

Identificação de Trajetórias com Uso das Plataformas MoHid e GRIPP para Aplicações Ambientais

Yuri Toledo de Barros¹
LEMEC-IPRJ, Nova Friburgo, RJ
Jader Lugon Jr²
IFF, Macaé, RJ
Francine A. Kalas³
Cetema-IPRJ, Nova Friburgo, RJ
Pedro P. G. Watts Rodrigues⁴
Cetema-IPRJ, Nova Friburgo, RJ
Antônio da Silva Neto⁵
LEMA-IPRJ, Nova Friburgo, RJ

Resumo. Este trabalho é fundamentado no estudo da identificação de trajetórias de objetos a deriva no meio marinho, com uso de uma abordagem lagrangiana. O estudo foi baseado no acidente com contêineres, ocorrido em 2017 nas proximidades da Ilha Bela, bacia de Santos, SP. A modelagem da hidrodinâmica local foi realizada na plataforma MoHid (Modelagem Hidrodinâmica), desenvolvida por pesquisadores do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa. A trajetória dos objetos, a partir da região de busca apontada pelo problema direto, foi calculada na plataforma *RStudio*, com uso do método de otimização *Generalized Simulated Annealing* (GenSA). O trabalho teve por finalidade verificar a influência das forças ambientais na trajetória dos objetos e a eficácia da integração das plataformas MoHid e *RStudio*, empregando a ferramenta computacional *GeneRal Inverse Problem Platform* (GRIPP), desenvolvida por pesquisadores do Instituto Federal Fluminense e do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, na resolução do problema inverso. Os resultados mostraram-se coerentes e a integração das plataformas satisfatória para aplicações ambientais.

Palavras-chave. Identificação de trajetórias, MoHid, GRIPP, Problemas inversos, Otimização, Modelo lagrangiano

1 Introdução

A modelagem de contaminantes e traçadores no ambiente aquático com uso de abordagem lagrangiana tem sido largamente utilizada nos últimos anos ([3], [4], [10]). Na ref. [1] são apresentados 32 tipos de modelos para determinação de trajetória com abordagem lagrangiana visando diferentes aplicações práticas e acadêmicas, dentre os quais se encontra a Plataforma de Modelagem Hidrodinâmica (MoHid).

¹yuribarros95@gmail.com

²jljunior@iff.edu.br

³frankalas@iprj.uerj.br

⁴pedropaulowatts@gmail.com

⁵ajsneto@iprj.uerj.br

O MoHid é uma ferramenta de modelagem integrada capaz de simular processos físicos e biogeoquímicos na coluna d'água e nos sedimentos, além de permitir o acoplamento entre diferentes domínios ambientais. Possui filosofia de programação orientada a objetos e mais de 40 módulos utilizados de acordo com a aplicação desejada.

Neste trabalho, utilizou-se o módulo lagrangiano do MoHid na solução do problema direto (PD), onde se obteve uma região aproximada para busca de objetos a deriva na costa de São Paulo. Com a integração do MoHid com o *RStudio*, por meio da ferramenta computacional GRIPP, o problema inverso (PI) foi solucionado aplicando-se o método estocástico *Generalized Simulated Annealing* (GenSA) [12] para a obtenção final das trajetórias.

2 Formulação do Problema de Determinação de Trajetórias

No dia 11 de agosto de 2017, ocorreu um acidente no Porto de Santos, onde 45 contêineres do navio mercante “Log in Pantanal” caíram no mar [9]. Com a queda, alguns contêineres se abriram e objetos foram liberados. Dias depois, alguns objetos começam a ser encontrados pela população e o Instituto Argonauta para Conservação Costeira e Marinha (<https://institutoargonauta.org/>) foi acionado, registrando suas localizações em várias praias do litoral norte paulista (Figura 1).

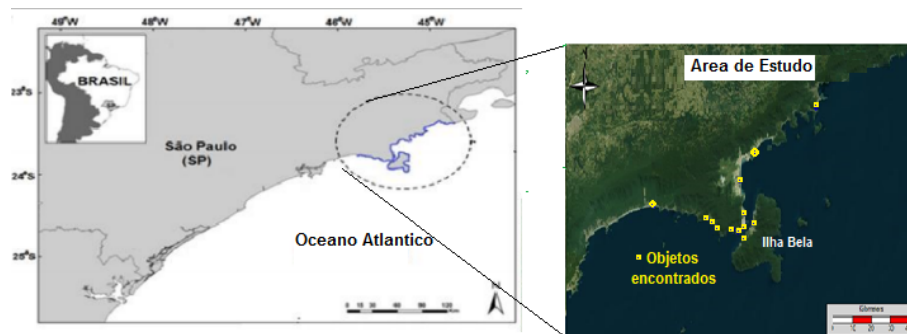


Figura 1: Localização dos objetos no litoral norte de São Paulo (Imagens de Satélite - Google Earth)

2.1 Plataforma de Modelagem Hidrodinâmica - MoHid

O MoHid (<http://www.mohid.com/>) é um sistema de modelagem de água tridimensional com filosofia de programação orientada a objetos, que permite uma integração entre processos (físicos e biogeoquímicos), escalas (modelos encaixados) e sistemas (estuários e bacias hidrográficas) [8].

O módulo hidrodinâmico simula o padrão de circulação e campos de velocidade, a partir dos cálculos de nível, velocidade e fluxo da água. Neste módulo as equações de Navier-Stokes são resolvidas por meio da metodologia de volumes finitos, considerando o equilíbrio hidrostático e as aproximações de Boussinesq e Reynolds. A implementação do modelo hidrodinâmico, para o problema considerado neste trabalho, fez uso da técnica *downscaling* de modelos encaixados (Figura 2), em que as condições de fronteira em um determinado nível são obtidas dos cálculos resultantes do nível imediatamente acima, partindo de um modelo geral (nível 1), como descrito em [6].

A solução hidrodinâmica fornece o campo de velocidades utilizado no módulo lagrangiano para o cálculo da trajetória dos objetos. O módulo lagrangiano simula a trajetória de partículas e fluidos com uso do conceito de traçador. Neste módulo, as coordenadas espaciais (x_i) são calculadas com base na velocidade média do objeto (\mathbf{u}) (Eq.(1)), resolvida com uso do método de diferenças finitas com avanço temporal (Eq.(2)).

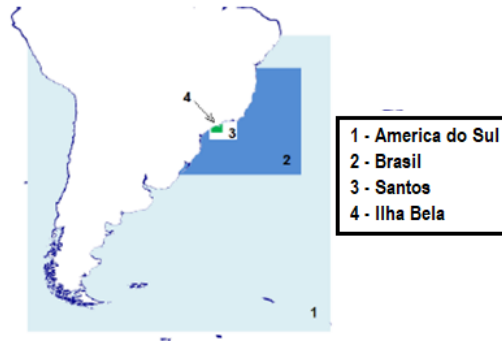


Figura 2: Modelos encaixados usados na estratégia de *downscaling* para a simulação hidrodinâmica

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = u_i(t) \tag{1}$$

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^t + u_i^t \Delta t \tag{2}$$

3 Formulação do Problema Inverso

O problema inverso para a identificação de trajetória foi formulado como um problema de otimização de dimensão finita utilizando-se uma região de busca que delimita o domínio de pontos analisados. Um ponto gerado aleatoriamente nesse domínio é utilizado por um método de otimização estocástico. O resultado é uma trajetória e um ponto final, o qual é comparado, a partir de uma função custo, com o alvo (obtido no PD).

A solução do PI é o vetor C_O^* que minimiza o funcional dado pela Eq.(3). Como otimizador estocástico é utilizado o método GenSA [12], incorporado na plataforma *RStudio*, o qual viabiliza a solução apresentada na Eq.(4).

$$S(C_O) = \sum_{i=1}^N ((C_{f_c}(C_O))_i - (C_{f_m})_i)^2 \tag{3}$$

$$S(C_O^*) = \min_{C_O} S(C_O) \tag{4}$$

onde $C_{f_c}(C_O)$ é o vetor com as coordenadas finais dos valores calculados; C_{f_m} é o vetor com as coordenadas obtidas em campo ou mensuradas, C_O é o vetor incógnita com as coordenadas iniciais, N é o vetor de medidas (neste trabalho: N é igual a 2, latitude e longitude), C_O^* é vetor solução do PI.

O método GenSA consiste numa generalização das técnicas de otimização *Simulated Annealing* (SA) [2] e *Fast Simulated Annealing* (FSA) [11], e utiliza uma distribuição probabilística de Cauchy-Lorentz (Eq.(5)) para gerar um salto de uma distância Δx para um tempo artificial t de uma variação $x(t)$ que está em uma temperatura artificial $T_{q_v}(t)$. Esse salto será aceito quando, em termos da função objetivo, for em descida; caso for em subida, a análise de aceitação será realizada por meio de uma generalização do algoritmo de Metrópolis, onde q_a é o parâmetro de aceitação (Eq.(6)).

$$\delta_{q_v}(\Delta x(t)) = \frac{[T_{q_v}(t)]^{\frac{D}{3-q_v}}}{[1 + (q_v - 1) \frac{\Delta x(t^2)}{[T_{q_v}(t)]^{\frac{2}{3-q_v}}}]^{\frac{1}{(q_v-1)} + \frac{D-1}{2}}} \tag{5}$$

$$p_{q_a} = \min(1, [1 - (1 - q_a)\beta\Delta E]^{-\frac{1}{1-q_a}}) \quad (6)$$

Como o método GSA é uma generalização dos métodos SA e FSA, as possibilidades para a formação desse método de otimização são apresentadas na Tabela 1. Os valores padrões de $q_v = 2,62$ e $q_a = -5$ são utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Formação dos métodos de otimização com alterações dos parâmetros de forma (q_v) e de aceitação de probabilidade (q_a)

Condição	Resultado
Se $q_v=1$ e $q_a=1$	SA
Se $q_v=2$ e $q_a=1$	FSA
Para $q_v > 2$	Resfriamento mais rápido que os dois métodos mencionados

3.1 Plataforma de Resolução de Problemas Inversos - GRIPP

A ferramenta computacional GRIPP (*GeneRal Inverse Problem Platform*) [7] (<https://cran.r-project.org/web/packages/gripp/index.html>) foi desenvolvida no intuito de facilitar o gerenciamento das etapas de resolução de problemas inversos [5]. Neste trabalho, ela atua na comunicação entre o MoHid e o *RStudio* para a resolução do problema inverso de identificação de trajetórias. Sua representação esquemática simplificada é apresentada na Figura 3. Além da resolução de problemas inversos, o GRIPP permite ainda a obtenção da matriz de sensibilidade, de dados experimentais sintéticos e do cálculo do valor da função custo (função objetivo).

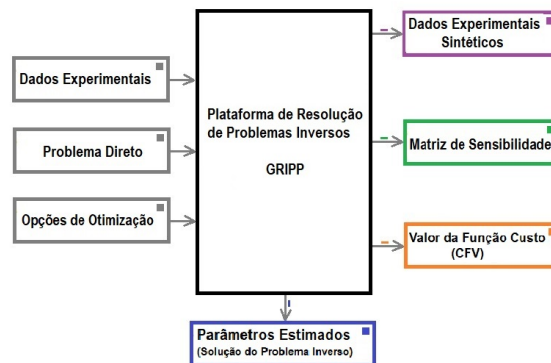


Figura 3: Representação Esquemática Simplificada da Plataforma de Resolução de Problemas Inversos (GRIPP)

4 Resultados e Discussão

4.1 Identificação das Trajetórias no Problema Direto

No intuito de verificar a influência das forças ambientais em função das datas de simulação, foram selecionadas duas regiões de busca para a modelagem lagrangiana das trajetórias dos objetos a deriva: uma nas proximidades da Ilha Bela, São Paulo, e outra nas proximidades do local do acidente (Figura 4).

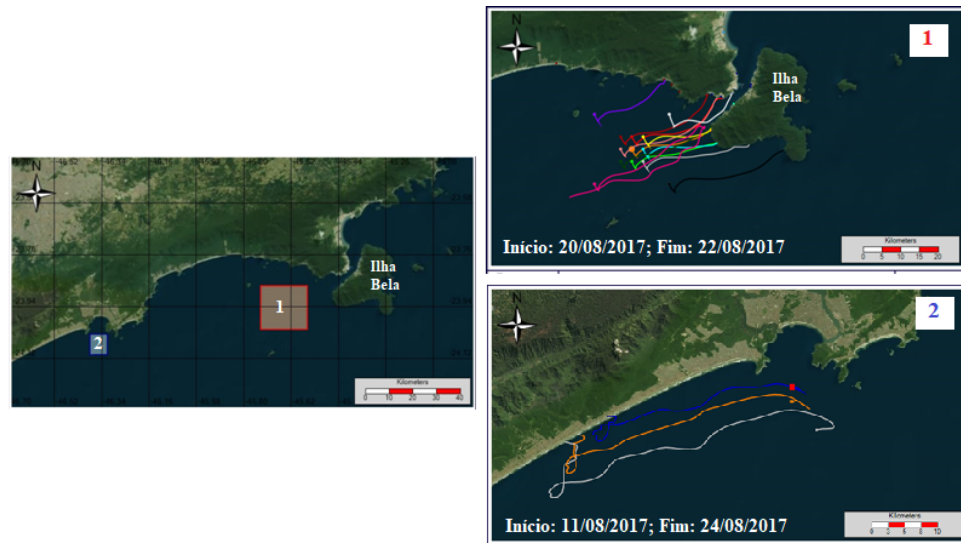


Figura 4: Simulação lagrangiana das trajetórias de objetos (1 - Ilha Bela, 2 - Local do acidente) (Imagens de Satélite - *Google Earth*)

A modelagem lagrangiana nas proximidades da Ilha Bela foi realizada entre os dias 20/08/2017 e 24/08/2017. O período selecionado para a simulação corresponde aos registros de objetos encontrados pelo Instituto Argonauta nas praias do litoral norte de São Paulo. No entanto, neste período observou-se que em muitos pontos, objetos voltam à deriva para o oceano, e optou-se por diminuir a janela de simulação para o dia 22/08/2017, excluindo-se os pontos que chegam à linha de costa.

A modelagem dos objetos nas proximidades do Porto de Santos foi realizada no período de 11 (dia do acidente) a 24/08/2017, também desconsiderando-se os objetos que chegam à linha de costa. Nesta situação, as trajetórias dos objetos possuem deslocamento para o sul. É possível que tal fato esteja associado ao comportamento das correntes marinhas, as quais estariam afetando a simulação hidrodinâmica. Vale ressaltar que não se sabe a localização exata da origem dos objetos oriundos do acidente, e que no dia do acidente alguns contêineres afundaram próximo ao Porto podendo ter sofrido avarias ao longo do deslocamento vertical, dificultando o conhecimento da data e hora exatas de liberação desses objetos.

4.2 Identificação de Trajetórias pelo Problema Inverso

Partindo do envelope de soluções encontradas, conforme representado na Figura 4, foi realizada a análise do PI empregando a ferramenta computacional GRIPP. As coordenadas obtidas no PD para região de busca, alvo e ponto inicial central foram informadas e a técnica de otimização realizou testes consecutivos até a obtenção da trajetória cujo ponto final mais se aproximou do alvo. Os resultados obtidos para a modelagem em um ponto localizado nas proximidades da Ilha Bela mostram-se bastante satisfatórios e as trajetórias obtidas pelos PD e PI se sobrepuseram.

A avaliação do tempo de execução da técnica de otimização foi realizada considerando dois pontos na região de busca: um ponto central PC e um ponto aleatório P1. A Tabela 2 lista os valores dos parâmetros utilizados na obtenção das trajetórias pelo PI considerando ambos os pontos analisados. A Tabela 3 apresenta os pontos finais obtidos pelo PI, a função custo e o número de ciclos para diferentes tempos de execução do método de otimização estocástico GenSA.

Uma análise das trajetórias obtidas no PI com diferentes tempos de execução é apresentado na Figura 5. Para ambos os casos estudados, a aplicação da técnica do PI é considerada satisfatória. A análise do PI no ponto PC retrata que com 100s de execução do método, em um computador Intel Core i3-4005U com processador de 1.70 GHz e 4 GB RAM, o ponto final já é encontrado e no ponto P1 observa-se que não houve diferença entre a obtenção do resultado nos tempos 7200s e 10800s, ou seja, mesmo uma diferença de 9 ciclos do método GenSA não foram suficientes para encontrar um ponto melhor do que o anterior (Tabela 3).

Tabela 2: Parâmetros utilizados pelo PI

Parâmetro	Longitude	Latitude
Região de busca (Máximo / Mínimo)	-45,5586° / - 45,7358°	-23,8668° / - 23,0178°
PC (Ponto inicial / Alvo)	-45,6472° / - 45,4602°	-23,9423° / - 23,8994°
P1 (Ponto inicial / Alvo)	-45,6472° / - 45,4602°	-23,9724° / - 23,9319°

Tabela 3: Resultados quantitativos do PI

Parâmetro	Tempo de Execução ^a	Longitude / Latitude	Função Custo ^b	Ciclos ^c
Ponto Final (PC)	100s, 360s, 700s e 1000s	-45,4575° / - 23,9200°	0,000432(^o) ²	02
Ponto Final (P1)	3600s	-45,4363° / - 23,9282°	0,000609(^o) ²	23
Ponto Final (P1)	7200s	-45,4523° / - 23,9200°	0,000212(^o) ²	43
Ponto Final (P1)	10800s	-45,4523° / - 23,9200°	0,000212(^o) ²	52

a - Processador Intel Core i3-4005U 1.70 GHz e 4.0 GB RAM; b - vide Eq.(3); c - método GenSA;

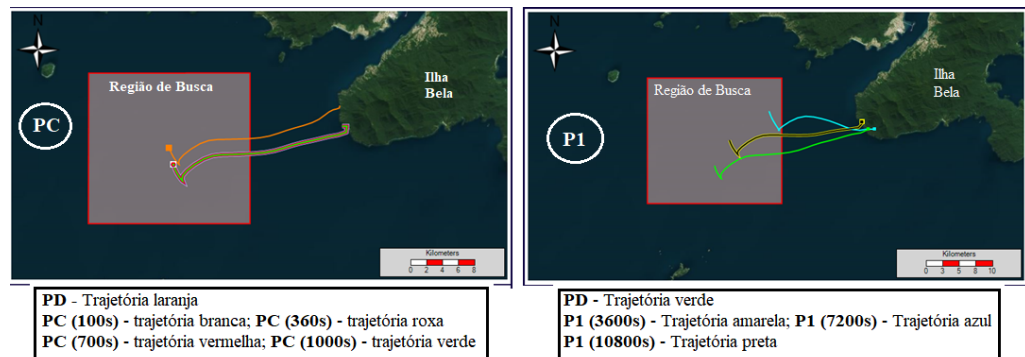


Figura 5: Análise do tempo de execução do GenSA. (Imagens de Satélite - Google Earth)

5 Conclusões

Os resultados obtidos na modelagem lagrangiana do problema direto reforçam a influência das forças ambientais na trajetórias de objetos a deriva no meio marinho. A integração entre as plataformas MoHid e RStudio foi realizada com sucesso pela ferramenta computacional GRIPP, tomando-se como resultados a aproximação entre as trajetórias dos PD e PI. Os resultados obtidos para o PI relativo ao tempo de execução são considerados promissores. Sugere-se para trabalhos futuros, a simulação de trajetórias próximas à linha de costa e em regiões de vórtex.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (código de financiamento 001); do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

Referências

- [1] Dagestad, K. F.; Rohrs, J.; Breivik, Ø.; Ådlandsvik, B. OpenDrift v1.0: A Generic Framework for Trajectory Modelling. *Geoscientific Model Development Discussions*, volume 11(4):1405-1420, 2017. DOI: 10.5194/gmd-2017-205
- [2] Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr.; C.D., Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, volume 220(4598):671-680, 1987. DOI:10.1016/B978-0-08-051581-6.50059-3
- [3] Lebreton, L.C.M., Greer, S.D., Borrero, J.C. Numerical Modelling of Floating Debris in the World's Oceans. *Marine Pollution Bulletin*, volume 64(3):653-661, 2012. DOI:10.1016/j.marpolbul.2011.10.027
- [4] Lugon Jr, J.; Juliano, M.; Jevaux, J.; Gallo Neto, H.; Kalas, F.A.; Rodrigues, P.P.G.W e Silva Neto, A.J. Simulação Computacional da Dispersão de Objetos Sólidos Lançados em Um Acidente na Região Costeira do Estado de São Paulo. *Proc. Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, volume 6, 2018.
- [5] Lugon Jr, J.; Bevilacqua, L.; Silva Neto, A.J. Direct and Inverse Problems for a Fourth Order Anomalous Diffusion Model. *Defect and Difusion Forum*, volume 399:55-64, 2019. DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF:399.55
- [6] Lugon Jr, J.; Kalas, F.A Rodrigues, P.P.G.W. Juliano, M. Neto, H.G.; Jevaux, J.; Silva Neto, A.J. Application of MOHID Platform to Simulate the Drift of Cetaceans Stranded in Coastal Regions. A Case Study in the Paulista Coastline. *Revista Cereus*, volume 11(3):178-189, 2019. DOI:10.18605/2175-7275.
- [7] Lugon Jr, J. e Silva Neto, A.J. Package GRIPP. GeneRal Inverse Problem Platform. Version 0.2.20. 2019.
- [8] MARETEC, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. *MOHID: Descrição do MOHID, 1a edição*. Essentia Editora, Rio de Janeiro, 2012. ISBN: 978-85-99968-20-8.
- [9] Richmond, K. Acidente com Navio no Porto de Santos Derruba 45 Contêineres no Mar. Disponível em <https://www1.folha.uol.com.br/acidente-com-navio-no-porto-de-santos-derruba-45-containers-no-mar.shtml>. Acessado em 28 de maio de 2019.
- [10] Rodrigues, P. H. S., Maiorino, J. R. Case Study: Oil Spill using MoHid Software in São Sebastião, São Paulo. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, volume 10(4):247-261, 2016. DOI:10.5419/bjpg2016-0020
- [11] Szu, H. e Hartley, R. Fast Simulated Annealing. *Physics Letters A*, volume 122(3-4):157-162, 1987. DOI:10.1016/0375-9601(87)90796-1
- [12] Tsallis, C. e Stariolo, D.A. Generalized Simulated Annealing. *Physica A*, volume 233(1-2):395-406, 1996. DOI:10.1016/S0378-4371(96)00271-3