



## Tatu - Software Livre para Modelagem Eletromagnética 1D.

Valdelirio da Silva e Silva & Paulo Alexandre Aquino da Costa,  
Universidade Federal do Pará.

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 16<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro - Brazil, 19-22 August, 2019

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purpose without the written consent of Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

*Tatu* is a software to assist students and researchers on the simulation and verification of electromagnetic responses in horizontal layered isotropic media for sources commonly used in geophysics (frequency domain), such as horizontal electric dipole, vertical electric dipole, horizontal magnetic dipole and vertical magnetic dipole. The software allows graphical visualization of results. The transmitters and receivers can be positioned on any layer. This allows to investigate the possibilities of certain geoelectrical models being studied by a specific source, in specific frequency extension, or by a particular field component. This summary presents a bit of code validation and illustration of the use of its interfaces. The results are limited to the use of the linear digital filters technique, but because it is open-source software, allows contributions, suggestions and discussions about improvements.

### Introdução

Dado um problema geológico, em qualquer processo de inversão computacional em geofísica há necessidade de se realizar a modelagem direta. No caso dos métodos eletromagnéticos as modelagens diretas 2D e 3D precisam invariavelmente de algumas componentes de campo eletromagnético considerando o meio de camadas horizontais, a chamada modelagem 1D. E mediante a grande importância da modelagem 1D, toda modelagem direta tem como primeira tarefa a completa e correta obtenção dos campos 1D, sendo então uma matéria obrigatória na formação de pós-graduandos, ou mesmo graduandos na área, e que também proporciona possíveis “insights” sobre investigações geofísicas, sejam referentes à aplicação em diferentes ambientes geológicos, ou observação de diferentes componentes de campo daquelas habitualmente empregadas num determinado método geofísico.

É crescente a ação de centros de pesquisa geofísica disponibilizarem seus códigos de modelagem inversa ou direta. Uma lista de softwares open-source de geofísica pode ser encontrada por exemplo em *Comparison of free geophysics software*: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_free\\_geophysics\\_software](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_free_geophysics_software) Para modelagem eletromagnética a lista tem o *SimPeg* (Cockett et al., 2015), *pyGIMLi* (Rücker et al., 2017), *OCCAM1DCSEM* e *2DMT* (<https://marineemlab.>

[ucsd.edu/Projects/Occam/index.html](https://ucsd.edu/Projects/Occam/index.html)), *GIEM2G* e *extrEMe* (Kruglyakov et al., 2016), *gprMax* (Warren et al., 2016) e *empymod* (Werthmüller, 2017).

O software *SimPeg* faz modelagem direta do dipolo magnético vertical (DMV) com aplicação em levantamento aeromagnético. O *pyGIMLi* também é disponibilizado para o DMV nesse tipo de levantamento assim como também para o método Magnetotelúrico (MT). Os códigos em *Fortran* *OCCAM1DCSEM* e *2DMT* realizam modelagem direta e inversa 1D de *marine controlled source* (mCSEM) e MT 2D, respectivamente. No caso de MT 3D, tem-se a modelagem direta por Equações Integrais em *GIEM2G* e *extrEMe*, escritos em *C#* e *Fortran*. O *gprMax* realiza modelagem do método GPR no domínio do tempo por Diferenças Finitas. Dentre os softwares da lista, somente o *empymod* dispõe, em linguagem *python*, a modelagem direta 1D para diversas fontes de dipolos, elétricos e magnéticos, nos domínios da frequência e do tempo e sob consideração de isotropia transversal vertical. Com a biblioteca atual, o software *Tatu* é open-source, escrito em *Fortran*, que realiza também a modelagem direta 1D no domínio da frequência para meio de camadas isotrópicas, em que as medidas podem ser feitas em qualquer posição relativa com as interfaces e às fontes de dipolos elétricos e magnéticos (DMV, DMHx-Dipolo Magnético Horizontal na direção x, DMHy, DEHx-Dipolo Elétrico Horizontal na direção x, DEHy e DEV-Dipolo Elétrico Vertical). O código é disponível em <https://github.com/valdelirio/tatu>, e sua interface gráfica pode ser acessada em <https://tatusoftware.com>.

### Código e Validação

As expressões de campo eletromagnético para todas as fontes seguiu a formulação clássica dos potenciais vetoriais **A** e **F** de Sheldunoff. Para cada direção de dipolo faz-se uma escolha adequada nas componentes dos potenciais **A** e **F** a fim de se obter as componentes verticais desses potenciais no domínio espectral de Fourier ( $k_x, k_y, z$ ) (ver Ward and Hohmann (1988)). Nesse domínio essas componentes tiveram expressões nas quais seus valores podem ser encontrados em qualquer posição vertical de camada, com a fonte também em qualquer lugar. O referencial para a origem do eixo vertical  $z$  foi na interface ar-semiespaço, e todas as exponenciais apresentadas são tais que a parte real de seus argumentos sejam negativas, a fim de garantir o decaimento da amplitude dos campos ao longo da propagação.

De posse das expressões dos potenciais no domínio ( $k_x, k_y, z$ ) e as relações de campo eletromagnético, faz-se uso de identidade de transformada inversa dupla de Fourier e transformada inversa de Hankel para se chegar às expressões de campo no domínio espacial ( $r, z$ ). Alternativamente, pode-se realizar apenas uma

transformada inversa de Fourier no domínio  $(k_x, k_y, z)$ , e se chegar por exemplo em expressões de campo no domínio  $(x, k_y, z)$ , ideal para modelagens 2D de fontes pontuais. O código do *Tatu* também tem disponível expressões de campo nesse domínio.

As transformadas inversas de Hankel dentro do código são numericamente feitas utilizando-se filtros digitais lineares (Ghosh, 1971; Anderson, 1979; Guptasarma and Singh, 1997). Há um módulo no código que disponibiliza vários filtros digitais (incluindo para transformada de seno e cosseno de Fourier), mas aqui apresentamos as respostas obtidas usando-se os filtros para as funções de Bessel  $J_0$  e  $J_1$  com 241 pontos de Kong (2007).

Para validação do código, suas respostas são comparadas com as de componentes de campo que tem expressões analíticas na interface de dois semi-espacos. Considerando um dipolo na origem dos eixos, a posição de medida  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  e  $z = 0$ ; o semi-espaco superior sendo o ar (de resistividade infinita) e o inferior de resistividade  $\rho$ , tem-se, por exemplo, as seguintes expressões (Ward and Hohmann, 1988; Spies and Frischknecht, 1991; Kaufman et al., 2014):

$$H_r^{DMV}(r) = -\frac{m_z k^2}{4\pi r} [I_1 K_1 - I_2 K_2] \\ = \frac{m_z}{2\pi} \int_0^\infty \frac{u}{\lambda + u} \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda; \quad (1)$$

$$H_x^{DMHx}(x, y) = \frac{-m_x}{4\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{2x^2}{r^3} \right) \int_0^\infty \frac{2u}{\lambda + u} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda \\ - \frac{m_x x^2}{4\pi r^2} \int_0^\infty \frac{2u}{\lambda + u} \lambda^2 J_0(\lambda r) dk_r \\ = -\frac{m_x}{4\pi r^3} \left[ y^2 \phi + x^2 r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

$$E_x^{DEHx}(x, y) = \frac{Ids_x}{2\pi r} \left[ \frac{2\rho}{r^3} - 3 \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u} J_0(\lambda r) d\lambda \right] \\ = \frac{Ids_x \rho}{2\pi r^3} \left[ 1 + (1 + ikr) e^{-ikr} \right] e \quad (3)$$

$$H_z^{DEHx}(x, y) = \frac{Ids_x y}{2\pi r} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u} J_1(\lambda r) d\lambda \\ = \frac{-Ids_x y}{2\pi k^2 r^5} \left[ 3 - (3 + 3ikr - k^2 r^2) e^{-ikr} \right]; \quad (4)$$

em que  $I$  e  $K$  são as funções de Bessel modificadas de primeira e segunda espécie, respectivamente, apresentadas nas ordens 1 e 2, e cujos argumentos são  $ikr$ . Em  $H_x^{DMHx}$ ,  $\phi$  e  $\frac{\partial \phi}{\partial r}$  são dadas por:

$$\phi = \frac{2}{k^2 r^4} [3 + k^2 r^2 - (3 + 3ikr - k^2 r^2) e^{-ikr}] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{2}{k^2 r^5} [-2k^2 r^2 - 12 + (-ik^3 r^3 - 5k^2 r^2 + 12ikr + 12) e^{-ikr}] \quad (6)$$

Os termos  $m_z$ ,  $m_x$  e  $Ids_x$  são os momentos magnéticos e elétrico dos dipolos DMV, DMHx e DEHx, e sendo tomados iguais a um. Para uma dada frequência  $f$  tem-se  $\mathfrak{z} = i\omega\mu$  como a impedância (com  $i$  sendo a unidade imaginária),  $\omega = 2\pi f$  rad/s a frequência angular e  $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m a permeabilidade magnética do vácuo. Associado ao semi-espaco inferior tem-se o número de onda  $k = \sqrt{-\mathfrak{z}/\rho}$ , e a

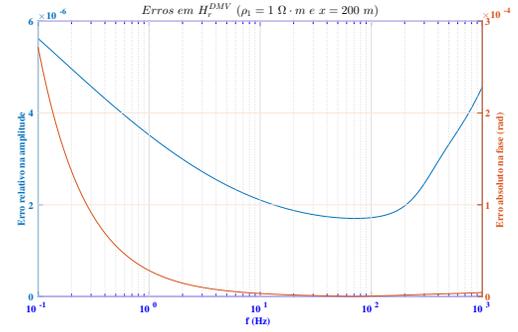


Figura 1: Erros de amplitude e fase de  $H_r$  do DMV para  $\rho = 1 \Omega \cdot m$  e  $r = x = 200$  m.

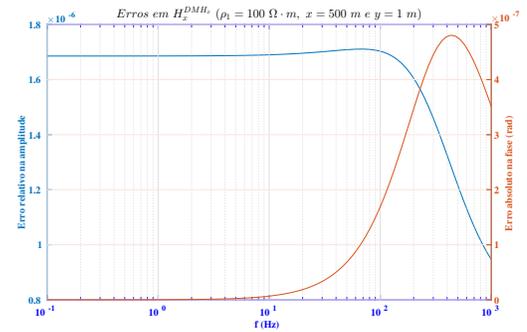


Figura 2: Erros de amplitude e fase de  $H_x$  do DMHx para  $\rho = 100 \Omega \cdot m$  e  $x = 500$  m e  $y = 1$  m.

constante de propagação, no domínio  $\lambda$  da transformada de Hankel,  $u = \sqrt{\lambda^2 - k^2}$ .

As figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam os erros relativos de amplitude, e erros absoluto de fase para cada uma das fórmulas (1), (2), (3) e (4). Em todos os casos, 100 frequências distribuídas logaritmicamente foram usadas no intervalo [0.1,1000] Hz.

Apesar de cada uma das expressões de componente de campo acima terem representação com integrais, elas não foram determinadas diretamente pelo código. Isto quer dizer que a respostas obtidas vieram na computação com a formulação geral para  $n$  camadas. Somente o DMV e DEV tem todas suas componentes mediante

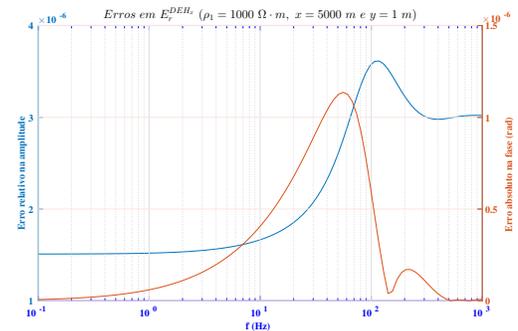


Figura 3: Erros de amplitude e fase de  $E_x$  do DEHx para  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$  e  $x = 5000$  m e  $y = 1$  m.

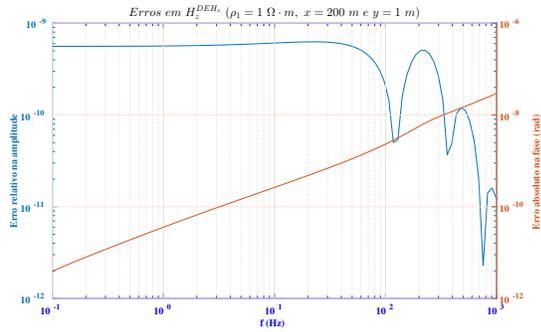


Figura 4: Erros de amplitude e fase de  $H_z$  do DEHx para  $\rho = 1 \Omega\cdot m$ ,  $x = 200 m$  e  $y = 1 m$ .

um transformada inversa de Hankel, e quanto maior a potência na variável de integração  $\lambda$ , maior a exigência computacional na obtenção de resposta acurada.

A validação de códigos 1D costuma ser sobre soluções analíticas. No entanto quando transmissores ou receptores encontram-se em posições diferentes de uma interface, dificilmente é possível uma comparação desse tipo. Como todas componentes de campo no domínio espacial são expressas por integrais impróprias, métodos numéricos de integração podem ser utilizados para obtê-las (Chave, 1983). Mais recentemente, Key (2012) apresentou na geofísica aplicação de Quadratura com Extrapolação (QWE) como um recurso mais otimizado para resolver essas integrais. A QWE faz uso de métodos de aceleração de convergência de séries, e o método adequado depende do tipo de convergência ao qual as somas parciais se apresentam (Weniger, 1989). O processo iterativo da QWE pode ter como critérios de parada as tolerâncias absoluta e relativa, e de modo tal que as respostas das integrais podem ser admitidas de excelentes precisão quando convergem usando exigentes tolerâncias e bom número de abscissas nos intervalos fechados de integração. Por conta disto, ficou consagrado na literatura que a resposta com a QWE sobre a componente de campo elétrico  $E_x$  do DEHx, quando usada no modelo 'canônico' do *mCSEM*, é a resposta mais precisa nessa situação, a ponto de servir de comparação para demais técnicas e códigos.

No *mCSEM* o modelo 'canônico' é constituído de 4 camadas contadas a partir do mar para baixo. Ele é considerado com 1000 m de lâmina d'água e resistividade  $0.3 \Omega\cdot m$ . Abaixo do leito oceânico tem mais 3 camadas, uma de 1000 m e resistividade  $1 \Omega\cdot m$ , e em seguida uma outra com espessura de 100 m representando os hidrocarbonetos (HC), e cuja resistividade adotada é de  $100 \Omega\cdot m$ . Por fim vem o substrato com  $1 \Omega\cdot m$ . A fonte, o DEHx, fica situado a 10 m do assoalho, enquanto os receptores ficam dispostos ao longo dele.

Para apresentar as respostas do *Tatu* a um modelo do *mCSEM* utilizou-se o código de Key (2012), disponibilizado em <http://software.seg.org/2012/0003>, e adotou-se como entrada os mesmos parâmetros de tolerâncias relativa ( $Tol_{rel} = 10^{-12}$ ), absoluta ( $Tol_{abs} = 10^{-30}$ ) e número de abscissas da quadratura Gauss-Legendre ( $n_q = 51$ ) afirmados no paper. Foram empregadas duas frequências, 0.25 e 0.75 Hz, sobre o

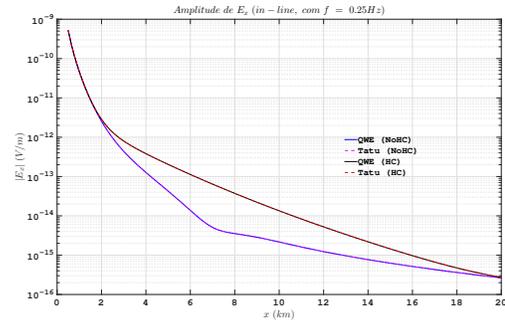


Figura 5: Amplitudes de  $E_x$  do DEHx para o modelo canônico (com HC) e sem HC com QWE e o *Tatu* com filtros de Kong de 241 pontos, sob frequência de 0.25 Hz.

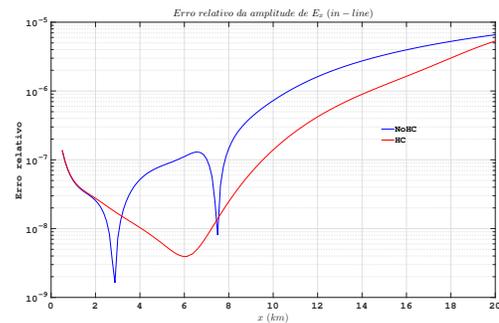


Figura 6: Erros relativos de amplitudes de  $E_x$  do DEHx para o modelo canônico (com HC) e sem HC com QWE e o *Tatu* com filtros de Kong de 241 pontos, sob frequência de 0.25 Hz.

modelo canônico (com HC), e sobre o modelo sem HC. As medidas *in-line* de  $E_x$  compreendem a extensão de  $x = 0,5 km$  a  $x = 20 km$ , e suas respostas em amplitude estão nas figuras 5 e 7. Em 6 e 8 se tem os erros relativos dessas aproximações comparando-se à QWE.

## Interfaces

Para facilitar o acesso e o uso, o *Tatu* disponibiliza três interfaces de acesso: *Tatu CLI*, *Tatu API* e *Tatu WEB*.

### *Tatu CLI (Command-Line Interface)*

Disponível em <https://github.com/valdelirio/tatu>, este é o núcleo do *Tatu*. Escrito em Fortran 2008, aceita um arquivo em formato JSON (JavaScript Object Notation) como entrada de dados e oferece duas opções de formato para o arquivo de saída de dados: JSON ou SSV (Space-Separated Values). Possui uma interface de linha de comando simples e fácil de usar, em que é possível indicar o caminho do arquivo de entrada, escolher qual formato de saída será gerado e onde salva-lo. Sua mensagem de ajuda é mostrada na figura 9.

### *Tatu API (Application Programming Interface)*

Temporariamente disponível em <https://tatusoftware.com/api/input>, oferece a possibilidade de integração do *Tatu* com outros softwares, que poderão usar como dados de entrada as saídas fornecidas pelo *Tatu*. Um exemplo de utilização é

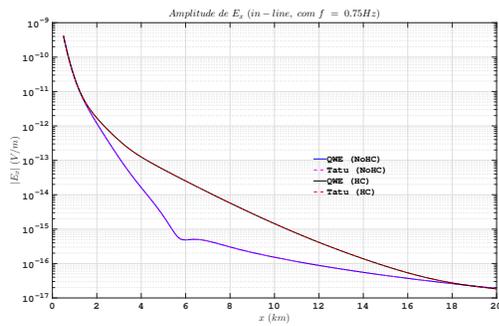


Figura 7: Amplitudes de  $E_x$  do DEHx para o modelo canônico (com HC) e sem HC com QWE e o Tatu com filtros de Kong de 241 pontos, sob frequência de 0.75 Hz.

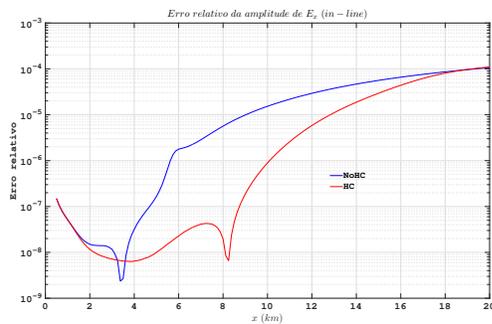


Figura 8: Erros relativos de amplitudes de  $E_x$  do DEHx para o modelo canônico (com HC) e sem HC com QWE e o Tatu com filtros de Kong de 241 pontos, sob frequência de 0.75 Hz.

```
[p@v tatu]$ ./tatu --help
Tatu (v0.1.0)
Geophysics Electromagnetic Modeling in 1D Layered Media

Usage: tatu [options]

Options (*required):
  -v, --version           Show version and exit
  -h, --help             Show this help message
  * -i, --input-file <FILEPATH> File to read the input data
  * -o, --output-file <FILEPATH> File to write the output data
  -t, --output-type <FILETYPE> Output file type: json (default) or ssv
```

Figura 9: Tatu CLI - mensagem de ajuda

mostrado na figura 10.

```
[p@v tatu]$ curl --header "Content-Type: application/json" --data
@input.json https://tatusoftware.com/api/input > output.json
% Total % Received % Xferd Average Speed Time Time Current
Dload Upload Total Spent Left Speed
100 3318k 100 3318k 100 403 210k 25 0:00:16 0:00:15 0:00:01 521k
```

Figura 10: Tatu API - exemplo de uso

### Tatu WEB (WEB Interface)

Disponível em <https://tatusoftware.com>, oferece uma interface gráfica para o uso do Tatu. É possível carregar um arquivo em formato JSON com os dados de entrada ou fornece-los diretamente na interface. Também é possível salvar os dados de entrada atualmente mostrados na interface. Além disso, disponibiliza uma interface simples e intuitiva para diversas visualizações gráficas dos resultados, que podem ser salvas em formato PNG (Portable Network Graphics), oferecendo ainda a possibilidade de download dos resultados em formato JSON ou SSV, conforme mostrado na figura 11.

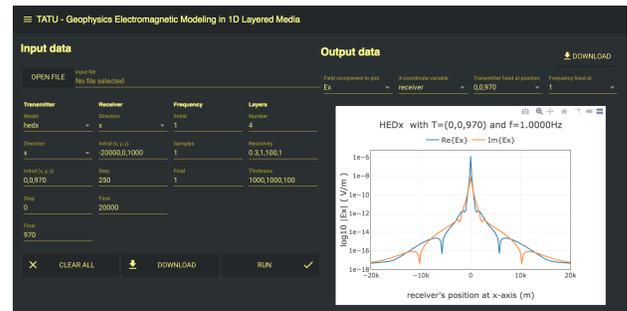


Figura 11: Tatu WEB interface

### Conclusões

Com boa precisão nas respostas de campo para várias fontes de dipolos eletromagnéticos no domínio da frequência, e interfaces de fácil acesso e uso, o software carrega atributos para utilização acadêmica e de pesquisa com as ferramentas que possui.

O código livre permite contribuição de mais pessoas e fomenta discussões acerca de formulação, de resultados e de técnicas numéricas das quais o compõem. Com isso o software pode ser melhorado e estendido para mais fontes ou métodos eletromagnéticos geofísicos.

Como tarefas para inclusão ao software estão sendo escritos códigos para o método MT e a modelagem para a bobina circular horizontal de qualquer raio e em qualquer posição relativa com interfaces e receptores. Para esta, as respostas terão confiabilidade se as rotinas de integração forem realizadas com QWE, e assim tal técnica será acrescentada também às outras fontes de dipolos.

### Referências

- Anderson, W. L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering: *Geophysics*, **44**, 1287–1305.
- Chave, A. D., 1983, Numerical integration of related hankel-transforms by quadrature and continued fraction expansion: *Geophysics*, **48**, 1671–1686.

- Cockett, R., S. Kang, L. J. Heagy, A. Pidlisecky, and D. W. Oldenburg, 2015, Simpeg: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications: *Computers & Geosciences*, **85**, 142 – 154.
- Ghosh, D. P., 1971, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements: *Geophysical Prospecting*, **19**, 192–217.
- Guptasarma, D., and B. Singh, 1997, New digital linear filters for hankel  $j_0$  and  $j_1$  transforms: *Geophysical Prospecting*, **45**, 745–762.
- Kaufman, A. A., D. Alekseev, and M. Oristaglio, 2014, Principles of electromagnetic methods in surface geophysics (methods in geochemistry and geophysics): Elsevier.
- Key, K., 2012, Is the fast hankel transform faster than quadrature?: *Geophysics*, **77**, F21–F30. (n/a).
- Kong, F. N., 2007, Hankel transform filters for dipole antenna radiation in a conductive medium: *Geophysical Prospecting*, **55**, 83–89.
- Kruglyakov, M., A. Geraskin, and A. Kuvshinov, 2016, Novel accurate and scalable 3-d mt forward solver based on a contracting integral equation method: *Comput. Geosci.*, **96**, 208–217.
- Rücker, C., T. Günther, and F. M. Wagner, 2017, pygimli: An open-source library for modelling and inversion in geophysics: *Computers & Geosciences*, **109**, 106–123.
- Spies, B. R., and F. C. Frischknecht, 1991, 5, *in* *Electromagnetic Sounding: Society of Exploration Geophysicists*, 285–425.
- Ward, S. H., and G. W. Hohmann, 1988, 4, *in* *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications: Society of Exploration Geophysicists*, 130–311.
- Warren, C., A. Giannopoulos, and I. Giannakis, 2016, gprmax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar: *Computer Physics Communications*, **209**, 163 – 170.
- Weniger, E. J., 1989, Nonlinear sequence transformations for the acceleration of convergence and summation of divergent series: *Computer Physics Reports*, **10**, 189–371.
- Werthmüller, D., 2017, An open-source full 3d electromagnetic modeler for 1d vti media in python: *empymod: Geophysics*, **82**, WB9–WB19.