

Prospección electromagnética por fuentes controladas: modelado e inversión con aplicación a problemas medioambientales y de energías renovables

Franco S. Macchioli Grande^{1,2}, Marina A. Rosas-Carbajal³,
Fabio I. Zyserman^{1,2}

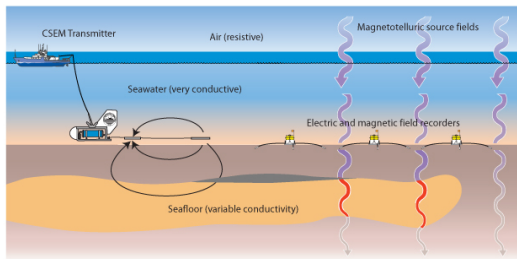
¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP ²CONICET

³Institut de Physique du Globe de Paris

Jornada HPC - FCAG

11 de julio de 2017

Prospección electromagnética por fuentes controladas



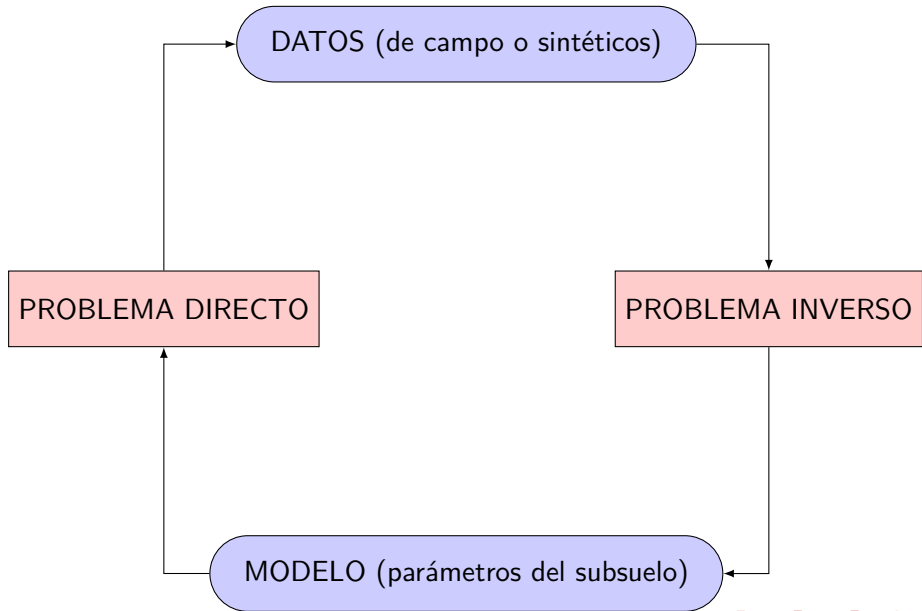
- ✓ Prospección de petróleo off-shore
- ✓ Monitoreo de acuíferos costeros
- ✓ Monitoreo de plumas de CO₂
- ✓ Estudio de sistemas geotermales
- ✓ ... Y muchos más

Fuentes controladas



Amplio rango de frecuencias

Modelado e inversión



Modelado directo: CSEM

Involucra la resolución de las ecuaciones de Maxwell en una cierta región del subsuelo:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu\mathbf{H} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} - \sigma\mathbf{E} &= \mathbf{J}_e.\end{aligned}$$

Dos componentes para los campos electromagnéticos y la conductividad:

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_s, \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}_p + \mathbf{H}_s, \\ \sigma &= \sigma_p(z) + \sigma_s(x, y, z),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E}_p + i\omega\mu\mathbf{H}_p &= 0, & \nabla \times \mathbf{E}_s + i\omega\mu\mathbf{H}_s &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{H}_p - \sigma_p\mathbf{E}_p &= \mathbf{J}_e. & \nabla \times \mathbf{H}_s - \sigma\mathbf{E}_s &= \sigma_s\mathbf{E}_p.\end{aligned}$$

- ✓ Fuentes controladas → Dipolo eléctrico horizontal y vertical
- ✓ Campos primarios → Software EMDPLER (adaptado)
- ✓ Campos secundarios → Método de Elementos finitos

Dos modos para los campos EM:

