4 (10.9%)	0.026	1.95
capillarity	133787.0 (28.1%)	0.178	1.31
free	290390.0 (61.0%)	0.715	1.05

Conclusões

O algoritmo BRD inverteu o dado de decaimento utilizando 256 exponenciais e parâmetro de regularização de Tikhonov igual a 0.1914, gerando uma distribuição de T_2 numérica. Nosso modelo substitue todas essas exponenciais por apenas 3 q-exponenciais e fornece distribuições analíticas. Nossa proposta difere bastante na predição de propriedades petrofísicas isso se deve a simplicidade do modelo que, basicamente, inclui toda complexidade do problema em raios de esferas. Modelos mais realistas podem levar a predições mais próximas as reais. Trabalho apresentado na reunião anual de trabalho do INCT-SC no CBPF em 22,23,24 de abril de 2013