✓ Modo TM

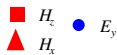
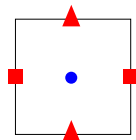
$$\mathbf{E} = (E_x(x, z), 0, E_z(x, z)),$$

$$\mathbf{H} = (0, H_y(x, z), 0)$$

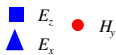
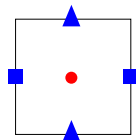
✓ Modo TE

$$\mathbf{H} = (H_x(x, z), 0, H_z(x, z)),$$

$$\mathbf{E} = (0, E_y(x, z), 0).$$



TE - Mode



TM - Mode

Descomposición de dominio

- ✓ El dominio donde se resuelven las ecuaciones se divide en subdominios.
- ✓ Resolución de un número grande de pequeños sistemas lineales.
- ✓ Se agregan incógnitas para que coincidan las soluciones en dominios adyacentes (multiplicadores de Lagrange, que conducen a la determinación de $9n \times n$ incógnitas en la totalidad del dominio).
- ✓ Esta resolución conduce a algoritmos paralelizables.
- ✓ La comunicación entre procesadores se realiza a través de MPI.

- ✓ Se resuelve un único sistema de ecuaciones de gran tamaño, que tiene asociado una matriz rala, compleja y no simétrica, limitando las técnicas para resolverlo.
- ✓ El número de grados de libertad es menor que en la descomposición de dominio (se tiene una incógnita por nodo de la grilla de elementos finitos, dando un total de $3n_x n_z + n_x + n_z$).
- ✓ Se empleó el solver Parallel Sparse Direct and Multi-recursive Iterative Linear Solvers (PARDISO).
- ✓ PARDISO paraleliza los cálculos usando OpenMP.

Análisis de escalabilidad: Descomposición de dominio

Performance de la descomposición de dominio

# cores	Grilla 512×512 ^[1]			Grilla 1024×1024 ^[2]			Grilla 2048×2048 ^[3]			Grilla 4096×4096 ^[4]		
	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p
1	438	1	1	2997	1	1	14416	1	1			
4	118	3.7	0.92	598	5.0	1.25	3707	3.9	0.97	28345	1	1
16	60	7.3	0.46	265	11.3	0.71	1889	7.6	0.48	13787	2.1	0.13
64	36	12.2	0.19	156	19.2	0.30	815	17.7	0.28	7860	3.6	0.06
256	37	11.8	0.05	105	28.5	0.11	513	28.1	0.11	4266	6.6	0.03

Tiempos de cómputo, speedup y eficiencia considerando 4 discretizaciones:

[1] $\sim 2.36 \times 10^6$ incógnitas, [2] $\sim 9.44 \times 10^6$ incógnitas, [3] $\sim 3.77 \times 10^7$ incógnitas and [4] $\sim 1.51 \times 10^8$ incógnitas.

Análisis de escalabilidad: Resolución global

Performance de la resolución global

# cores	Grilla 512×512 ^[1]			Grilla 1024×1024 ^[2]			Grilla 2048×2048 ^[3]			Grilla 4096×4096 ^[4]		
	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p	Time [s]	S_p	\mathcal{E}_p
1	2	1	1	6	1	1	25	1	1	97	1	1
4	2	1	0.25	7	0.86	0.21	27	0.93	0.23	109	0.89	0.22
16	2	1	0.06	8	0.75	0.05	30	0.83	0.05	119	0.82	0.05
64	2	1	0.02	8	0.75	0.01	28	0.93	0.01			

Tiempos de cómputo, speedup y eficiencia considerando 4 discretizaciones:
[1] $\sim 7.87 \times 10^5$ incógnitas, [2] $\sim 3.14 \times 10^6$ incógnitas, [3] $\sim 1.26 \times 10^7$ incógnitas and [4] $\sim 5.03 \times 10^7$ incógnitas.

Inversión estocástica: Markov chain Monte Carlo

Estimación de función de densidad de probabilidad a posteriori (pdf) de parámetros del subsuelo...

Invertir modelos complejos de conductividad requiere cientos de miles de corridas del modelado...

Necesidad de tiempos de cómputo razonables (algunos segundos) y de paralelizar cálculos asociados a diferentes cadenas de Markov y frecuencias.

Software para inversión estocástica \implies Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM)