

Escoamento bidimensional de óleo



. Indução covariante em culturas de hortaliças

M A R S
. semper in mente

índice

ARTIGOS ORIGINAIS

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL DE ÓLEO EM UM RESERVATÓRIO
EMPREGANDO A BIBLIOTECA NUMÉRICA PETSC

Fábio Bertolino Vasconcellos, Paulo de Tarço Honório Jr., Grazione de Souza,
Hélio Pedro A. Souto

1-14

INDUÇÃO COVARIANTE EM MUDAS DE ALFACE COM EM•1®
Um Prospecto para Agricultura Familiar

Tatiana da Silva Aquino, Nilo Serpa

15-28

A HUMAN-DIRECTED BOLIDE IMPACT-DUG MARS FUNNEL CITY

Richard B. Cathcart, Nilo Serpa

29-41



Simulação do Escoamento Bidimensional de Óleo em um Reservatório Empregando a Biblioteca Numérica PETSc

Fábio Bertolino Vasconcellos

Pós-graduação em Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Paulo de Tarço Honório Jr.

Unidade de Desenvolvimento Tecnológico Singrar, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Grazione de Souza

Departamento de Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Helio Pedro Amaral Souto

Departamento de Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Abstract: We used the numerical library Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation (PETSc) to obtain the solution of the system of algebraic equations arising from the discretization of the governing equation of a two-dimensional oil flow in a porous medium, where both are slightly compressible. Typically, this step is responsible for the highest computational cost compared to the others. Thus, in addition to the search for an accurate solution, we also aimed to achieve better computational performance. We determined the numerical solution in terms of the pressures in the reservoir and the producing well (via a well-reservoir coupling technique), using a Picard method linearization and a time-implicit formulation. We obtained the pressure variations as a function of time by using different computational meshes, modifying the physical properties, and using the methods for solving algebraic systems available at PETSc. The solutions presented the expected physical behavior, and we concluded that this numerical library was successful for the accomplished simulations.

Palavras-chave: algebraic systems of equations, numerical reservoir simulation, PETSc, wellbore pressure.

Corresponding author: Helio Pedro Amaral Souto, helio@iprj.uerj.br

Received: 15 October 2024; Accepted: 04 November 2024; Published: 29 December 2024.

1 Introdução

Com o surgimento dos computadores, após a segunda guerra mundial, uma série de problemas de engenharia puderam ser estudados a partir das soluções obtidas numericamente com a utilização de recursos computacionais. Nesta conjuntura, os avanços alcançados, em termos de capacidade de memória e de processamento, têm permitido que problemas cada vez mais realísticos sejam considerados como, por exemplo, os da dinâmica da tensão-deformação em equipamentos, da transferência de

calor, das reações químicas, da dinâmica dos fluidos computacional e da simulação de escoamentos em subsuperfície. Nessa última categoria, é possível se destacar a simulação de reservatórios de petróleo, imprescindível na proposição de um planejamento que resulte na produção otimizada, para que se aumente o fator de recuperação de hidrocarbonetos. Este trabalho é dedicado à simulação de reservatórios empregando a biblioteca Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation (PETSc) [3], tendo em vista a necessidade de se resolver sistemas de equações algébricas de grande porte, presentes nos casos de interesse.

1.1 Resolução de sistemas de equações algébricas

Na simulação de reservatórios de petróleo na escala de campo [27, 39, 40, 42], frequentemente necessita-se resolver sistemas de equações algébricas não-lineares com mais de 1 milhão de incógnitas quando de problemas tridimensionais, mesmo no caso do escoamento monofásico isotérmico monocomponente. Quando se trata de simulações envolvendo a presença de poços horizontais, por exemplo, tipicamente é necessária uma discretização com malhas refinadas para capturar, adequadamente, o escoamento sujeito ao aparecimento dos diferentes efeitos de fronteira [1, 43]. Em geral, na simulação de escoamentos monofásicos em reservatórios de petróleo, mais de 70% do esforço computacional é despendido no processo de resolução desses sistemas.

A questão do tempo de execução é crucial na simulação de reservatórios, levando em consideração que, para casos reais, as simulações visam a prever a produção ao longo de décadas e podem, em certas situações, durar semanas, mesmo em máquinas destinadas à computação de alto desempenho [36, 37]. Dessa forma, é essencial que a indústria de óleo e gás busque empregar métodos numéricos eficientes para a resolução de sistemas de equações algébricas, além da implementação de técnicas de paralelização, de modo que seja possível testar, mais rapidamente, diferentes cenários de produção, a fim de se definir o melhor plano de operação.

A fim de se resolver de forma computacionalmente eficiente esses sistemas de equações, diferentes grupos têm, ao longo de décadas, atuado na elaboração de métodos e na construção de códigos numéricos que conduziram à criação de bibliotecas voltadas para a álgebra linear [12, 16]. Elas são constituídas por códigos eficientes e flexíveis destinados à resolução de sistemas do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{A} é a matriz dos coeficientes, \mathbf{x} é o vetor incógnita e \mathbf{b} um vetor cujos elementos são conhecidos. Portanto, necessita-se conhecer corretamente de que forma essas informações devem ser repassadas para tais bibliotecas numéricas. Outro ponto importante, no que diz respeito à eficiência computacional, é o hardware disponível para a realização das simulações [19].

1.2 A biblioteca PETSc na simulação numérica

A biblioteca Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation fornece um conjunto de estrutura de dados e rotinas para aplicações em larga escala, com recursos para a execução em paralelo ou em série, favorecendo a implementação de códigos destinados à computação científica, os quais podem ser escritos, por exemplo, nas linguagens C, C++, Fortran ou Python. Ela contém a biblioteca Toolkit for Advanced Optimization (TAO) voltada para a resolução de equações diferenciais parciais e problemas que demandam um elevado desempenho computacional. Por padrão, todos os programas são executados utilizando a Message Passing Interface (MPI) [3]. A sua estrutura computacional permite uma integração com a linguagem escolhida pelo usuário, possibilitando

o aproveitamento de um programa computacional pré-existente, flexibilizando a reutilização de códigos numéricos.

Na sequência, foca-se na sua utilização nas engenharias e na busca pela melhoria do desempenho computacional, uma breve revisão bibliográfica das aplicações da biblioteca PETSc. Destaca-se que ela possui, conforme relatado em [29], métodos numéricos específicos para a resolução de equações diferenciais e algébricas não-lineares, dependentes do tempo, e para a otimização numérica.

Croucher et al. (2020) [12], por exemplo, utilizaram o simulador Waiwera que foi projetado para resolver problemas envolvendo sistemas geotérmicos. Esse código, segundo os autores, foi paralelizado e fez uso intensivo da PETSc [25, 29, 35]. O referido simulador foi escrito em linguagem Fortran 2003, orientada a objetos, e é do tipo open-source. Os autores relataram que os resultados com ele obtidos apresentaram consistência com aqueles alcançados com outros simuladores reconhecidos na literatura, tais como o TOUGH2 (Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat), além de possuir uma boa escalabilidade quando do uso da versão paralelizada.

Segundo Wenqing et al. (2015) [35], as tecnologias destinadas à estocagem de energia térmica são de interesse atual e buscam melhorar a integração da geração de energia renovável e a eficiência energética. As simulações numéricas do armazenamento termoquímico de calor são desafiadoras e computacionalmente custosas, devido à complexidade em se descrever os processos acoplados e não lineares característicos desses sistemas. Tais dificuldades aumentam quando são consideradas geometrias complexas. Para se viabilizar simulações computacionalmente eficientes, um código utilizando o método dos elementos finitos foi paralelizado, usando as rotinas da biblioteca PETSc, como parte da estrutura do código aberto OpenGeoSys. De acordo com os autores, na simulação da descarga de um armazenador de calor, o tempo de execução foi reduzido significativamente.

As simulações abrangendo a geodinâmica são também caracterizadas pela existência de não linearidades e efeitos tridimensionais, impondo desafios à ciência da computação. Nesse caso específico, Katz et al. (2007) [25] discutiram como o uso da PETSc pode facilitar o desenvolvimento dos simuladores. Como ilustração, os autores realizaram simulações do escoamento estacionário de um fluido não-newtoniano; de ondas magmáticas no manto terrestre; e bifásicos, em meios com de alta porosidade, sob cisalhamento simples. Eles destacaram dois dos recursos adicionais da PETSc: o armazenamento estruturado de parâmetros e a saída autodocumentada.

Cuomo et al. (2015) [13] apresentaram uma estrutura, utilizando a computação paralela, direcionada à simulação do fluxo óptico usando um cluster de Graphics Processing Unit (GPUs) e a PETSc. Para tanto, na modelagem foi considerada uma equação diferencial parcial (EDP) parabólica e foi implementado um algoritmo paralelizado, adequado para ambientes de computação heterogêneos (multiprocessado, uma ou várias GPUs).

Como resultado, o software proposto possibilitou um ganho de cerca de 95% em relação à implementação sequencial.

Por sua vez, a suíte TOUGH, composta por simuladores direcionados ao escoamento multifásico não isotérmico e ao transporte de calor em meios porosos, vem sendo atualizada, por vários desenvolvedores, ao longo dos anos. Em função da crescente complexidade dos processos, bem como da extensão dos domínios de resolução, surgiu a necessidade da realização de melhorias no que diz respeito à eficiência computacional. Jung et al. (2017) [23] relataram que os métodos de resolução de sistemas lineares, paralelizados, da PETSc foram adicionados nas versões TOUGH2 e TOUGH2-MP. Como conclusão, eles constataram que os métodos da PETSc apresentaram, em geral, um melhor desempenho do que os do Aztec paralelizado (original) e do solver linear interno da TOUGH3.

Um outro problema desafiador é a simulação numérica da eletrofisiologia cardíaca. O sistema Bidomain, um modelo matemático da atividade bioelétrica cardíaca, constituído por uma equação diferencial parcial elíptica e uma parabólica do tipo reação-difusão, descreve a propagação da excitação elétrica no tecido cardíaco. As duas equações encontram-se acopladas a um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs), que simulam as correntes iônicas através da membrana cardíaca. Na busca pela redução do custo computacional, o desenvolvimento de pré-condicionadores eficientes e escalonáveis para a resolução dos sistemas lineares, provenientes da discretização dessas equações, é fundamental. Centofanti e Scacchi (2024) [10] estudaram o mesmo problema utilizando a PETSc e arquiteturas modernas de computação de alto desempenho, usando várias Central Processing Units (CPUs) e GPUs, e verificaram que houve melhorias no desempenho computacional. Ainda segundo os autores, a portabilidade da PETSc engloba a utilização de GPUs e enfatiza a flexibilidade e a extensibilidade, permitindo que os desenvolvedores usem o seu modelo de programação predileto.

De fato, há uma série de problemas de interesse na Física, na Matemática, na Computação e na Engenharia onde a biblioteca PETSc tem sido utilizada. Em se tratando do trabalho desenvolvido por Kempe et al. (2015) [26], foi abordado o problema do escoamento no interior de uma cavidade, cuja tampa superior é móvel. Foi feita uma comparação do desempenho computacional quando da obtenção da solução das equações de Navier-Stokes, utilizando o método dos volumes finitos, considerando os fluidos como sendo incompressíveis e empregando um método de projeção. O código numérico foi executado em CPUs e GPUs, juntamente com a PETSc.

Por outro lado, Kang et al. (2023) [24] utilizaram os métodos de Runge-Kutta e a biblioteca PETSc para resolver um problema de interação fluido-fluido. Eles usaram as equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis e realizaram uma série de experimentos numéricos em larga escala.

Prosseguindo, Bonart et al. (2017) [6] trabalharam no acoplamento entre as bibliotecas numéricas da PETSc e ADOL-C. Trata-se de um pacote que facilita a avaliação de derivadas primeiras e superiores de funções vetoriais que são definidas em códigos escritos nas linguagens C ou C++. As suas rotinas podem ser chamadas via programas que usem linguagens de programação vinculadas à linguagem C. Os autores empregaram a computação paralela para estudar um modelo de coluna de destilação em condições de não equilíbrio.

Um novo esquema, massivamente paralelo, foi desenvolvido para estudar escoamentos em superfícies livres usando o método livre de malha Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH), para simulações envolvendo o uso de mais de 100 milhões de partículas [20]. Com esse propósito, é requerido que seja resolvido um sistema no qual a matriz esparsa, associada à equação de Poisson escrita em termos da pressão, possui uma ordem elevada. Essa não é uma tarefa trivial para problemas que usam tal quantidade de partículas, que se movem em evolução contínua. A biblioteca PETSc e o pré-condicionador HYPRE BoomerAMG foram utilizados a fim de se garantir uma rápida convergência.

Já Boffi et al. (2024) [5] tiveram como objetivo desenvolver um solver paralelizado direcionado para problemas de interação fluido-estrutura. Eles empregaram multiplicadores de Lagrange e o método dos elementos finitos para a discretização espacial. Por outro lado, é utilizado um esquema de primeira ordem, do tipo diferenças finitas, na aproximação temporal. O sistema linear resultante do processo de discretização é resolvido, a cada passo de tempo, usando a versão paralelizada do método Generalized Minimum Residual (GMRES) e pré-condicionadores disponíveis na biblioteca PETSc.

No escopo dos aplicativos de geração de imagens, Carracciolo et al. (2006) [9] analisaram o esforço computacional requerido para o desenvolvimento de um ambiente de software distribuído. Tal iniciativa teve por finalidade possibilitar o uso de computadores de alto desempenho e sistemas de armazenamento, para a redução do ruído das sequências ecocardiográficas tridimensionais, assim como a utilização da PETSc.

Em contrapartida, Hovland e McInnes (2001) [21] utilizaram a biblioteca PETSc em aplicações aeroespaciais envolvendo o uso da paralelização e um método de Newton-Krylov-Schwarz. Eles estudaram o escoamento ao redor de um aerofólio do tipo M6 utilizando as equações tridimensionais de Euler e uma formulação totalmente implícita no tempo.

No caso das equações incompressíveis de Navier-Stokes, Clarke e Krishnamoorthy (2019) [11] relataram que há um custo computacional expressivo quando da resolução numérica de escoamentos multifásicos. Ele é decorrente, em geral, do emprego de uma formulação implícita quando do cálculo da correção de pressão. Os autores utilizaram o método iterativo dos Gradientes Biconjugados Estabilizado e o pré-condicionador de Jacobi, ambos da biblioteca PETSc.

Por fim, destaca-se que em grande parte dos simuladores contemporâneos, aplicados na engenharia, é necessário que se resolva sistemas de equações algébricas. Assim sendo, Jolivet et al. (2021) [22] discutem como as bibliotecas PETSc e High Performance Domain Decomposition Methods (HPDDM) podem ser usadas, em conjunto, de modo a propiciar aos usuários a utilização dos métodos avançados do subespaço de Krylov (para a resolução de sistemas de equações) e de Schwarz para o particionamento de domínios. São também fornecidos exemplos de aplicações envolvendo a análise de autovaleores, a elasticidade, a combustão e o eletromagnetismo.

Aos leitores interessados destaca-se, dentre outras contribuições que fizeram uso da biblioteca PETSc, os seguintes trabalhos: [4, 7, 28] e [41].

2 Escoamento Monofásico de Óleo em um Reservatório

A modelagem físico-matemática, tendo-se em vista a simulação do escoamento monofásico isotérmico em um reservatório de petróleo, depende das características do escoamento, das propriedades físicas do reservatório e do fluido e, principalmente, das hipóteses adotadas. Esta seção é dedicada à apresentação do modelo adotado, das propriedades de fluido e de rocha, das equações de balanço, da equação diferencial parcial governante, cuja variável dependente é a pressão do óleo, e das condições inicial e de contorno.

As seguintes hipóteses são utilizadas na derivação do modelo de escoamento:

1. O campo de permeabilidades é heterogêneo e isotrópico;
2. A compressibilidade da rocha é pequena e constante;
3. O fluido é newtoniano;
4. Não ocorrem reações químicas;
5. O escoamento é bidimensional, no plano xy , e em regime laminar;
6. O escoamento é monofásico e isotérmico;
7. Os efeitos gravitacionais são desconsiderados;
8. O poço de produção é vertical e penetra totalmente na formação;
9. Ausências de dano à formação e de estocagem no poço.

Inicia-se pela introdução do fator-volume-formação do óleo [32], $B = \rho_{osc}/\rho_o$, de modo que a equação de conservação da massa seja escrita na forma [18]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{v}_o}{B} \right) - \frac{q_m}{V_b \rho_{osc}} = 0, \quad (1)$$

onde ϕ é a porosidade, \mathbf{v}_o é a velocidade superficial do óleo, q_m é o termo fonte, V_b é o volume total (rocha mais poros), ρ_o é a massa específica do óleo nas condições de reservatório e ρ_{osc} representa a massa específica do óleo em condições padrão de temperatura e pressão, T_{sc} e p_{sc} , respectivamente.

Para escoamentos a baixas velocidades, a equação que expressa a conservação da quantidade de movimento, no escoamento de fluidos em meios porosos, é a lei de Darcy clássica [14, 18, 38],

$$\mathbf{v}_o = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_o} (\nabla p - \rho_o g \nabla D), \quad (2)$$

onde \mathbf{k} é o tensor de permeabilidade absoluta, μ_o é a viscosidade do óleo, g é a magnitude da aceleração da gravidade e D é a profundidade [32].

Agora, após substituição da Eq. (2) na Eq. (1), obtém-se

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{k}}{B\mu_o} (\nabla p - \rho_o g \nabla D) \right] + \frac{q_m}{V_b \rho_{osc}}. \quad (3)$$

Se os efeitos gravitacionais não forem levados em consideração e introduzindo-se a relação $q_m = q_{sc} \rho_{osc}$ tem-se, a partir da Eq. (3), que

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{k}}{B\mu_o} \nabla p \right) - \frac{q_{sc}}{V_b} = 0. \quad (4)$$

Aqui, considera-se que [18]

$$B = \frac{B^0}{1 + c_o(p - p^0)}, \quad (5)$$

$$\phi = \phi^0 [1 + c_\phi(p - p^0)], \quad (6)$$

onde B^0 e ϕ^0 são, respectivamente, o fator-volume-formação e a porosidade nas condições de referência para a pressão p^0 , e c_o e c_ϕ representam as compressibilidades do óleo e da rocha, respectivamente. As compressibilidades de óleo e de rocha são consideradas pequenas e constantes, de forma que óleo e rocha são ligeiramente compressíveis.

Na Eq. (4), o primeiro termo, do lado esquerdo do sinal de igualdade, pode ser reescrito de forma a se obter explicitamente as derivadas parciais da pressão em relação ao tempo [17],

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) &= \frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{B} \right) \\ &= \frac{1}{B} \frac{d\phi}{dp} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \left[\frac{1}{B} \frac{d\phi}{dp} + \phi \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{B} \right) \right] \frac{\partial p}{\partial t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Em seguida, introduz-se as Eqs. (5)-(6) na Eq. (7), de modo que

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \left(\frac{\phi c_o}{B^0} + \frac{\phi^0 c_\phi}{B} \right) \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (8)$$

Finalmente, a partir das Eqs. (4) e (8) é possível se obter a equação governante

$$\Gamma_p \frac{\partial p}{\partial t} - V_b \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{k}}{B\mu_o} \nabla p \right) - q_{sc} = 0, \quad (9)$$

onde

$$\Gamma_p = V_b \left(\frac{\phi c_o}{B^0} + \frac{\phi^0 c_\phi}{B} \right). \quad (10)$$

Quando da determinação da viscosidade do fluido, utiliza-se a correlação frequentemente aplicada ao caso de fluidos ligeiramente compressíveis em escoamentos isotérmicos [18],

$$\mu_o = \frac{\mu^0}{1 - c_\mu(p - p^0)}, \quad (11)$$

onde μ^0 é o valor da viscosidade medida na pressão de referência p^0 e c_μ é o coeficiente de variação da viscosidade em relação à pressão.

2.1 Condições auxiliares

A Eq. (9) é uma equação diferencial parcial não-linear, utilizada na determinação da pressão do óleo. Para se resolvê-la, é ainda necessário que sejam fornecidas as condições auxiliares (inicial e de contorno) apropriadas.

Como condição inicial utiliza-se

$$p(x, y, t = 0) = p_{ini}(x, y) = p_{inic}, \quad (12)$$

onde p_{inic} é a pressão inicial antes de começar a produção de óleo.

No que diz respeito às condições de contorno, considera-se fluxo nulo nas fronteiras do reservatório, logo,

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0, L_x} = \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{y=0, L_y} = 0, \quad (13)$$

onde L_x e L_y são os respectivos comprimentos do reservatório nas direções dos eixos x e y .

2.2 Acoplamento poço-reservatório

Se o termo fonte q_{sc} for utilizado para fornecer a vazão de produção na representação do poço, via uma técnica de acoplamento poço-reservatório, é possível escrever [18]

$$q_{sc} = -J_w (p - p_{wf}), \quad (14)$$

onde J_w é o índice de produtividade e p_{wf} é a pressão no poço.

A determinação numérica do índice de produtividade, no contexto da simulação de reservatórios, será discutida na seção dedicada à resolução numérica. Por hora, ressalta-se que esse acoplamento permite o cálculo da pressão no poço se a sua vazão for prescrita e vice-versa. Neste trabalho, optou-se por utilizar uma condição de vazão de produção prescrita.

3 Resolução Numérica

A simulação numérica é amplamente utilizada nas engenharias e, principalmente, na resolução de problemas de escoamento em reservatórios de petróleo, visto que apenas em alguns casos particulares, simplificados, é possível se obter soluções analíticas para os mesmos [18]. Agora, tratar-se-á das questões relativas à obtenção da solução da equação governante introduzida previamente. Para tanto, utiliza-se os métodos dos Volumes Finitos e de Picard, um método iterativo de resolução de sistemas algébricos, e uma técnica específica para a determinação do índice de produtividade.

Os valores da pressão são obtidos no centro dos volumes finitos e o sistema algébrico de equações resultante do processo de discretização é resolvido mediante o emprego de um método iterativo, uma vez que utiliza-se uma formulação totalmente implícita no tempo.

Para um problema bidimensional, a equação governante (9) pode ser posta na forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) dy = \Gamma_p \frac{\partial p}{\partial t} + q_{sc}, \quad (15)$$

onde foram introduzidas as novas variáveis

$$T_x \equiv \frac{A_x k_x}{\mu B}, \quad (16)$$

$$T_y \equiv \frac{A_y k_y}{\mu B}, \quad (17)$$

sendo que $A_x = dyL_z$, $A_y = dxL_z$ e $V_b = dxdyL_z$, considerando-se que L_z é a espessura do reservatório e que A_x e A_y não são, respectivamente, funções de x e de y [18].

No processo de discretização da Eq. (15), emprega-se uma formulação totalmente implícita no tempo, diferenças centradas a três pontos na aproximação das derivadas espaciais e uma aproximação do tipo diferença recuada para a derivada temporal. Portanto, feitas todas as substituições, a forma final discretizada da equação governante é dada por [34]

$$\begin{aligned} & \mathbb{T}_{x, i+1/2, j}^{n+1} (p_{i+1, j}^{n+1} - p_{i, j}^{n+1}) - \mathbb{T}_{x, i-1/2, j}^{n+1} (p_{i, j}^{n+1} - p_{i-1, j}^{n+1}) \\ & + \mathbb{T}_{y, i, j+1/2}^{n+1} (p_{i, j+1}^{n+1} - p_{i, j}^{n+1}) - \mathbb{T}_{y, i, j-1/2}^{n+1} (p_{i, j}^{n+1} - p_{i, j-1}^{n+1}) \\ & = \Gamma_{i, j}^{n+1} (p_{i, j}^{n+1} - p_{i, j}^n) + (q_{sc})_{i, j}^{n+1}, \end{aligned} \quad (18)$$

onde $i - 1/2$ e $i + 1/2$ representam a posição das faces dos volumes finitos na direção do eixo x , cujo nó central é i, j (com definições análogas para j e a direção do eixo y).

Na Eq. (18), foram introduzidas as novas variáveis conhecidas como as transmissibilidades:

$$\mathbb{T}_{x, i \pm \frac{1}{2}, j}^{n+1} = \left(\frac{A_x k_x}{\mu B \Delta x} \right)_{i \pm \frac{1}{2}, j}^{n+1}, \quad (19)$$

$$\mathbb{T}_{y,i,j \pm \frac{1}{2}}^{n+1} = \left(\frac{A_y k_y}{\mu B \Delta y} \right)_{i,j \pm \frac{1}{2}}^{n+1}. \quad (20)$$

Quando da determinação delas, emprega-se uma média harmônica em se tratando das propriedades de rocha e de geometria, e uma média aritmética (sendo a malha uniforme) com respeito às do fluido. Assim, obtém-se os seus valores em $(i \pm 1/2, j)$ e $(i, j \pm 1/2)$, a partir daqueles conhecidos em (i, j) , $(i \pm 1, j)$ e $(i, j \pm 1)$.

No que diz respeito ao coeficiente do termo transitente, ele é calculado a partir de uma expansão conservativa [18],

$$\Gamma_{i,j}^{n+1} = \left[\frac{\phi^n c_o}{B^0} + \frac{\phi^0 c_\phi}{B^{n+1}} \right] \frac{V_{bi,j}}{\Delta t}, \quad (21)$$

onde $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ representa o incremento de tempo.

3.1 Linearização do sistema de equações algébricas não-lineares

A Equação (18) representa um conjunto de equações algébricas não-lineares. Portanto, para que se possa utilizar as técnicas desenvolvidas especificamente para a resolução de sistemas de equações lineares, elas devem ser linearizadas. Então, tendo em vista a utilização do Método de Picard, para a determinação da transmissibilidade na direção do eixo x [18], introduz-se as aproximações

$$\mathbb{T}_{x,i \pm \frac{1}{2},j}^{n+1} \cong \mathbb{T}_{x,i \pm \frac{1}{2},j}^{n+1,v} = \left(\frac{A_x k}{\mu B \Delta x} \right)_{i \pm \frac{1}{2},j}^{n+1,v}, \quad (22)$$

$$\mathbb{T}_{y,i,j \pm \frac{1}{2}}^{n+1} \cong \mathbb{T}_{y,i,j \pm \frac{1}{2}}^{n+1,v} = \left(\frac{A_y k}{\mu B \Delta y} \right)_{i,j \pm \frac{1}{2}}^{n+1,v}. \quad (23)$$

Portanto, a Equação (18) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} & \mathbb{T}_{x,i+\frac{1}{2},j}^{n+1,v} \left(p_{i+1,j}^{n+1,v+1} - p_{i,j}^{n+1,v+1} \right) \\ & - \mathbb{T}_{x,i-\frac{1}{2},j}^{n+1,v} \left(p_{i,j}^{n+1,v+1} - p_{i-1,j}^{n+1,v+1} \right) \\ & + \mathbb{T}_{y,i,j+\frac{1}{2}}^{n+1,v} \left(p_{i,j+1}^{n+1,v+1} - p_{i,j}^{n+1,v+1} \right) \\ & - \mathbb{T}_{y,i,j-\frac{1}{2}}^{n+1,v} \left(p_{i,j}^{n+1,v+1} - p_{i,j-1}^{n+1,v+1} \right) \\ & = \Gamma_{i,j}^{n+1,v} \left(p_{i,j}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k}^n \right) + (q_{sc})_{i,j}^{n+1,v}, \quad (24) \end{aligned}$$

onde os níveis de iteração são indicados por v (valores conhecidos) e $v + 1$ (valores desconhecidos). O mesmo procedimento é utilizado para os termos $\Gamma_{i,j}$ e $(q_{sc})_{i,j}$.

3.2 Determinação do índice de produtividade

No caso do acoplamento poço-reservatório, também se lineariza o termo que contém o índice de produtividade J_w . Aqui, apenas poços verticais são considerados, negligenciando-se as perdas de carga e os efeitos inerciais nos seus interiores. A vazão de produção no poço, q_{sc} , está relacionada com a diferença de pressão por intermédio do índice de produtividade e a sua forma discretizada é dada por [34]

$$(q_{sc})_{i,j}^{n+1,v} = -J_{w,i,j}^{n+1,v} \left[p_{i,j}^{n+1,v+1} - (p_{wf})_{i,j}^{n+1,v+1} \right]. \quad (25)$$

Assim sendo, em se tratando desse caso em particular, o índice de produtividade é calculado por [11]

$$J_{w,i,j}^{n+1,v} = \left[\frac{2\pi \sqrt{k_x k_y} \Delta z}{\mu B \ln \left(\frac{r_{eq}}{r_w} \right)} \right]_{i,j}^{n+1,v}, \quad (26)$$

onde

$$r_{eq} = 0,28 \left[\frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_x}} (\Delta x)^2 + \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} (\Delta y)^2}{\left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{1/4} + \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{1/4}} \right]_{i,j,k}, \quad (27)$$

com r_{eq} e r_w representando os raios equivalente [31] e do poço, respectivamente.

3.3 Metodologia de solução do sistema de equações algébricas

Os sistemas oriundos da linearização das equações algébricas não-lineares têm, em geral, como características o fato da matriz dos coeficientes ser esparsa e a elevada quantidade de incógnitas. Portanto, necessita-se de muita memória e velocidade de processamento quando da resolução deles.

O método dos Gradientes Conjugados (GC) foi o escolhido para ser empregado na resolução do sistema linearizado de equações algébricas. Ele é considerado como um dos métodos iterativos mais eficientes para a resolução de sistemas lineares não-estacionários, pois herda informações das iterações precedentes e as considera quando da realização da subsequente. Resumidamente, as suas etapas consistem em executar passos, a cada iteração, na direção oposta a do gradiente da função a ser minimizada, de tal forma que a informação proveniente da direção já pesquisada não seja repetida, até que seja encontrado o mínimo estrito e global. A minimização ocorre nos chamados subespaços de pesquisa (espaço de Krylov), gerados a partir dos resíduos de cada iteração [8].

Supondo-se que não sejam introduzidos erros de arredondamento, se a matriz dos coeficientes \mathbf{A} possui m autovalores distintos, o método deve convergir em no

máximo m iterações. Por outro lado, se ela possuir muitos autovalores distintos cujas magnitudes variam enormemente, o método provavelmente necessitará de um grande número de iterações para que ela seja alcançada [33].

Por sua vez, a convergência pode ser acelerada mediante o pré-condicionamento da matriz \mathbf{A} . Ele consiste em transformar o sistema original em um outro que tem a mesma solução, porém, possuindo propriedades mais favoráveis para que a convergência seja atingida mais rapidamente [33]. A matriz pré-condicionadora é escolhida de tal forma que $\mathbf{A}' = \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{C}^T$, onde a matriz \mathbf{C} é dita ser não-singular e pré-condicionadora. A biblioteca PETSc disponibiliza diferentes métodos de pré-condicionamento como, por exemplo, o Symmetric Successive Over-Relaxation (SSOR).

4 Implementação da Biblioteca PETSc

De modo a viabilizar a utilização da biblioteca PETSc, é necessário instalá-la juntamente com um conjunto de “pacotes de programas” que proporcionam a compilação e a execução do programa computacional criado pelo usuário. As orientações para a sua instalação e utilização encontram-se disponíveis no endereço eletrônico <https://petsc.org> [3]. Neste trabalho, a distribuição empregada é a PETSc 3.18 de 2022 e o código numérico foi desenvolvido usando a linguagem de programação C.

Após a discretização da equação governante, a matriz dos coeficientes \mathbf{A} , associada ao sistema de equações algébricas linearizadas, é esparsa, simétrica, pentadiagonal e com predominância da diagonal principal. As componentes do vetor \mathbf{b} contém as pressões obtidas no passo de tempo anterior, acrescidas do termo fonte.

No Algoritmo 1, lista-se as principais etapas a serem efetivadas para a implementação da utilização de um dos métodos de resolução do pacote Krylov Subspace Methods (KSP) contidos na sua biblioteca <petscksp.h>.

Algoritmo 1: Resolução básica utilizando a PETSc

- 1 Inicialização da biblioteca PETSc adequada ao problema;
- 2 Declaração das variáveis do tipo PETSc;
- 3 Obtenção dos parâmetros do problema;
- 4 Inicialização das matrizes e vetores;
- 5 Configuração do solver;
- 6 Resolução do sistema linear $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ pelo método escolhido;
- 7 Verificação dos resultados e/ou arquivamento de dados;
- 8 Liberação da memória e finalização do uso da biblioteca PETSc.

A função `PetscInitialize` é a encarregada por iniciar a aplicação da biblioteca, sendo a primeira função da PETSc dentro do código.

4.1 Declaração das variáveis

Os principais tipos de dados da PETSc podem ser vistos na Tabela 1. Um fato interessante é a possibilidade de se alterar o tamanho das variáveis. Por exemplo, é possível mudar a configuração de uma variável do tipo `PetscInt` de 32 bits para 64 bits.

Tabela 1 Tipos de dados da biblioteca PETSc

Tipo	Descrição
<code>PetscInt</code>	Variável para números inteiros
<code>PetscScalar</code>	Variável para números reais com precisão dupla
<code>PetscReal</code>	Representa um numero Real de um <code>PetscScalar</code>
<code>PetscBool</code>	Variável lógica: 0 ou 1
<code>Vec</code>	Declaração de um vetor
<code>Mat</code>	Declaração de uma matriz
<code>KSP</code>	Declaração de soluções da família KSP
<code>PC</code>	Declaração dos pré-condicionadores

Os parâmetros de entrada do simulador encontram-se organizados em arquivos, facilitando a realização das simulações numéricas e evitando a necessidade da recompilação do código numérico a cada alteração. Na sequência, é fornecido um exemplo de declaração de variáveis, onde N_x e N_y representam os números de células na malha computacional, nas direções dos eixos x e y , respectivamente:

```
//Declaração das variáveis principais
Vec          x,b;
Mat          A;
Ksp          ksp;
PC           pc;
PetscInt     Nx,Ny,col[5];
PetscScalar  *resultado,v[5];
//Variáveis comuns
int          i,j;
double       Lx,Ly,Lz;
```

As variáveis seguem as mesmas regras da sintaxe da linguagem C, podendo ser declaradas como global ou local. Os vetores e matrizes são apenas apontados, sendo necessário realizar a alocação de memória e as configurações dos parâmetros.

4.2 Inicialização das matrizes e vetores

As matrizes e os vetores necessitam de uma atenção especial em função do tipo de método que se deseja utilizar, influenciando diretamente nas configurações e alocações de memória. Por padrão, as matrizes são alocadas em uma forma compactada via a técnica conhecida como Compressed Sparse Row (CSR) [37]. Segue um exemplo de configuração da matriz e dos vetores:

```
//Parametrização da matriz
  MatCreate(PETSC_COMM_WORLD, &A);
  MatSetSizes(A, PETSC_DECIDE, PETSC_DECIDE,
Nx * Ny, Nx * Ny);
  MatSetFromOptions(A);
  MatSetUp(A);
//Parametrização do vetor
  VecCreate(PETSC_COMM_WORLD, &x);
  VecSetSizes(x, PETSC_DECIDE, Nx * Ny);
  VecSetFromOptions(x);
//Função para configurar vetores com as mesmas
dimensões
  VecDuplicate(x, &b);
```

Após a locação de memória, pode-se passar para a etapa de definição dos valores dos elementos dos vetores e da matriz. É fornecido, agora, um exemplo com a inicialização do vetor **b** e da matriz **A**. Para inserir cada linha da matriz, é necessário fornecer um array com a posição e outro contendo os valores, *col* e *v* respectivamente, enquanto que a variável *i* informa qual é a linha:

```
//Função para alocar um valor a todos os
elementos do vetor
  VecSet(b, P_ref);
//Função para inserir os valores de uma linha
na matriz pentadiagonal "A"
  MatSetValues(A, 1, &i, 5, col, v,
INSERT_VALUES)
//Funções de construção devem ser chamadas
  MatAssemblyBegin(A, MAT_FINAL_ASSEMBLY);
  MatAssemblyEnd(A, MAT_FINAL_ASSEMBLY);
```

4.3 Configuração do método de resolução

Uma vez escolhido o método KSP, é necessário se configurar as suas opções. Quando uma função de configuração não é chamada, a PETSc utiliza as definidas como padrão. Por exemplo, caso não esteja determinado que o KSPSetType é o do método dos Gradientes Conjugados (KSPCG), por padrão seria escolhido o GMRES. Por intermédio da função KSPSetTolerances são estabelecidos os critérios de tolerância:

```
//Criação do solver linear e configurações das
opções
  KSPCreate(PETSC_COMM_WORLD, &ksp);
  KSPSetType(ksp, KSPCG);
  KSPSetOperators(ksp, A, A);
  KSPSetTolerances(ksp, 1.e-10, 1.e-50,
PETSC_DEFAULT, PETSC_DEFAULT);
```

4.4 Resolução do sistema linear

A função KSPSolve é a responsável por dar início ao processo de resolução do sistema algébrico $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, sendo

imprescindível fornecer os vetores **x** e **b**, sabendo-se que a matriz **A** já foi configurada via a função KSPSetOperators. Após ter sido alcançada a convergência, a solução do sistema é armazenada no vetor **x**.

A função KSPSetInitialGuessNonzero permite informar a estimativa inicial. Quando ela não for configurada, o padrão é o de se começar com $\mathbf{x} = \mathbf{0}$, que pode aumentar consideravelmente o número de iterações e o tempo de execução até a convergência, de acordo com a tolerância estipulada e o tipo de problema físico-matemático considerado,

```
//Resolução do sistema linear
  KSPSetInitialGuessNonzero(ksp,
PETSC_TRUE);
  KSPSetFromOptions(ksp);
  KSPSolve(ksp, b, x);
```

4.5 Verificação dos resultados

Para se ter acesso às informações de cada componente do vetor solução é necessário utilizar um ponteiro e a função VecGetArray. Também pode-se manipular diretamente o próprio vetor, mediante o uso de diversas funções pré-existentes como, por exemplo, a função VecView, que exhibe os elementos do vetor:

```
//Função para apontar os dados do vetor para o
ponteiro "resultado"
  VecGetArray(x, &resultado);
//Imprimir na tela o vetor solução
  VecView(x, PETSC_VIEWER_STDOUT_WORLD);
```

4.6 Liberação de memória e finalização da execução

Para que a simulação seja finalizada, é indispensável que seja feita a liberação da memória alocada. A cada tipo de dado corresponde uma função específica para tal finalidade. A última função chamada em um código PETSc é a PetscFinalize, responsável por concluir a execução do programa:

```
VecRestoreArray(&resultado);
VecDestroy(&x); VecDestroy(&b);
MatDestroy(&A);
KSPDestroy(&ksp);
PetscFinalize();
```

5 Resultados Numéricos

Nas simulações de reservatório, quando se tem por meta a estimativa da pressão no poço, utiliza-se um passo de

tempo variável para melhor capturar os efeitos que se desenrolam nos instantes iniciais da produção. Portanto, um passo de tempo inicial, Δt_i , é multiplicado, sequencialmente, pelo fator $F_{\Delta t}$, a cada passo de tempo, até se atingir o passo de tempo final, Δt_{final} [34].

Os parâmetros gerais, as propriedades da rocha, do fluido e geométricas, para a construção do caso de referência, podem ser encontrados na Tabela 2, tendo sido considerado que a viscosidade é mantida constante.

Tabela 2 Parâmetros gerais para a rocha, o fluido e a geometria para o caso de referência

Parâmetro	Valor	Unidade
B_0	1,3	$\text{m}^3/\text{std m}^3$
c_o	$8,0 \times 10^{-7}$	kPa^{-1}
c_r	$5,0 \times 10^{-7}$	kPa^{-1}
$F_{\Delta t}$	1,1	-
$k_x = k_y = k$	0,05	μm^2
$L_x = L_y$	1.000	m
L_z	50	m
$p_{inic} = p_0$	69.000	kPa
q_{sc}	-1.000	m^3/dia
t_{final}	100	dia
tol	1×10^{-6}	kPa
Δt_i	0,001	dia
Δt_{final}	5	dia
μ^0	0,001	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ_{ref}	840	kg/m^3
$\phi_{ini} = \phi_0$	0,2	-

Por outro lado, a Tabela 3 exibe a quantidade de células, nas direções dos eixos x e y , respectivamente N_x e N_y , consideradas na proposição das diferentes malhas computacionais utilizadas na investigação do comportamento da solução numérica, ao se implementar o estudo do refinamento de malha. Ele é crucial para que se possa garantir a obtenção de soluções numéricas acuradas, além de se reduzir a estocagem numérica associada ao uso da técnica de acoplamento poço-reservatório [15, 30, 31].

Tabela 3 Malhas consideradas no estudo de refinamento

Malha	N_x	N_y
1	11	11
2	33	33
3	65	65
4	129	129
5	257	257
6	513	513
7	1.025	1.025

As simulações foram executadas em um nó do cluster do Laboratório de Computação de Alto Desempenho (LCAD) do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), cujas especificações são: Processador Intel(R) Xeon Silver 4210 2,2 GHz; Memória de 128 Gb; Instruction Set: 64 bits; Capacidade de armazenamento de 0,5 TB; Número de núcleos igual a 10;

Número de threads igual a 20; e Sistema operacional: Linux OpenSuse 15.5.

5.1 Refinamento de malha

Neste estudo, foram empregadas sete malhas de modo a se determinar a mais adequada tendo em vista a convergência numérica do método [2, 18]. Elas foram refinadas nas direções dos eixos x e y , mantendo-se inalteradas as propriedades físicas e as condições de operação do caso de referência.

Na Figura 1, mostra-se os valores obtidos sob o refinamento de malha, sendo perceptível, nos instantes iniciais da produção, o surgimento de patamares provocados pelo aparecimento do artefato numérico [15]. Ele é chamado de estocagem numérica, devido à semelhança qualitativa da variação de p_{wf} , em função do tempo, quando da presença da estocagem física no poço [15]. Eles já eram esperados e são consequência da escolha da técnica de acoplamento poço-reservatório aqui empregada. Ela foi introduzida por Peaceman (1978) [30], que considerou que o escoamento, na região de interação entre o poço e o reservatório, se dava em condições de regime permanente. A magnitude do artefato depende, por exemplo, da malha computacional empregada e das propriedades de fluido e de rocha.

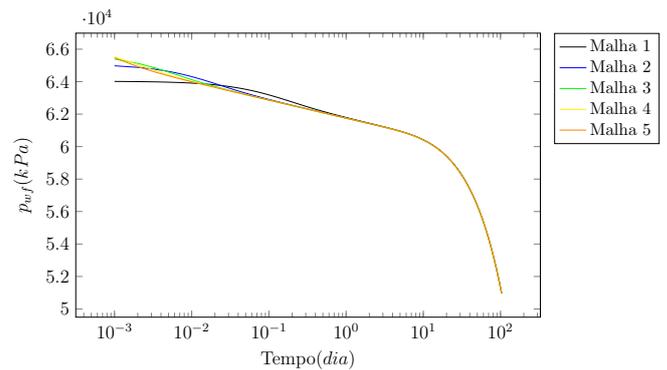


Figura 1: Pressão no poço em função do tempo de produção. Fonte: os autores.

É possível verificar, na Figura 2, a redução do efeito do artefato numérico à medida que as malhas são refinadas. Isso mostra que as soluções, a partir da Malha 5, não apresentam alterações significativas nos valores da pressão no poço e pode-se considerar que a convergência numérica foi estabelecida. Vale destacar que a mitigação dela não faz parte dos objetivos deste trabalho. Em conclusão, reteve-se a Malha 5 como sendo aquela que deve ser usada em conjunto com os demais parâmetros e valores já estipulados para o caso de referência.

Na Figura 3, a título de ilustração, é exibida a superfície que fornece a distribuição de pressão no interior do reservatório, computada já utilizando-se a Malha 5. A distribuição simétrica obtida exibe o comportamento físico esperado, tendo em vista as propriedades de rocha consideradas (campos homogêneos de permeabilidade absoluta e de porosidade inicial), com as menores

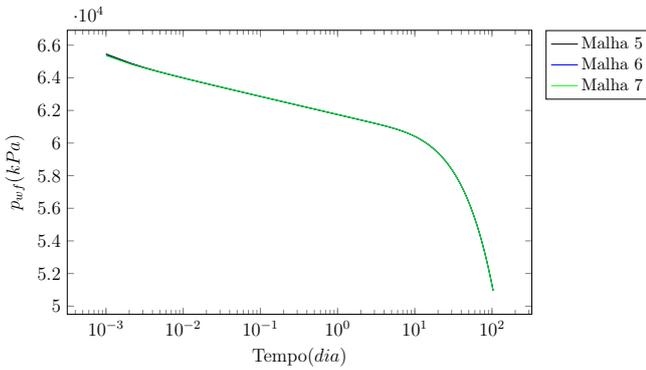


Figura 2: Pressão no poço em função do tempo de produção. Fonte: os autores.

pressões localizadas na região onde está localizado o poço produtor.

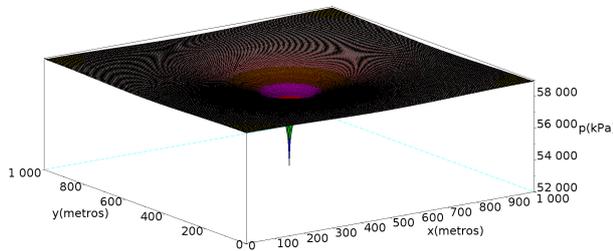


Figura 3: Distribuição do campo de pressões no reservatório após transcorridos 100 dias de simulação. Fonte: os autores.

5.2 Comparação de alguns dos métodos de solução e pré-condicionadores da PETSc

A versão da biblioteca PETSc 3.18 permite ao usuário escolher pelo menos um dentre os 51 métodos de resolução de sistemas de equações, disponíveis na biblioteca KSP. Em alguns casos, pode-se também trabalhar em conjunto com um dos 55 tipos de pré-condicionadores. Essa diversidade mostra a versatilidade da biblioteca e, dentre as possibilidades de escolha, foram selecionados os métodos Generalized Minimal Residual Method (GMRES), Conjugate Gradient Method (CG) e Biconjugate Gradient Method BICG, em conjunto com os pré-condicionadores de Jacobi, LU, Incomplete LU (ILU) e Successive Over-Relaxation Method (SSOR).

Inicia-se mostrando os valores da pressão no poço, p_{wf} , obtidos sem o emprego de pré-condicionadores (Figura 4). Percebe-se que é difícil se distinguir as curvas umas das outras, sendo que o erro relativo calculado foi inferior a 0,001%. No entanto, existem variações consideráveis no que se refere aos tempos de execução, sendo que o menor valor foi alcançado com o uso do método CG, demandando 76,09 s para executar a simulação do caso de referência, seguido pelo GMRES com 154,49 s e, por fim, o BICG com 148,89 s.

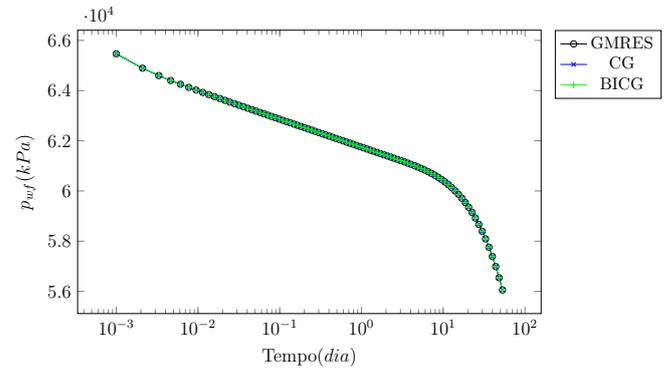


Figura 4: Pressão no poço em função do tempo de produção empregando diferentes métodos: GMRES, CG e BICG. Fonte: os autores.

Chama-se a atenção para o fato de que o método BICG não teria o seu emprego recomendado para o problema estudado, uma vez que a matriz dos coeficientes é simétrica. Como consequência, é natural que se tenha um tempo de execução aproximadamente duas vezes maior do que o do CG. No entanto, ele foi também utilizado no intuito de se validar os resultados.

Na Figura 5, tem-se as curvas de pressão determinadas com o método dos Gradientes Conjugados. Entretanto, agora, fez-se uso dos pré-condicionadores. Pode-se afirmar, uma vez mais, que as curvas encontram-se sobrepostas para os casos calculados sem (CG_{ref}) e com os pré-condicionadores Jacobi, SSOR, ILU, LU.

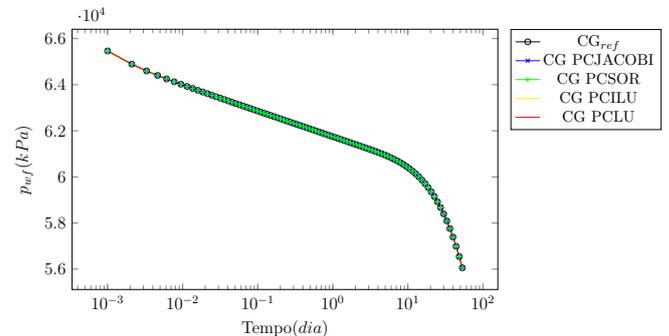


Figura 5: Pressão no poço em função do tempo de produção empregando o método CG, sem (CG_{ref}) e com pré-condicionadores. Fonte: os autores.

A Tabela 4 contém os valores dos tempos de execução quando da utilização dos pré-condicionadores. O uso do pré-condicionador SSOR conseguiu melhorar o tempo de simulação em 6,57%. No entanto, essa conclusão não deve servir como base para uma generalização, pois a eficiência deles depende das propriedades da matriz dos coeficientes (dos seus autovalores).

5.3 Variação de algumas das propriedades físicas

A alteração de alguns dos valores das propriedades físicas pode ajudar a se constatar se os resultados, numericamente calculados, estão de acordo com aqueles amplamente conhecidos na literatura.

Tabela 4 Tempo de execução - CG

Método	Pré-condicionador	Tempo (s)
	—	76,09
CG	Jacobi	101,02
	LU	746,49
	ILU	73,8
	SSOR	71,0

Por exemplo, na Figura 6 encontram-se os correspondentes à diminuição e à elevação dos valores da permeabilidade absoluta, tomando-se como ponto de partida o caso de referência. É sabido, de acordo com a lei de Darcy, que a velocidade de escoamento, de um fluido no interior de um meio poroso, depende diretamente da permeabilidade absoluta e inversamente da viscosidade. Além disso, averigua-se que para as menores valores da permeabilidade absoluta obtém-se as maiores variações de pressão, devido ao fato do aumento da resistência ao escoamento através do meio poroso [18].

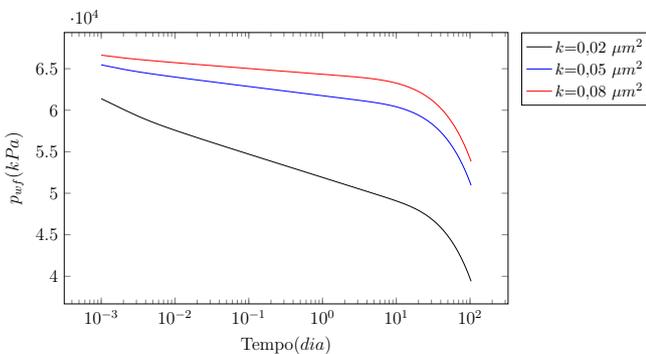


Figura 6: Pressão no poço em função do tempo de produção: variação da permeabilidade. Fonte: os autores.

Por outro lado, na Figura 7 tem-se os resultados das simulações quando aumenta-se e diminui-se os valores da porosidade do caso de referência. Como é de conhecimento geral, a porosidade é uma propriedade relacionada à capacidade de armazenamento do volume de fluido no reservatório. Da figura, pode-se atestar que para os maiores valores de porosidade correspondem as menores quedas de pressão, em função do aumento do volume de fluido estocado nos poros. A porosidade também influencia na capacidade do meio poroso em transportar o fluido. Quanto menor o seu valor, mais rápido se dará o seu deslocamento e, dessa forma, os efeitos de fronteira se farão sentir mais cedo. Tal fato pode ser observado na mudança, mais acentuada, no perfil das curvas de pressão para os tempos tardios [32]. Portanto, o efeito da sua variação é inverso ao da permeabilidade absoluta.

Embora o foco tenha sido o entendimento da física do problema, investigou-se também se essas mudanças nas propriedades poderiam afetar o tempo de execução do simulador numérico.

Na Tabela 5 encontram-se os tempos de simulação quando da variação da permeabilidade absoluta. Ela está

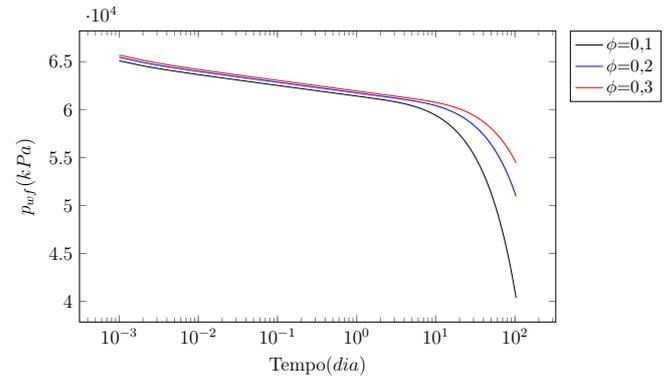


Figura 7: Pressão no poço em função do tempo de produção: variação da porosidade. Fonte: os autores.

diretamente relacionada com os valores das transmissibilidades, que aparecem nas diagonais principais da matriz dos coeficientes, alterando a dominância da diagonal principal, influenciando, assim, no número de iterações para que se obtenha a convergência e, com isso, o tempo de execução. Vê-se que os respectivos tempos aumentam conforme os seus valores crescem.

Tabela 5 Tempo de execução variando-se os valores da permeabilidade

Permeabilidade	Tempo (s)
$k= 0,02 \mu\text{m}^2$	63,03
$k= 0,05 \mu\text{m}^2$	71,04
$k= 0,08 \mu\text{m}^2$	84,15

Por sua vez, a mudança dos valores da porosidade leva a modificações apenas na diagonal principal, com a consequente alteração na sua dominância. Portanto, tem-se uma redução do tempo de execução à medida que os seus valores são aumentados, vide a Tabela 6.

Tabela 6 Tempo de execução variando-se os valores da porosidade

Porosidade	Tempo (s)
$\phi=0,1$	92,32
$\phi=0,2$	71,04
$\phi=0,3$	68,46

5.4 Escoamento em um meio heterogêneo

Finalmente, incluiu-se uma discussão tratando do escoamento em meios heterogêneos. As heterogeneidades aumentam a dificuldade de obtenção das soluções e introduzem complicações adicionais quando das suas implementações. Entretanto, esse é um caminho a ser percorrido, a fim de que se possa tratar de problemas mais próximos dos encontrados na realidade. Com o objetivo de se verificar o comportamento da solução numérica, no caso de um meio heterogêneo, alterou-se a permeabilidade absoluta, k_{fx} , em uma dada região (faixa) do reservatório (região em vermelho apresentada na Figura 8),

com o seu comprimento perfazendo um total de 61 células. Ela foi posicionada a uma distância de 3 células do poço produtor.

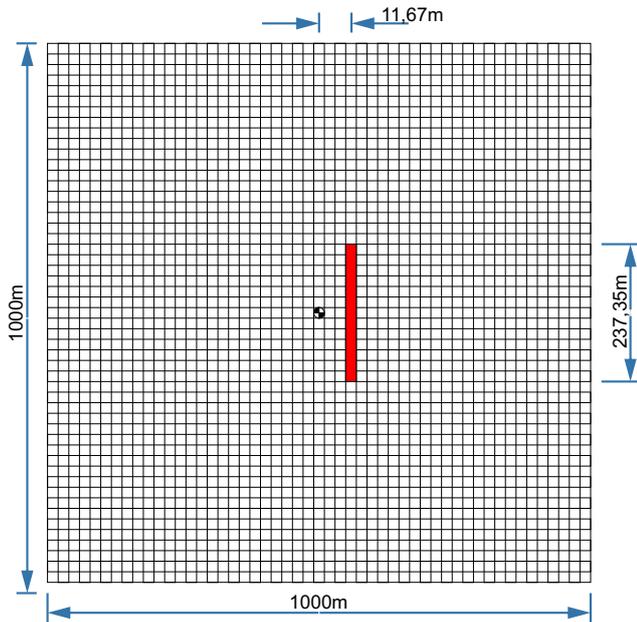


Figura 8: Representação do meio heterogêneo. Fonte: os autores.

Na Figura 9, são mostradas as curvas de pressão no poço quando do escoamento nos meios homogêneo ($k_{fx} = k$) e heterogêneo. Elas estão, qualitativamente, de acordo com a física do escoamento, com as maiores pressões no poço estando relacionadas à existência de uma região de maior permeabilidade. A faixa do reservatório, contendo os maiores valores da permeabilidade absoluta, se comporta como um canal que oferece uma menor resistência ao escoamento e, também, é responsável pelo aumento da permeabilidade equivalente do sistema compreendendo as diferentes regiões do reservatório. A inclinação da curva da pressão no poço versus o tempo, no gráfico especializado, também é uma função do valor da permeabilidade, como pode ser observado na figura.

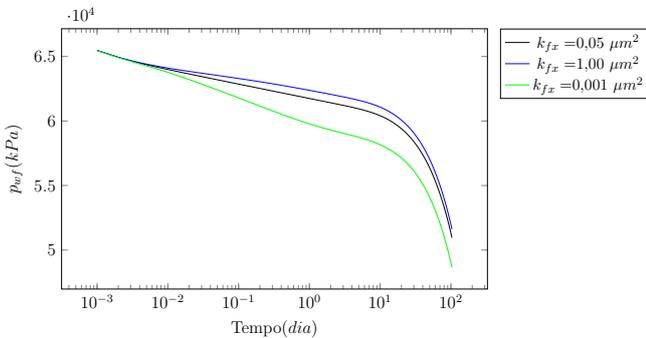


Figura 9: Pressão no poço em função do tempo de produção: variação de k_{fx} . Fonte: os autores.

Verifica-se, vide a Tabela 7, que a modificação do campo de permeabilidade absoluta, na região especifi-

cada, ou seja, a inclusão de uma heterogeneidade no domínio do problema físico-matemático, implicou o maior número de iterações para que a convergência fosse atin- gida, influenciando, assim, diretamente no tempo de execução.

Tabela 7 Tempo de execução variando-se os valores de k_{fx} da faixa heterogênea

Meio	k_{fx}	Tempo (s)
Homogêneo	$0,05 \mu m^2$	71,04
Heterogêneo	$0,001 \mu m^2$	88,41
Heterogêneo	$1,0 \mu m^2$	101,15

6 Conclusões

O uso de bibliotecas científicas, como a PETSc, é uma prática moderna no campo da modelagem computacio- nal. Trata-se de uma ferramenta versátil, que pode ser utilizada nas simulações de escoamentos em reservató- rios de petróleo. Aliada ao seu emprego, encontra-se a análise cuidadosa da escolha do método de solução de sistemas de equações, de modo a possibilitar a redução do tempo de simulação mantendo, concomitantemente, a confiabilidade dos resultados. Assim sendo, a utilização dessas bibliotecas pode ser um diferencial no desenvol- vimento de simuladores de reservatórios computacional- mente mais eficientes.

Os resultados que aqui foram apresentados, em con- junto com os procedimentos realizados visando à viabi- lização do uso da biblioteca PETSc, foram as principais contribuições deste trabalho.

Portanto, é possível concluir que a PETSc é uma fer- ramenta indicada para o seu uso na simulação de reser- vatórios, favorecendo a determinação da melhor estraté- gia de solução a ser empregada e, com isso, viabilizando a otimização do simulador. Aos pesquisadores interessa- dos, a biblioteca TAO pode contribuir para que se al- cance um maior desempenho computacional a partir do simulador previamente desenvolvido pelo programador, criado para a resolução de um dado problema específico.

Por fim, verificou-se que todos os resultados obtidos apresentaram, qualitativamente, o comportamento físico esperado com base naqueles disponíveis em outros tra- balhos.



Referências

- [1] N.S. Al-Mohannadi. Simulation of Horizontal Well Tests. PhD thesis, Colorado School of Mines, Gol- den, USA, 2004.

- [2] K. Aziz and A. Settari. Petroleum Reservoir Simulation. Elsevier Applied Science, New York, USA, 1990.
- [3] S. Balay, S. Abhyankar, M. F. Adams, S. Benson, J. Brown, P. Brune, K. Buschelman, E. M. Constantinescu, L. Dalcin, A. Dener, V. Eijkhout, J. Faibussovitch, W. D. Gropp, V. Hapla, T. Isaac, P. Jolivet, D. Karpeev, D. Kaushik, M. G. Knepley, F. Kong, S. Kruger, D. A. May, L. C. McInnes, R. T. Mills, L. Mitchell, T. Munson, J. E. Roman, K. Rupp, P. Sanan, J. Sarich, B. F. Smith, S. Zampini, H. Zhang, and J. Zhang. PETSc Web page, 2024.
- [4] S. Bhowmick, D. Kaushik, L. McInnes, B. Norris, and P. Raghavan. Parallel adaptive solvers in compressible PETSc-FUN3D simulations. In Anil Deane, Akin Ecer, James McDonough, Nobuyuki Sato-fuka, Gunther Brenner, David R. Emerson, Jacques Periaux, and Damien Tromeur-Dervout, editors, Parallel Computational Fluid Dynamics 2005, pages 277–284. Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [5] D. Boffi, F. Credali, L. Gastaldi, and S. Scacchi. A parallel solver for fluid–structure interaction problems with Lagrange multiplier. Mathematics and Computers in Simulation, 220:406–424, 2024.
- [6] H. Bonart, S. Fillinger, E. Esche, G. Wozny, and J.-U. Repke. Source code generation for parallelized simulations of large-scale nonlinear equation systems on a supercomputer using MOSAIC, PETSc, and ADOL-C. In Antonio Espuña, Moisès Graells, and Luis Puigjaner, editors, 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, volume 40 of Computer Aided Chemical Engineering, pages 2083–2088. Elsevier, 2017.
- [7] P. D. Boom, A. Seepujak, O. Kosmas, L. Margetts, and A. Jivkov. Parallelized discrete exterior calculus for three-dimensional elliptic problems. Computer Physics Communications, 279:108456, 2022.
- [8] A. P. Canal. Paralelização de métodos de resolução de sistemas lineares esparsos com o deck em um cluster de PCs. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- [9] L. Carracciolo, L. D’Amore, and A. Murli. Towards a parallel component for imaging in PETSc programming environment: a case study in 3-D echocardiography. Parallel Computing, 32(1):67–83, 2006.
- [10] E. Centofanti and S. Scacchi. A comparison of algebraic multigrid bidomain solvers on hybrid CPU–GPU architectures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 423:116875, 2024.
- [11] L. E. Clarke and G. Krishnamoorthy. Preconditioning strategies to accelerate the convergence of iterative methods in multiphase flow simulations. Mathematics and Computers in Simulation, 165:200–222, 2019.
- [12] A. Croucher, M. O’Sullivan, J. O’Sullivan, A. Yeh, J. Burnnell, and W. Kissiling. Waiwera: A parallel open-source geothermal flow simulator. Computers & Geosciences, 141:104529, 2020.
- [13] S. Cuomo, A. Galletti, G. Giunta, and L. Marcelino. Toward a multi-level parallel framework on GPU cluster with PETSc-CUDA for PDE-based optical flow computation. Procedia Computer Science, 51:170–179, 2015.
- [14] H. Darcy. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d’eau. Victor Dalmont, 1856.
- [15] G. de Souza. Acoplamento Poço-reservatório na Simulação Numérica de Reservatórios de Gás. PhD thesis, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé, Brasil, 2013.
- [16] D. Demidov. AMGCL-A C++ library for efficient solution of large sparse linear systems. Software Impacts, 6:100037, 2020.
- [17] J. Dyrdaahl. Thermal flow in fractured porous media and operator splitting. Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2014.
- [18] T. Ertekin, J. H. Abou-Kassem, and G. R. King. Basic Applied Reservoir Simulation. Society of Petroleum Engineers, Richardson, USA, 2001.
- [19] J.-M. Gratien. A robust and scalable multi-level domain decomposition preconditioner for multi-core architecture with large number of cores. Journal of Computational and Applied Mathematics, 373:112614, 2020.
- [20] X. Guo, B. D. Rogers, S. Lind, and P. K. Stansby. New massively parallel scheme for Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) for highly nonlinear and distorted flow. Computer Physics Communications, 233:16–28, 2018.
- [21] P. D. Hovland and L. C. McInnes. Parallel simulation of compressible flow using automatic differentiation and PETSc. Parallel Computing, 27(4):503–519, 2001.
- [22] P. Jolivet, J. E. Roman, and S. Zampini. KSPHPDDM and PCHPDDM: Extending PETSc with advanced Krylov methods and robust multilevel overlapping Schwarz preconditioners. Computers & Mathematics with Applications, 84:277–295, 2021.

- [23] Y. Jung, George S. H. Pau, S. Finsterle, and R. M. Pollyea. TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. *Computers & Geosciences*, 108:2–7, 2017.
- [24] S. Kang, A. Dener, A. Hamilton, H. Zhang, E. M. Constantinescu, and R. L. Jacob. Multirate partitioned Runge–Kutta methods for coupled Navier–Stokes equations. *Computers & Fluids*, 264:105964, 2023.
- [25] R. F. Katz, M. G. Knepley, B. Smith, M. Spiegelman, and E. T. Coon. Numerical simulation of geodynamic processes with the portable extensible toolkit for scientific computation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163(1):52–68, 2007.
- [26] T. Kempe, A. Aguilera, W. Nagel, and J. Fröhlich. Performance of a projection method for incompressible flows on heterogeneous hardware. *Computers & Fluids*, 121:37–43, 2015.
- [27] Y. Ma and Z. Chen. Parallel computation for reservoir thermal simulation of multicomponent and multiphase fluid flow. *Journal of Computational Physics*, 201:224–237, 2004.
- [28] B. Mantravadi, P. Jagad, and R. Samtaney. A hybrid discrete exterior calculus and finite difference method for Boussinesq convection in spherical shells. *Journal of Computational Physics*, 491:112397, 2023.
- [29] R. T. Mills, M. F. Adams, S. Balay, J. Brown, A. Dener, M. Knepley, S. E. Kruger, H. Morgan, T. Munson, K. Rupp, B. F. Smith, S. Zampini, H. Zhang, and Junchao Zhang. Toward performance-portable PETSc for GPU-based exascale systems. *Parallel Computing*, 108:102831, 2021.
- [30] D. W. Peaceman. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 18(3):183–194, 1978.
- [31] D. W. Peaceman. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with nonsquare grid blocks and anisotropic permeability. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(3):531–543, 1983.
- [32] A. J. Rosa, R. S. Carvalho, and J. A. D. Xavier. *Engenharia de reservatórios de petróleo*. Interciência, 2006.
- [33] Y. Saad. *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. SIAM, Philadelphia, EUA, 2003.
- [34] F. B. Vasconcellos. Utilização da biblioteca numérica PETSc na solução de sistemas algébricos na simulação de reservatórios. Master’s thesis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, Brasil, 2024.
- [35] W. Wang, O. Kolditz, and T. Nagel. A parallel FEM scheme for the simulation of large scale thermochemical energy storage with complex geometries using PETSc routines. *Energy Procedia*, 75:2080–2086, 2015.
- [36] L. F. Werneck. Implementação paralelizada de métodos de resolução de sistemas algébricos na simulação de reservatórios de gás. Master’s thesis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2016.
- [37] L. F. Werneck, M. M. Freitas, G. Souza, L. F. C. Jatobá, and H. P. A. Souto. An OpenMP parallel implementation using a coprocessor for numerical simulation of oil reservoirs. *Computational and Applied Mathematics*, 38:1–30, 2019.
- [38] S. Whitaker. *The Method of Volume Average. Theory and Applications of Transport in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [39] H. Yang, S. Sun, Y. Li, and C. Yang. A scalable fully implicit framework for reservoir simulation on parallel computers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 330:334–350, 2018.
- [40] H. Yang, S. Sun, Y. Li, and C. Yang. Parallel reservoir simulators for fully implicit complementarity formulation of multicomponent compressible flows. *Computer Physics Communications*, 244:2–12, 2019.
- [41] H. Zhang and E. M. Constantinescu. Optimal checkpointing for adjoint multistage time-stepping schemes. *Journal of Computational Science*, 66:101913, 2023.
- [42] M. Zhang, H. Yang, S. Wu, and S. Sun. Parallel multilevel domain decomposition preconditioners for monolithic solution of non-isothermal flow in reservoir simulation. *Computers & Fluids*, 232:105183, 2022.
- [43] Y. Zhao, L. Zhang, and B. Shan. Mathematical model of fractured horizontal well in shale gas reservoir with rectangular stimulated reservoir volume. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 59:67–79, 2018.

Indução Covariante em Mudas de Alface com EM•1® Um Prospecto para Agricultura Familiar

Tatiana da Silva Aquino¹, Nilo Silvío Costa Serpa²

¹ Agrônoma, Centro Universitário ICESP, Brasília-DF; 92353280tatiana@gmail.com

² Gestor de Pesquisa e Inovação, Centro Universitário ICESP, Brasília-DF; Professor Titular do Mestrado Profissional em Desenvolvimento e Periferias, Universidade Santa Úrsula, Rio de Janeiro-RJ; niloserpa@icesp.edu.br

Resumo

O presente estudo discute a efetividade de um probiótico natural de baixo custo, o EM•1®, como agente atuante no crescimento e na qualidade das mudas de alface. De um ponto de vista epistemológico, trata-se de averiguar da capacidade do EM•1® para afetar positivamente determinadas conformidades morfológicas das referidas mudas, e, virtualmente, das mudas de outras hortaliças. Estas conformidades caracterizam simetrias, para análise das quais se instituiu um modelo de covariância, uma vez que as simetrias de um organismo são melhor entendidas pelas relações de interdependência entre suas partes. A pesquisa tem por finalidade social dar suporte a ações e políticas públicas direcionadas à agricultura familiar, instância produtiva ainda pouco beneficiada no Brasil.

Palavras-Chave: EM•1®; Mudas de alface; Crescimento; Covariância; Agricultura familiar; Sustentabilidade.

Abstract

This study discusses the effectiveness of a low-cost natural probiotic, the EM•1®, as an agent acting on the growth and quality of lettuce seedlings. From an epistemological point of view, the aim is to investigate the capacity of the EM•1® to positively affect certain morphological conformities of these seedlings, and, virtually, of seedlings of other vegetables. These conformities characterize symmetries, for the analysis of which a covariance model was established, since the symmetries of an organism are best understood by the interdependence relationships between its parts. The research has the social purpose of supporting actions and public policies directed at family farming, a productive sector that still receives little benefit in Brazil.

Keywords: EM•1®; Lettuce seedlings; Growth; Covariance; Family farming; Sustainability.

Received: _18 Nov 2024_ / Accepted: _04 Dec 2024_ / Published: _29 Dec 2024_.

Introdução

O consumo de hortaliças ainda é relativamente pequeno no Brasil. No início dos anos 2000, em uma comparação com países da América do Norte, por exemplo, consumiam-se nos Estados Unidos e no Brasil, respectivamente, 400 kg por habitante por ano, e 50 kg por habitante por ano (Moretti, 2003). Não há na literatura indicativos de que o cenário tenha sofrido alteração relevante até o momento. Ainda assim, o cultivo de hortaliças oferece ótima opção para pequenos empreendimentos brasileiros de agricultura familiar, contribuindo para o aumento da presença destes vegetais em uma mesa mais variada e saudável. Segundo o próprio SEBRAE, em sua elucidativa série Agricultura Familiar, “A produção de hortaliças é a atividade que mais se identifica como opção de agronegócio para os produtores rurais familiares.” (SEBRAE, 2011).

Nos últimos tempos, o Brasil tem se reafirmado como um país de economia basicamente agrária, sobretudo voltada à produção

em larga escala de *commodities*, sem dar a devida importância aos pequenos produtores, ou até mesmo asfixiando-os com enormes investimentos no grande agronegócio. Por conta desse gigantismo, da visão imediatista, e da ignorância ambiental endêmica no país, ainda prevalece um pensamento radicalmente contrário ao uso de bioprodutos de fertilização, proteção e saneamento, apoiando o uso de agentes químicos tóxicos a tais proporções que, em breve, será impossível a recuperação dos solos exaustos e densamente contaminados. Tais agentes são nocivos para a saúde humana, sendo fortemente veiculados pelas hortaliças.

Dentre as hortaliças, são numerosos os trabalhos sobre cultivares de alface, mormente até a primeira década do corrente século (Nagai, 1980; Mota *et al.*, 2003; Fiorini *et al.*, 2005; Grangeiro *et al.*, 2006; Filgueira, 2008; Hotta, 2008; Gualberto *et al.*, 2009). Em particular, são notáveis as pesquisas de Cruz *et al.* (1989) sobre adaptabilidade e estabilidade dos genótipos, úteis no estudo da cultivar de alface BRS Leila. Entretanto, análises

holísticas do crescimento de mudas de alface em compósitos probióticos, baseadas na covariância do desenvolvimento de suas partes, ainda constituem abordagens incomuns. O propósito deste trabalho é mostrar, por meio de uma análise holística de covariância, como é possível aprimorar uma cultura de alface aplicando um bioproduto de baixo custo que vem se mostrando eficiente em qualquer escala de produção: o EM•1®. O estudo realizado serve de modelo para pesquisas com outras espécies, difundindo os fundamentos de uma prática sustentável que deveria ser disseminada, pelo menos entre os pequenos produtores.

Contextualização

A alface (*Lactuca sativa L.*), pertencente à família *Asteraceae*, classe *Magnoliopsida* e ordem *Asterales*, é uma das hortaliças folhosas de maior relevância comercial e de maior consumo em termos globais. No Brasil, a cultura dessa hortaliça figura entre as mais expressivas no que se refere à produção, à comercialização, e ao valor nutricional (Oliveira *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2001).

Para a pesquisa realizada, foram usadas sementes da cultivar de alface crespa da EMBRAPA, denominada BRS Leila, com tolerância ao florescimento precoce (pendoamento), característica que aumenta a sustentabilidade do cultivo em regiões tropicais (EMBRAPA Hortaliças, 2018). A cultivar apresenta ainda ampla adaptação aos diferentes sistemas de produção, podendo ser cultivada tanto em campo aberto como em área protegida. Em função do formato cônico, ela também pode ser cultivada no sistema de produção hidropônico. A folhagem de BRS Leila tem coloração verde-oliva brilhante, ornamentada com um vistoso padrão recortado das margens foliares (EMBRAPA Hortaliças, 2018).

As plantas apresentam porte médio e caule grosso, facilitando a colheita e a manipulação pós-colheita. Em regiões de clima mais quente, o seu ciclo é de 35 dias e, em locais de clima mais ameno, de 45 dias. BRS Leila apresenta bons níveis de resistência aos nematoides-das-galhas (*Meloidogyne incognita* e *M. javanica*) e resistência a alguns patótipos do vírus do mosaico da alface (*Lettuce mosaic virus*) (EMBRAPA Hortaliças, 2018).

Materiais e Métodos

O EM•1® é um probiótico composto por microrganismos benéficos extremamente eficientes

nos processos biológicos em que atuam, desenvolvido no Japão pelo Professor Dr. Teruo Higa. De acordo com Mitsuiki (2006), essa biotecnologia tem se mostrado eficaz em práticas agrícolas sustentáveis desde a década de 80. No Brasil, é produzido e distribuído pela Fundação Mokiti Okada. Na prática, os princípios envolvidos são bastante simples, tendo-se inclusive conhecimento de um método caseiro para captura dos microrganismos benéficos e para produção do coquetel biológico, visando melhorias na nutrição e na qualidade das plantas, além de oferecer proteção às culturas contra o ataque de pragas e doenças (Andrade, 2011). Todos esses aspectos, além do baixo custo (consumo de cerca de 80 l/ha ou 100 ml/m³, a R\$75,00 o litro, hoje) tornam o EM•1® atrativo como componente essencial de um conjunto de orientações e procedimentos destinados a dar suporte à agricultura familiar. Dessa forma, o trabalho foi conduzido para avaliar a eficácia de diferentes concentrações do EM•1® no substrato, visando o crescimento e o desenvolvimento equilibrado das partes das mudas de alface. Os experimentos foram realizados nas dependências do Centro Universitário ICESP, unidade Águas Claras, Brasília-DF, em estufa e em laboratório. O efeito do tratamento com EM•1® na produção de mudas de alface foi avaliado a partir de variáveis como altura da planta total (APT), altura da parte aérea (APA), comprimento da raiz (CR), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), número de folhas definitivo (NFD), e porcentagem de germinação (PG).

Delineamento experimental

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro tratamentos X uma testemunha (grupo de controle), e três repetições, totalizando 15 parcelas experimentais. Após o preparo do substrato em diferentes compósitos, as sementes peletizadas de alface crespa BRS Leila foram deitadas nas bandejas de poliestireno de 128 células a uma profundidade de 5 mm, cobertas com vermiculita e dispostas em bancadas com TNT preto para retenção de umidade. O TNT, removido após 48 horas da semeadura (em 11/10/2024), deu lugar, a partir desta data, às aplicações de EM•1® na irrigação do tratamento T5, realizadas a cada dois dias até 07/11/2024, totalizando dez aplicações. Os demais tratamentos e o grupo de controle receberam irrigação normal. Estabeleceram-se diferentes concentrações de EM•1® no substrato das mudas de acordo com os seguintes compósitos:

T1: (grupo de controle) 1 Kg substrato puro;
 T2: 1 Kg substrato, 90ml de água, 10 ml EM•1® (1%);
 T3: 1 Kg substrato, 50ml de água, 50 ml EM•1® (5%);
 irrigação com EM•1® (5%).

T4: 1 Kg substrato, 100ml de EM•1® (10%);
 T5: 1 Kg substrato, 100ml de EM•1® (10%) +

As Figuras 1 e 1a ilustram as etapas de trabalho, bem como os ambientes de desenvolvimento.

Figura 1- Seleção do registro fotográfico da condução experimental do estudo.



Fonte: Acervo pessoal dos autores.

O EM•1® foi ativado no dia 16/09/2024, às 16:00 horas, combinando-se 250ml do probiótico e 250ml de melão em 4.5Lt de água, perfazendo 5Lt do composto. Após cinco dias de fermentação (21/09/2024), a solução foi aplicada ao substrato, sendo este armazenado em sacos plásticos opacos e expostos ao sol por mais cinco dias para eliminação de patógenos e aceleração da decomposição de matéria orgânica, tornando disponíveis os nutrientes necessários às plantas.

Conforme as medições climáticas efetuadas, durante o mês de setembro de 2024, a temperatura máxima variou de 30°C a 34°C, e a mínima de 11°C a 21°C, enquanto ao longo de outubro do mesmo ano, a temperatura máxima variou entre 29°C e 36°C, e a mínima entre 15°C e 22°C,

aproximadamente. Considera-se que, para uma boa germinação, a temperatura ótima deve permanecer em torno de 20°C. Foram realizadas duas sementeiras: a primeira, em 26 de setembro de 2024, sofreu adversidade devido às elevadas temperaturas; a segunda, em 08 de outubro de 2024, foi exitosa, em parte pela instalação de um sistema de irrigação com nebulizadores, e pelo rebaixamento das bandejas para conservação da umidade. Uma vez que as sementes de alface apresentam alta sensibilidade às condições climáticas, e que a maioria das cultivares não germinam em temperaturas superiores a 30 °C (Nascimento, 2016), acredita-se que o EM•1® tenha interferido no sucesso da segunda sementeira, embora essa suposição ainda necessite comprovação (Figura 2). As medições das temperaturas foram realizadas com termômetro digital.

Figura 1a- Seleção do registro fotográfico do controle ambiental do estudo.



Fonte: Acervo pessoal dos autores.

Modelagem, resultados e discussão

O uso da estatística tem sido criticado, desde os artigos de Cohen (1994) e Johnson (1999), pela frequente ausência de reflexão sobre “o quê” se quer entender (não “o quê” se quer provar) e, em seguida, sobre qual instrumento é mais apropriado para se buscar esse entendimento (por exemplo, quais testes foram idealizados para comparações *post-hoc* e quais o foram para comparações *a priori*), levando-se em conta a necessidade de significância prática acima da significância estatística. Uma vez que a estatística (disciplina) reúne um conjunto de técnicas para abordagem de conjuntos de dados, antes da escolha da técnica precisamos saber o que estamos procurando nestes dados. Isto exige a determinação de um ponto de partida, uma premissa racional, ainda que inicialmente em caráter provisório, tomada *prima facie*.

Neste estudo, a premissa básica adotada é que o ideótipo de planta saudável e própria para comercialização e consumo deve partir de uma muda que cresce, tanto quanto possível, desenvolvendo suas partes em conformidade umas com as outras, formando um conjunto funcional bem equilibrado. Não foi objeto da pesquisa discutir a fisiologia do crescimento vegetal, tão-somente estabelecer um modelo formal pelo qual se possa verificar se a simetria das plantas, suas dimensões

como a área superficial das folhas, ou mesmo a massa fresca destas, para uma dada variedade ou cultivar, em condições ambientais controladas ou antropizadas, estão covariadamente relacionadas com suas dimensões lineares. A estatística oferece ferramentas úteis de investigação quando lidamos com conjuntos de variáveis que refletem processos complexos como o crescimento e a diferenciação das partes constituintes de uma planta. Uma ferramenta interessante para verificar se o emprego do EM•1® corrobora a premissa acima descrita seria uma matriz de correlação, cujas componentes expressem o grau padronizado de interconexão do crescimento das diferentes partes da planta sob ação do bioproduto. Noutras palavras, isto nos leva a detectar o quanto uma característica morfológica pode influenciar outra, embora ambas, aparentemente, sejam independentes (Cruz e Regazzi, 1997), e se o EM•1® afeta essa influência. Dessa forma, foram estabelecidas 5 (cinco) tabelas com as médias das variáveis organizadas de acordo com os três blocos de medições considerados, A, B e C (QUADRO 1). A primeira tabela (T1), representando o grupo de controle, se refere ao cultivo sem aplicação do EM•1®. As tabelas T2, T3, e T4 se referem às aplicações no substrato de soluções com percentuais de 1%, 5% e 10% de EM•1®, respectivamente. A última tabela (T5) se refere ao percentual de 10% de EM•1® em solução para aplicação no substrato, mais 1% na água de irrigação.

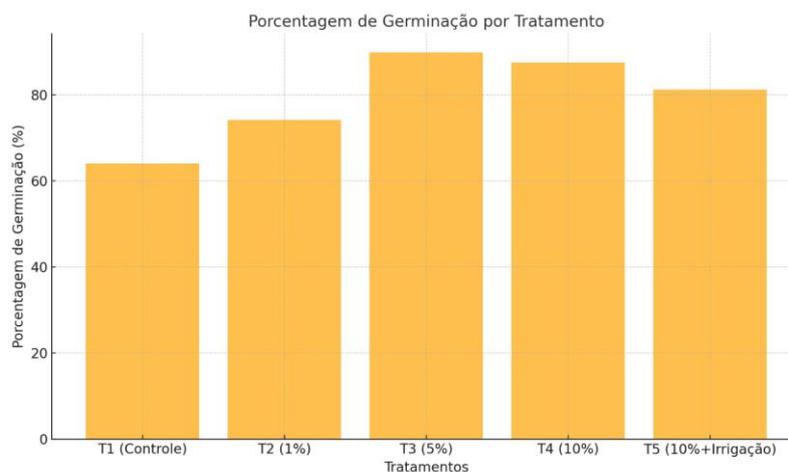
QUADRO 1 – TABELAS DAS MÈDIAS DAS VARIÁVEIS

T 1	APT(mm)	APA(mm)	CR(mm)	MFPA(g)	MFR(g)	NFD	PG
BLOCO A	121,38	34,587	88,665	0,21699	0,13256	3	59,37%
BLOCO B	130,387	33,594	96,509	0,19827	0,12165	3	43,75%
BLOCO C	126,38	37,584	96,508	0,22655	0,13687	3	64,10%
T 2	APT(mm)	APA(mm)	CR(mm)	MFPA(g)	MFR(g)	NFD	PG
BLOCO A	112,046	35,412	79,202	0,25195	0,18648	3	74,21%
BLOCO B	140,888	45,322	99,368	0,33429	0,15526	3	82,81%
BLOCO C	128,84	49,135	85,646	0,37472	0,16807	3	74,21%
T 3	APT(mm)	APA(mm)	CR(mm)	MFPA(g)	MFR(g)	NFD	PG
BLOCO A	127,137	35,403	94,014	0,24674	0,18248	3	80,46%
BLOCO B	135,582	45,885	95,782	0,36751	0,15753	3,4	71,10%
BLOCO C	143,646	51,205	104,079	0,3729	0,14679	3,2	89,84%
T 4	APT(mm)	APA(mm)	CR(mm)	MFPA(g)	MFR(g)	NFD	PG
BLOCO A	132,725	43,745	92,874	0,4766	0,33455	3,8	87,50%
BLOCO B	154,932	46,644	105,517	0,47741	0,30207	3,8	65,62%
BLOCO C	146,279	56,611	93,624	0,47996	0,24509	3,8	88,30%
T 5	APT(mm)	APA(mm)	CR(mm)	MFPA(g)	MFR	NFD	PG
BLOCO A	136,471	42,254	98,839	0,31228	0,21748	3,5	71,10%
BLOCO B	142,595	48,01	107,618	0,39303	0,18772	3,8	66,40%
BLOCO C	148,358	49,518	103,13	0,3202	0,18337	3,6	81,25%

Fonte: Elaboração dos autores.

APT: Altura da planta total; APA: Altura da parte aérea; CR: Comprimento da raiz; MFPA: Massa fresca da parte aérea; MFR: Massa fresca da raiz; NFD: Número de folhas definitiva; PG: Porcentagem de germinação.

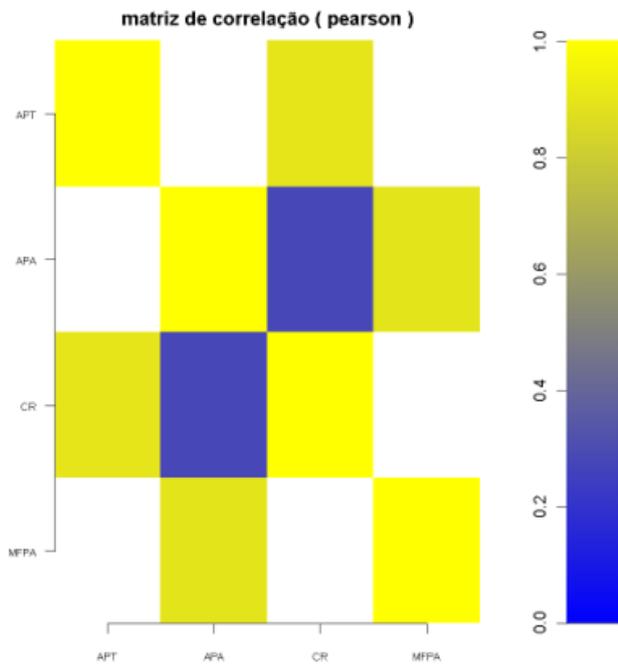
Figura 2- Comparação entre as proporções de germinação.



Fonte: Elaboração dos autores.

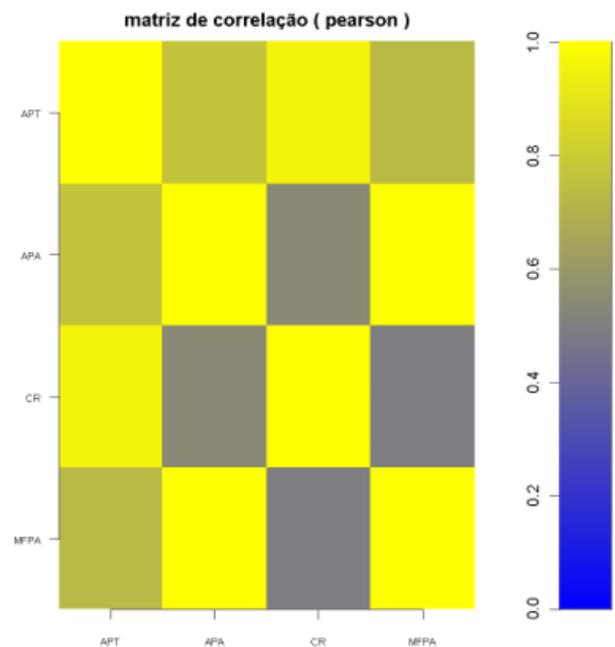
Aplicando a correlação de Pearson sobre as tabelas das médias de cada variável nos blocos, obtemos as seguintes matrizes gráficas:

MALHA T1



	APT	APA	CR	MFPA
APT	1.0000000	-0.1768612	0.8960868	-0.6011215
APA	-0.1768612	1.0000000	0.2783984	0.8928746
CR	0.8960868	0.2783984	1.0000000	-0.1839279
MFPA	-0.6011215	0.8928746	-0.1839279	1.0000000

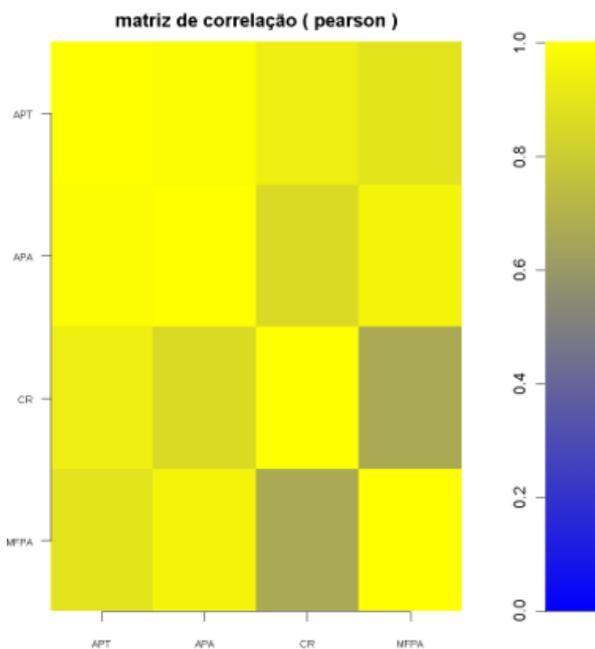
MALHA T2



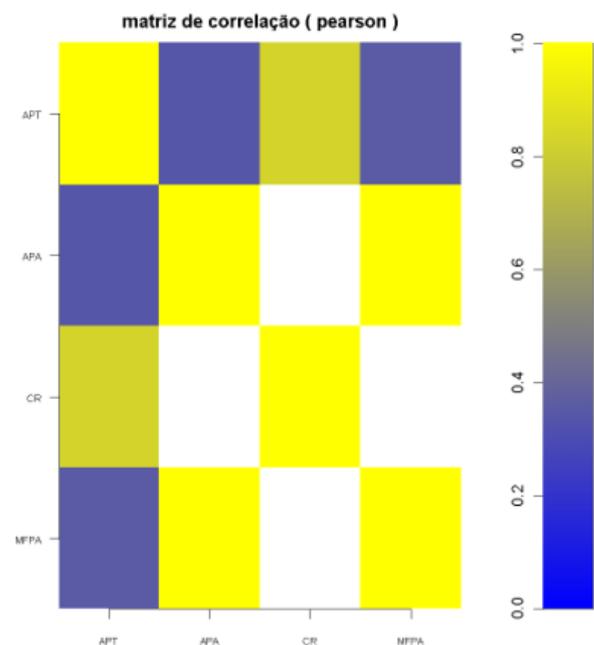
	APT	APA	CR	MFPA
APT	1.0000000	0.7639522	0.9552926	0.7262936
APA	0.7639522	1.0000000	0.5390151	0.9984042
CR	0.9552926	0.5390151	1.0000000	0.4905893
MFPA	0.7262936	0.9984042	0.4905893	1.0000000

MALHA T3

MALHA T4

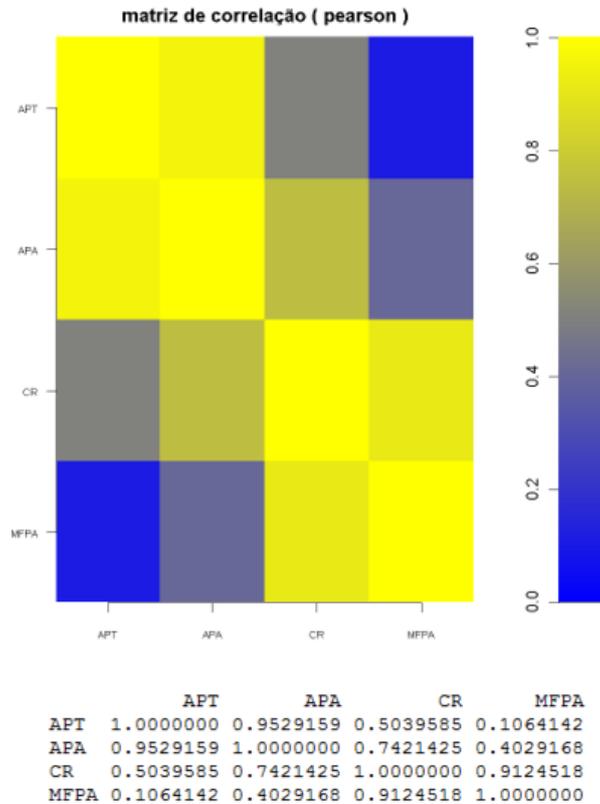


	APT	APA	CR	MFPA
APT	1.0000000	0.9850576	0.9317217	0.8904397
APA	0.9850576	1.0000000	0.8552519	0.9555143
CR	0.9317217	0.8552519	1.0000000	0.6643614
MFPA	0.8904397	0.9555143	0.6643614	1.0000000



	APT	APA	CR	MFPA
APT	1.0000000	0.3365031	0.8267784	0.3520960
APA	0.3365031	1.0000000	-0.2515090	0.9998621
CR	0.8267784	-0.2515090	1.0000000	-0.2354004
MFPA	0.3520960	0.9998621	-0.2354004	1.0000000

MALHA T5



Denominamos estas matrizes de “matrizes de ajuste anatómico” (MAA). Os valores das correlações correspondentes às malhas coloridas são fornecidos logo abaixo de cada malha. As diagonais principais são tautológicas, isto é, em cada entrada a variável interage com ela mesma. O algoritmo em **R**, com interface XML adaptada para operar com o tabulador **Tabwin**, foi desenvolvido por Serpa. A fórmula de Pearson é escrita como

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

onde

r = Coeficiente de correlação;

x_i = Valores da variável x na amostra;

\bar{x} = Média dos valores da variável x ;

y_i = Valores da variável y na amostra;

\bar{y} = Média dos valores da variável y .

A correlação de Pearson avalia de modo padronizado (normalizado) a relação linear entre duas variáveis contínuas, sendo aplicada quando a hipótese a ser testada é a de que há incrementos proporcionais entre as variáveis supostamente em interconexão. Observe que foram tomadas as quatro variáveis consideradas mais significativas para apreciação geral da forma das plantas (APT, APA, CR e MFPA). O retângulo em branco significa correlação negativa, isto é, uma variável cresce enquanto o seu par decresce; por exemplo, na malha T4, a altura da parte aérea (APA) diminuirá conforme se seleccione plantas com maior comprimento da raiz (CR).

Uma rápida análise dos resultados mostra que as melhores correlações tiveram lugar a partir do substrato tratado com solução a 5% de EM•1® (malha T3), com máxima correlação nos pares APA-APT, APA-CR e APA-MFPA, mostrando grande equilíbrio de crescimento da parte aérea das plantas e de suas raízes. À exceção da malha T2, que já exhibe uma interconexão significativa de crescimento com relação ao grupo de controle, as

demais matrizes apontam para baixas correlações, sugerindo que cada espécie deve possuir a sua MAA específica, a qual estará condicionada a uma dosimetria particular de EM•1®, caracterizando assim uma espécie de “sintonia fina” entre as variáveis.

Avaliando a diferença entre as malhas T1 e T3, pode-se dizer que, com substrato sob aplicação de solução a 5% de EM•1®, considerando a inversão das correlações negativas, o ganho médio em correlação, de T1 para T3, foi de aproximadamente 0.696149567 (~70%).

Uma análise de covariância preliminar mostrou resultados consistentes com as malhas, e a razão pela qual a variável MFR, tomada como

variável categórica, não aparece nas matrizes (QUADRO 2). O comprimento da raiz foi estatisticamente significativo na altura total da planta, considerando ou não a massa fresca da raiz, isto é, as raízes variaram sensivelmente em comprimento em ambas as condições (p -valor < 0.05). Assim, a massa fresca da raiz não foi determinante para a altura total da planta, nem para o próprio comprimento da raiz, o que significa que não há as relações lineares MFR-APT e MFR-CR (isso é compreensível se pensarmos que as raízes são estruturas ramificadas, de modo que suas massas podem crescer lateralmente, mais do que em altura).

QUADRO 2 – ANÁLISE DE COVARIÂNCIA PARA EXAME DA VARIÁVEL MFR – O Sumário de Cálculo 1 mostra influência significativa do comprimento da raiz sobre a altura total da planta¹ (p -valor = 0.03924), mas nenhuma influência da massa fresca da raiz sobre a altura total e sobre o comprimento da própria raiz (o efeito da massa fresca da raiz sobre a altura total da planta e seu reflexo sobre o comprimento da raiz são avaliados pelo teste usando “ * ” e não “ + ” na fórmula). O Sumário de Cálculo 2 (sem interação) também mostra influência significativa do comprimento da raiz sobre a altura total da planta (p -valor = 0.02806), porém nenhuma influência da massa fresca da raiz sobre o comprimento da raiz e sobre a altura total da planta (tabela [, 1] = APT; tabela [, 3] = CR; tabela [, 5] = MFR).

Sumário de Cálculo 1 (Bloco A, T3)

```
> summary(aov(tabela[,1] ~ tabela[,3] * tabela[,5]))
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tabela[, 3]   1 1504.62 1504.62  6.8983 0.03924 *
tabela[, 5]   1  618.58  618.58  2.8361 0.14315
tabela[, 3]:tabela[, 5] 1   72.97   72.97  0.3346 0.58402
Residuals     6 1308.68  218.11
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Sumário de Cálculo 2 (Bloco A, T3)

```
> summary(aov(tabela[,1] ~ tabela[,3] + tabela[,5]))
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tabela[, 3]   1 1504.62 1504.62  7.623 0.02806 *
tabela[, 5]   1  618.58  618.58  3.134 0.11998
Residuals     7 1381.65  197.38
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

No QUADRO 2, a análise de covariância (denominada ANCOVA) testa a relação entre as duas variáveis contínuas APT e CR para cada nível da variável categórica MFR. Em outras palavras, ela testa se os coeficientes das regressões lineares entre CR e APT são iguais

para as situações com e sem envolvimento de MFR. A coluna Pr(>F) fornece o nível de significância da influência da variável CR sobre a variável APT (retângulo vermelho). Por simplicidade, foi escolhido o Bloco A para ilustração dos cálculos. Resultados semelhantes

¹ Entenda-se que, ao contrário, quando se diz que a variável comprimento da raiz não afetou a variável altura total da planta, isto significa que, não em um único indivíduo, mas numa sequência de medições tomadas sobre vários indivíduos, o comprimento da raiz variou muito pouco no cômputo da altura total das plantas.

são encontrados para os demais Blocos. Em síntese, é sempre bom lembrar que covariância e correlação medem relações entre as variáveis, sendo que a diferença fundamental entre as duas consiste em que a correlação é normalizada ($-1 \leq r \leq 1$), indicando a intensidade da relação linear entre as variáveis. A covariância indica se há essa relação linear. A partir daí, a correlação é calculada dividindo a covariância pelo produto dos desvios-padrão das variáveis. Uma simples leitura da variância não permitiria um enfoque de precisão com respeito aos melhores efeitos do EM•1® no crescimento das mudas de alface, deixando uma conclusão pouco assertiva inclusive no que se refere à economia do processo produtivo.

Indução covariante

Uma forma de se pensar a influência do EM•1® no crescimento da planta é conjecturar a ação do bioproduto como sendo indutora de covariância morfológica, e, nesse sentido, sua aplicação na dosagem correta para a espécie teria

como resultado benéfico o desenvolvimento bem proporcionado da muda. Entretanto, como as próprias malhas sugerem, um pequeno erro de elaboração do composto pode acarretar efeitos aleatórios indesejáveis como correlações invertidas ou muito baixas, quando na verdade se esperaria que fossem significativas. O QUADRO 3 mostra um resultado oposto ao exibido no QUADRO 2 para o substrato não tratado com EM•1®.

Importantemente, a indução covariante promovida pelo EM•1®, se confirmada em outras cultivares, pode estabelecer um fundamento de pesquisa dentro de uma concepção estética da produção, reunindo qualidade, economia, segurança biológica, sustentabilidade e beleza na agricultura familiar brasileira do século XXI.

QUADRO 3 – ANÁLISE DE COVARIÂNCIA PARA EXAME DA VARIÁVEL MFR – Os Sumários de Cálculo 3 e 4 (sem aplicação do EM•1®) não mostram resultados significativos como os encontrados nos Sumários anteriores. Este achado é consistente com a hipótese da indução de covariância pela aplicação do bioproduto (tabela [, 1] = APT; tabela [, 3] = CR; tabela [, 5] = MFR).

Sumário de Cálculo 3 (Bloco A, T1)

```
> summary(aov(tabela[,1] ~ tabela[,3] * tabela[,5]))
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tabela[, 3]    1  31.10   31.10   0.1850 0.6822
tabela[, 5]    1   2.58    2.58   0.0153 0.9055
tabela[, 3]:tabela[, 5] 1  30.21   30.21   0.1797 0.6864
Residuals     6 1008.76  168.13
```

Sumário de Cálculo 4 (Bloco A, T1)

```
> summary(aov(tabela[,1] ~ tabela[,3] + tabela[,5]))
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tabela[, 3]    1  31.10   31.10   0.2095 0.6610
tabela[, 5]    1   2.58    2.58   0.0174 0.8988
Residuals     7 1038.97  148.42
```

Finalmente, a análise multivariada conduzida a partir de uma tabela de dissimilaridades (distâncias euclidianas representadas em cada variável com o prefixo “ δ ”) entre os registros de dimensões lineares das mudas do Bloco A, aplicando a função *scatterplot3D* do R, permitiu verificar graficamente que as dissimilaridades se distribuem em faixas bem definidas com respeito à malha T3 (Figura 4), contrariamente ao que se verifica em referência à malha T1, cuja distribuição é nitidamente aleatória (Figura 3). Além disso, podemos identificar na Figura 4 que a faixa de

dissimilaridades que concentra menos diferenças entre as medições em conjunto, e, portanto, denota maior equilíbrio entre as variáveis medidas, é a vizinhança de $\delta_{APT}=1$ (aproximadamente nos intervalos $0.8 \leq \delta_{APT} \leq 1.1$, $0.2 \leq \delta_{APA} \leq 2.8$, $0.1 \leq \delta_{CR} \leq 3.8$). Em suma, as diferenças mensuráveis entre as mudas cultivadas no composto de EM•1® a 5%, segundo as variáveis consideradas, devem respeitar os intervalos indicados para que se obtenha a seleção mais homogênea de plantas, isto é, a melhor expressão fenotípica com maior estabilidade de comportamento.

Sobre a significância prática dos testes implementados (para além da significância estatística)

O controle de qualidade é essencial em qualquer processo produtivo, assim como a economia de recursos e a minimização dos impactos negativos, caso existam, ao meio-ambiente e à saúde humana. O primeiro aspecto de significância prática do presente estudo é o de estabelecer um compósito de EM•1® que atende simultaneamente à técnica e ao custo, garantindo bons resultados em termos de qualidade das mudas com sustentabilidade e total adesão aos ritmos naturais do solo e de sua biota, sem qualquer interferência nociva. Em segundo lugar, a aplicação preconizada, simples e de baixo custo, se ajusta a políticas inclusivas de apoio à agricultura familiar, notadamente àquelas voltadas ao incentivo das culturas de hortaliças. Por último, o método e o modelamento adotados são rigorosos para garantir as claras diferenças entre as dosagens testadas, de modo a produzirem uma conclusão prática inequívoca dos resultados encontrados.

A escolha do ambiente e da linguagem **R**, mundialmente considerada uma das melhores ferramentas para análises estatísticas, permitiu a elaboração de códigos precisos e adequados ao estudo, evitando os equívocos que frequentemente são vistos, principalmente nas áreas que envolvem biologia. A combinação correta dos códigos aplicados assegurou a verossimilhança dos achados (programas erroneamente empregados podem fornecer p-valores errados; testes que não se aplicam *post-hoc*, como o de Bonferroni, podem levar a conclusões falsas). As matrizes de dissimilaridades foram construídas no ambiente **R** por meio da função *daisy*, com o objetivo de avaliar, pelas distâncias euclidianas entre os conjuntos de dimensões das mudas de alface, o melhor padrão morfológico a ser buscado na prática.

Dissimilaridades em T1 (Bloco A)

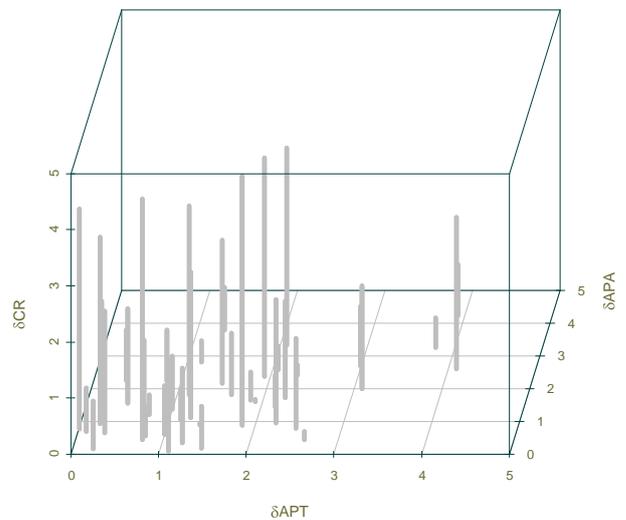


Figura 3 – Distribuição das dissimilaridades referentes à malha T1.

Dissimilaridades em T3 (Bloco A)

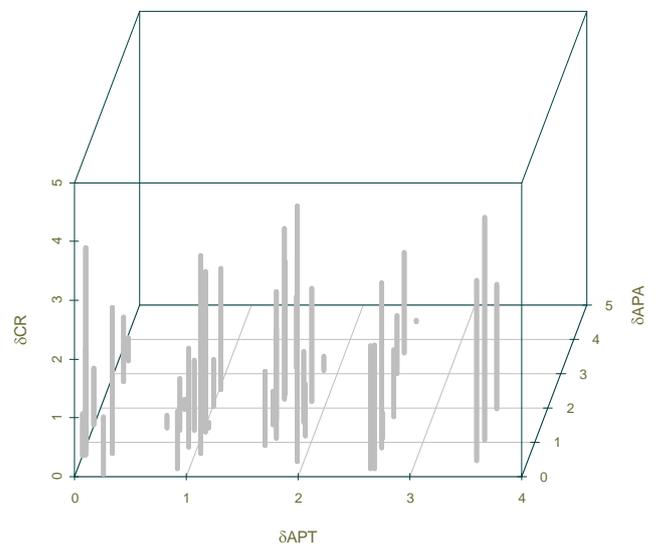


Figura 4 – Distribuição das dissimilaridades referentes à malha T3.

Limitações da pesquisa

Devido ao tempo disponível para condução do estudo (cerca de quatro meses, apenas), os resultados promissores alcançados devem ser corroborados pela continuação do projeto,

sobretudo por meio de propostas extensionistas de suporte à agricultura familiar.

Embora tenha apresentado indicação positiva sob aplicação do EM•1® (Figura 2), principalmente com relação ao tratamento T3, a germinação requer um estudo à parte, o qual, devido à complexidade do fator clima e ao tempo limitado para execução da pesquisa, não foi realizado.

Apesar do alto nível de controle dos experimentos efetuados, alterações climáticas durante a fase inicial do projeto podem ter provocado pequenas variações nas medidas esperadas para as variáveis em questão. Além disso, as instalações externas oferecidas, compartilhadas para a execução de outro experimento em paralelo, podem, ocasionalmente, ter facilitado algum grau de contaminação, ainda que pequeno.

Conclusão

O presente artigo mostrou consistentemente que o EM•1® pode influenciar a correlação entre aspectos métricos de plantas cultivadas em substrato sob sua aplicação, sugerindo se tratar de um agente biológico benéfico para o processo produtivo de alfaces, e, por extensão, de outras hortaliças, desde que aplicado em doses adequadas para cada espécie, e desde que se queira obter espécimes rigorosamente bem proporcionadas. No contexto do método aplicado, o estudo apresentou a ideia inovadora de indução covariante, um princípio ou hipótese a ser exaustivamente testada em outras culturas, sendo útil para pesquisas em produtividade e sustentabilidade que envolvam o emprego de bioprodutos. É importante frisar que, no caso específico da alface, a qualidade das mudas em sistemas produtivos de grande escala deve se beneficiar de técnicas adicionais, tais como o escalonamento de plantio, com intervalos de 15 dias, além das boas práticas de espaçamento de plantio.

Referências

ANDRADE, F. M. C. **Cadernos dos microrganismos eficientes (EM)**: Instruções práticas sobre o uso

Espera-se que o estudo realizado inspire continuidade no meio acadêmico e desejo de construção de programas de apoio à agricultura familiar, servindo como referência para pesquisas destinadas a cultivares diversas, incluindo espécies silvestres. Um prospecto de pesquisa pertinente seria o desenvolvimento de estudos comparativos entre os resultados do EM•1® e aqueles reportados por pesquisas relativamente recentes sobre substratos alternativos (Fernandes *et al.*, 2020; da Silva *et al.*, 2020).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário ICESP pelo apoio à esta pesquisa, oferecendo suas instalações e recursos operacionais para a execução dos experimentos necessários, e ao Sr. Divino Rodrigues Romeiro, empresário do agronegócio, pelo suporte técnico durante as tarefas externas e de laboratório.

Contribuições dos autores

A partir da escolha em consenso do tema, embora cada autor tenha se responsabilizado pela condução de determinadas atividades, todas estas foram realizadas de maneira dialógica e interativa, com intensa participação de ambos.

Tatiana da Silva Aquino

- a) Planejamento e execução experimental;
- b) Pesquisa e documentação das etapas do projeto;
- c) Elaboração da primeira versão do texto.

Nilo Serpa

- a) Método e modelamento dos dados;
- b) Interpretação e discussão dos resultados;
- c) Versão final do texto.

ecológico e social do EM. 2 ed. Viçosa: [s.n.], 2011. 32p. Disponível em: <<http://estaticogl.globo.com/2014/04/16/caderno-dos-microorganismos-eficientes.pdf>>.

COHEN, J. The earth is round ($p < .05$). **American Psychologist**, v. 49, nº 12, p. 997-1003, 1994.

CRUZ, C.D.; TORRES, R.A. de; VENCOVSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva and Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, v.12, p.567-580, 1989.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético, Viçosa, MG: UFV, 1997, 390 p.

DA SILVA, M. H.; DE LIMA, M. S.; FERREIRA, A. B.; SOUZA, R. B.; DO NASCIMENTO, M. M. Cultivo de alface utilizando substratos alternativos. **Scientia Naturalis**, v. 2, n. 2, 2020.

EMBRAPA. Cultivares de alface (2018). Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-desolucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4224/alface-brs-leila>.

FERNANDES, P. H.; PORTO, D. W. B.; FRANÇA, A. C.; FRANCO, M. H. R.; MACHADO, C. M. M. Uso de fertilizantes organominerais fosfatados no cultivo da alface e de milho em sucessão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 37907-37922, 2020.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2.ed. rev. Viçosa: UFV, 2008. 402p.

FIORINI, C.V.A.; GOMES, L.A.A.; MALUF, W.R.; FIORINI, I.V.A.; DUARTE, R. de P.F.; LICURSI, V. Avaliação de populações F2 de alface quanto à resistência aos nematóides-das-galhas e tolerância ao florescimento precoce. **Horticultura Brasileira**, v.23, p.299-302, 2005.

GRANGEIRO, L.C.; COSTA, K.R.; MEDEIROS, M.A.; SALVIANO, A.M.; NEGREIROS, M.Z.; BEZERRA NETO, F.; OLIVEIRA, S.L. Acúmulo de nutrientes por três cultivares de alface cultivadas em condições do Semiárido. **Horticultura Brasileira**, v. 24, p. 190-194, 2006.

GUALBERTO R.; OLIVEIRA, P.S.R.; GUIMARÃES, A.M. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de alface do grupo crespa em cultivo hidropônico. **Horticultura Brasileira**, v. 27, p.07-11, 2009.

HOTTA, L.F.K. **Interação de progênies de alface do grupo americano por épocas de cultivo**. 87p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008.

JOHNSON, D. The insignificance of statistical significance testing. **Journal of Wildlife Management**, v. 63, nº 3, p.763-772, 1999.

MITSUIKI, C. **Efeito de sistemas de preparo de solo e do uso de Microrganismos Eficazes nas propriedades físicas do solo, produtividade e qualidade de batata.** 2006. 98p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-26022007-151401/pt-br.php>>

MOTA, J.H.; YURI, J.E.; FREITAS, S.A.C. de; RODRIGUES JÚNIOR, J.C.; RESENDE, G.M. de; SOUZA, R.J. de. Avaliação de cultivares de alface americana durante o verão em Santana da Vargem, MG. **Horticultura Brasileira**, v.21, p.234- 237, 2003.

NAGAI, H. Obtenção de novas cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.) resistente ao mosaico e ao calor. **Revista de Olericultura**, Campinas. v.15, p.14-21, 1980.

NASCIMENTO, G. R. **Estimativas de parâmetros de adaptabilidade e estabilidade de genótipos de alface (*Lactuca sativa* L.) em diferentes épocas e condições de cultivo.** 2016. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2016.

OLIVEIRA, E. Q. DE et al. Produtividade de alface e rúcula, em sistema consorciado, sob adubação orgânica e mineral. **Horticultura Brasileira**, v. 28, p. 36–40, 2010.

SEBRAE. Série Agricultura Familiar (2011). Coleção Passo a Passo – Alface. Disponível em <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RN/Anexos/Horticultura-Serie-Agricultura-familiar-Alface.pdf> .

SOUZA, R. B. DE et al. **Composição do Hortbio.** Brasília - DF. Embrapa Hortaliças - CNPH, 2012.

SOUZA, A. R. R.; MIRANDA, G. V.; PEREIRA, M. G.; FERREIR, P. L.; **Correlação de caracteres de uma população crioula de milho para sistema tradicional de cultivo**, *Revista caatinga [online]*, v. 21, n. 4, p. 183-190, 2008.

A Human-Directed Bolide Impact-Dug Mars *Funnel City*

Richard B. Cathcart

GEOGRAPHOS, Burbank, California, USA

rbcathcart@gmail.com

Nilo Serpa

L'Académie de Bordeaux; L'Académie de Paris; Centro Universitário ICESP, Brasília

Received: _20 Oct 2024_ / Accepted: _08 Nov 2024_ / Published: _29 Dec 2024_.

Abstract: So far most publicly merchandized macro-engineering plans specifically designed to terraform Mars are impossible of achievement because Mars naturally lacks adequate physical resources allowing completion of that transformative anthropogenic event-process. These undoable plans fall mainly into two classifications: (I) artificial build-up Mars' natural gaseous shell and (II) using capacious buildings to create a pressurized carapace civilization. In other words, to-date, all Mars terraformers are really thinking only as Earth counterfeiters who cannot ever gift humankind with a totally made-over Mars suitable for long-term settlement by humans. We suppose another, feasible, non-terraforming macro-project plan option, the rapid excavation of a single deep pit by successive timely big bolide bombardment. Such impacts cause anthropogenic erosion with some material leaving Mars forever. Funnel City, the subsequent deep pit will gravitationally attract most of Mars' enshrouding ambient gases. The concentrated and densified gases within the deep hole might result in many Earthlings inhabiting safely a permanent exploration and exploitation Mars Base, the Funnel City. In effect, after the completion of this suggested macro-project, the extra-pit territory of Mars then may still closely resemble the present-day rocky and dusty surface of our Earth's biggest natural satellite, the Moon. Funnel City can become the "dockyard" for Jack Smith's Mars-centered Dyson Swarm used to send extra-terrestrial power to Earth's populace.

Keywords: Mars city, excavation technology, technogenic induced bombardment, Macro-Imagineering, Dyson Swarm.

Resumo: Até agora, a maioria dos planos de macroengenharia difundidos publicamente, projetados especificamente para terraformar Marte, são impossíveis de serem realizados porque Marte naturalmente carece de recursos físicos adequados que permitam a conclusão de um processo antropogênico transformador. Esses planos irrealizáveis se enquadram principalmente em duas classificações: (I) construção artificial da concha gasosa natural de Marte e (II) uso de edifícios espaçosos para criar uma civilização de "carapaça pressurizada". Em outras palavras, até o momento, todos os terraformadores de Marte estão realmente pensando apenas como falsificadores da Terra, os quais nunca poderão presentear a humanidade com um Marte totalmente reformado, adequado para assentamento humano de longo prazo. Conjecturamos uma alternativa viável, não terraformadora: a escavação rápida de um único poço profundo por bombardeio sucessivo de grandes bólidos. Tais impactos causam erosão antropogênica com algum material deixando Marte para sempre. O poço profundo subsequente, atrairá gravitacionalmente a maioria dos gases ambientais que envolvem Marte. Os gases concentrados e densificados dentro do poço podem resultar em condições ambientais satisfatórias para terráqueos habitando com segurança uma Base de exploração permanente em Marte, a *Funnel City*. Com efeito, após a conclusão deste macroprojeto, o território extrapoço de Marte pode ainda se assemelhar muito à superfície rochosa e empoeirada atual do satélite natural da Terra. *Funnel City* pode se tornar o "estaleiro" para o Dyson Swarm centrado em Marte de Jack Smith, usado para enviar energia extraterrestre para a população da Terra.

Palavras-chave: Cidade em Marte, Tecnologia de escavação, Bombardeio induzido por tecnogênicos, Macro-imagineering, Dyson Swarm.



1. Introduction

At the present-time, Earth's bioshell remains humankind's only truly spatially voluminous species survival unit—our real-world “Spaceship Earth”. In Geography's outdated and confusing academese parlance, “space” is a homonym denoting both our planet's bioshell and the cosmos' isolating void — indicating absence of macroscopic and microscopic things as well as vacuity — situated between planetary and all other celestial bodies within our Solar System as well as this Universe as observed by humans and by means of their progressing technologies. A close examination, and scientific measurements of, seem nowadays to indicate the Earth-bioshell is operating partially, not wholly, in a way never represented by the common term Nature [1-2]. The charismatically neoteric James Lovelock (1919-2022) supposed, in *Novacene: The Coming Age of Hyperintelligence* (2019) self-engineering cyborgs and human macro-project planners will soon work cooperatively together to preclude a massive degradation of our current planetary bioshell homeland, a reduction of its carrying-capacity primarily caused by biotic and AI-life adverse worldwide air warming to $>50^{\circ}$ C. Barring apocalyptic, anti-civilizational, mass genocidal and homicidal goals of deranged humans, in Chapter 20, Lovelock bluntly alleges “Above 50° C the whole planet moves to an [bioshell] environment that is corrosively destructive”. Any people-settled world's carrying-capacity can be increased as human civilization's required bioshell operating technologies progress and if, in real-time, they are linked thoughtfully to incorrupt politics [3]; most of our Earth civilization's large-scale urban inhabitations and work-places already resemble air-locked and air-conditioned ships, hence the appropriateness of the term carrying-capacity.

The phrase Geo-engineering evokes proactive management of Earth's air by de-pollution, whereas Terraforming ordinarily evokes ideas about polluting a planet's atmosphere like, say, Mars with an anthropogenic instigation of gaseous carbon dioxide build-up brought about by proficient 21st Century macro-engineers, both remotely and on-site. If so, carbon dioxide management, at least for Earth's human populace, will become one of the largest industries in our world's globalized economy, more than equivalent in geographical scale to food production, extraction of basic construction materials and exhumation of fossil fuel energy resources! Gaseous carbon dioxide may be extracted directly from Earth's air by quasi-natural methods or by ever-developing technologies but mere storage in the Earth-crust's geological strata would result in no product to sell that could offset the costs of aerial subtraction. Using Space Elevators [27], might solidified carbon dioxide be shipped to Mars someday? An impact at Amazonis Planitia — 38.80° N by 189.92° E — by object S1094b on 24 December 2021 produced a roughly circular crater of diameter ~ 150 meters and depth of ~ 21 meters that exposed a subsurface ice stratum. Ballistic impacts on the Red Planet, no matter their angle of impact, will always generally produce almost circular craters that may be otherwise useful in terms of infrastructure satisfaction requirements of future teamed settlers' survival.

In this Solar System, our still photogenic Blue Planet homeland is an odd celestial object—in fact, a remarkable “oddball” because it is so physically dissimilar to all other terrestrial-type planets in the vicinity such as Mars, Venus, and Mercury. Many space-travel investigators usually portray Mars as an economically attractive, even environmentally receptive (in terms of already known exploitable resources), future planetary destination for very hardy and capable humans accompanied (as independent co-workers) by versatile AI robot explorers [4-6]. (No slavishly corporatized person or intellectually curtailed, composite intentionality AI robot [7] will ever waste time and energy seeking ore-deposits of the fictitious “tribinium” central to the tale of 1990's popular cinema *Total Recall!*) Mars' mean atmospheric temperature is minus 60° C. Yet, a cadre of bold geo-scientists and star-struck macro-imagineers still advocate the transformation of Mars from its current inhospitable state into a habitable world by means of a series of complex and costly technological interventions dubbed “Terraforming” necessary to regenerate Mars' presently naturally thin atmosphere. Their intention is to successfully

replicate our oddball Earth's air resource, to fully manage its sub-aerial landscape, all within the purely imaginary context of an envisioned Mars-world macro-problem schema [8]! "Thin atmosphere" is an accurate description of that planet's unbreathable gaseous envelope's insubstantiality — in fact, it is a shell — and an indicator that whenever humans need to breathe from an artificial planet-covering open-source of so-called air, every inhalation will have a significant monetary price!

The term Areography, first brought into linguistic use during 1868 by Richard Anthony Proctor (1837-1888), modifies the word Geography by substituting the ancient Greek place-name for Mars [9]. Most peculiarly, at the same time that NASA spends copious amounts of USA taxpayer-derived funds to enhance the weather and climate resilience — including the postulated future drastic effects of a postulated global sea-level rise — of its important Space Age installations already permanently located within the Earth's bioshell [10], some obsessive Mars terraformers hypothesize a strange new Solar System world's creation utilizing various hopelessly old-fashion technical fixations as a foundational basis for their dramatically expressed aspirational thoughts! Mars is a life-hostile planet, even more than fictional Arrakis in Frank Herbert's *Dune* (1965). One contrarian critic for example, says: "We might have the technology to establish a human colony on Mars by the 2040s but how sensible will farms be in the 2060s when 3D printers can manufacture any physical object with atomic precision, including food? How sensible will trudging around in space-suits and living in domed habitats be in the 2080s when humans can upload their minds into non-biological bodies? How sensible will it be in the 2100s and beyond for humanity to explore the vastness of space as Homo sapiens instead of, say, sentient starships or clouds of nanobots?" [11]. Also, taxpayers would be wise to re-consider the monetary costs of the Apollo Mission Program: the total USA dollar cost of creating the enabling infrastructure for the first humans to visit the Moon amounted to ~300 billion dollars, adjusted to 2022-US dollar valuation! In this Ernst Mach-style *gedankenexperiment* article, we will examine, and seek out a substitution for, the common Terraforming zombie concept entailing a total Mars atmosphere gaseous augmentation as a *needed* macro-problem solution. The macroproject suggested, the *Funnel*, will be a *Gesamtkunstwerk* larger than Anselm Kiefer's unfinished >80 hectare *La Ribaute* located near Barjac, southern France, commenced during 1992. An urban Mars enclosure, the *Funnel*, may be soon added to the narrative shorthand for futuristic settlements in science-fiction! While tall smokestacks produced long-range air pollution in Earth's atmo-shell, its inversion, the *Funnel* could have the opposite effect on Mars where liquid water is not commonly present at the base of hill-slopes and, thus, the anthropogenic rapid reduction of pressure everywhere outside of the *Funnel* could stabilize soils and prevent transformative landslides — leaving only natural space weather effects and space debris strikes as the essential causes of surficial regolith turnover. Of course, humans may mar the Red Planet's surface with wheeled and tracked trails, rocket blast scars and possibly even railways.

2. GASP!

The late James Lovelock proposed, in *The Ages of Gaia* (1988), Homo sapiens' use of Earth-banned chemical factory formulated and manufactured greenhouse gases, injected into Mars' thin, freely-circulating atmosphere, to thicken that shell-like biota-protective layer resting atop the ocean-less planet's contemporary perfect areo-morphology by vaporizing Polar Zone dry-ice deposits [12]. Biota, someday perhaps only forms of so-called Synthetic Life [13], might flourish in the arid Red Planet if the contents and density of its outer space-exposed atmosphere's temperature were raised, thereby increasing its global atmospheric pressure, and reducing the effectively sterilizing UV-radiation presently reaching the surface unhindered [14-15]. Since, more and more, technologies are becoming the environment itself, even global meteorology, most humans now live in semi-capsulized mechanical and electronic "smart cocoons" [16]; a turn-of-the-century published study [17], for instance, revealed that North Americans spent only 7.6% of their lifetimes outdoors! So, in a very real sense, and technically-speaking as well, most North Americans as well as others elsewhere are nowadays almost fully ensconced everyday inside

gadget-rich technologized indoor cocoons! A near complete — the Polar Zones are excluded as well as the summit of Olympus Mons — Mars enclosure — in effect, a macro-engineered structural carapace — named “Mars Worldhouse” by its UK inventor Richard Taylor (1931-2018) involves the construction of an implanted contained bioshell wherein a 3 km-thick stable, dense, and breathable air-layer is prevented from escaping the planet by the monstrous will-anchored inflated building’s impermeable roof. (Imagine Olafur Eliasson’s 2002 “The Weather Project” artwork installed at the Tate Modern gallery, but done at voluminosely gigantic scale in Mars!) For Taylor, the interior is the overriding architectural principle because it results in the humanization of a Universe-exposed “wilderness”, converting it into an enclosed “world”. The conceptual and mathematical history of Taylor’s extraordinary monumental architectural notion is accurately recounted in the practical instructive tome by Martyn John Fogg, *Terraforming: Engineering Planetary Environments* (1995). Taylor never introduced any technology for the Mars Worldhouse’ post-installation defense from continuously infalling cosmic debris [18], the smoke from which often causes clouds in the planet’s pinkish-colored sky! Nor does he speculate on the advent of purposeful AI robots by Earthlings which are unlikely to be restricted in their actualized doings to only one Solar System celestial body. Only ~10,000 kg of artificial objects currently sits on Mars, so far. However, if built, “Mars Worldhouse” must exceed the mass of all known anthropogenic stuff today existing in the Earth-bioshell by millions of metric tons [19-20]; Homo sapiens and its AI robotic co-workers would then be obliged to distinguish an areographic support proportionate to the operation of the “Mars Worldhouse” [21]. More frequently lately, the monetary cost of Earth’s putative impending or ongoing global air warming is guesstimated at ~US\$ 1.4 trillion/year by 2100 [22]. At page 71, the IPCC WGII AR5 Technical Summary suggests that “...the incomplete estimates of global annual economic losses for additional temperature increases of [the putatively dangerous] ~2⁰ C are between 0.2 and 2.0% of income (+ or – standard deviation around the mean) ...”. Unlike James Lovelock, the IPCC WGII AR5 offers no maximum safe atmo-shell temperature for Earth’s bioshell. As of 2019, James Lovelock asserted in Chapter 16, that “In reality the Novacene...is about engineering”; in Chapter 19 he added: “Then the main inhabitants of the Novacene will be humans and cyborgs” that are imbued with a vitally important mind connection Lovelock deemed worthy of the descriptive phrase “loving grace” in Chapter 20. (However, see [23-24].)

3. Ocean(s) here and there

Regarding Earthly global sea-level rise associated with the air’s warming [25], whether anthropogenic or not, let us fantasize a Mars-focused “cure” that is almost an imaginative match for Richard Taylor’s impractical Mars Worldhouse masterplan. (Although Mars is observed visually to be the color of iron-rust, there may be only a limited resource of reduced iron available on the surface derived from meteoric nickel-iron useful in the fabrication of composite metal foam which is effective shielding from ballistic impacts, X-rays, gamma rays and neutron radiation [26]. Could robotic AI Martians be composed of such protective material too?) Purportedly, Mars in its past Geologic Time had several vast bodies of water present on its subaerial surface — in the Northern Hemisphere’s plain, Hellas and Argyre basins. Unhesitatingly, most semi-professionalized terraformers confidently claim, rather wishfully we think, that anthropogenic ocean(s), in the near-term future, can be made present on Mars transmogrified future surface. As Earth’s assorted rivieras are submerged by our planet’s unstoppable rising ocean, new places of beach frolic might be established on Mars, or so this fable is usually told. Nevertheless, let us suppose that a Space Elevator [27] is erected which lifts and passes seawater-filled cargo pods through the Earth-bioshell into outer space’s hard-vacuum where the pods of oceanic saltwater are then spacially transferred, by some unspecified means, to eventually “splashdown” on Mars. Generally, it is supposed the if both Polar Zone ice-caps of Earth melted the runoff would increase global sea-level by ~70 m, amounting to an additional seawater volume of $2.52 \times 10^7 \text{ km}^3$ spread over an area of 360,000,000 square kilometers. (One cubic meter of seawater equals slightly more than one metric ton, indicating a total additional mass of 2.52×10^{16} metric tons. Earth’s crust will respond to mass loading

and unloading in ways currently unfathomable by existing Science.) If we assume each seawater-laden standardized pod payload consists of $\sim 8 \text{ m}^3$, or ~ 8 metric tons, and just one seawater pod achieves Earth bioshell exit daily, then 3.15×10^{15} pod-trips would be required to remove Earth's Homo sapiens' unwanted, excess Earthly seawater volume! Whilst in space, insulated pod contents will become slushy, bubbly and eventually frozen [28]; a seawater "iceteroid" [29] pod will be a partially heat-shielded chloride-rich anthropogenic bolide which would increase the levels of HCL in Mars's thin atmosphere whenever or if it shattered before hitting the surface. Shifted to Mars' surface without intervening mass loss due to pod leakage, multiple pod depositions therein could create an 144,799,000 square kilometer ocean ~ 175 m in depth after precipitation! Total pod vaporization in Mars' atmosphere during that period of the transfer process might produce little superficial areo-physical crust record — however, circulation of the planet's wispy atmosphere [30], Nature's pre-modification weather regimes, should change noticeably after massive podded seawater transference. Globe-obscuring pre-"Mars Worldhouse" dust storms such as that observed during May-June 2018, foster the natural exportation of Mars's increasingly scarce water-vapor to adjacent outer space [31], so perhaps fewer dust storms in the future will be beneficial in the sense of the prolongation of the climatic clemency of a markedly drying terrestrial planet's atmosphere. But $3,150,000,000,000,000$ pod Earth-exportation trips equals 3.15×10^{15} days, or 8.6×10^{12} years! So, perhaps only AI robots blessed with sturdy metallic physical constitutions will ever opt to await a new, but rather small vacation beach-spa's establishment on Mars prior to the bloated Red Giant Stage Sun vaporizing the whole Earth after dissolving Mercury and Venus. But, of course, only if such post-biological persons are interested in or able to benefit from any outdoor recreation *in* a planet [32]!

4. What shall be done with Mars' apparently useful areography: The Mars Base *Funnel Optopia*?

In at least one notable instance, the North American anthropologist Clifford Geertz (1926-2006) defined human culture in a very memorable brief sentence: "...man is an animal chained by the web of meanings he himself has conceived" [33]. Whenever it is built, Mars Base *Funnel* will exemplify the epitome of new technology, emphasizing the role of virtual reality in contrast to today's material reality; Mars Base will control mobile drones capable of engaging in activities that would be too dangerous for real people to undertake. We think a proper and cost-effective Mars terraforming must entail the zombification of a useful Solar System planet, Mars. Zombification means induced ageing instead of rejuvenation. In our postulated macro-project plan for deliberate areo-gouging with trajectory-guided bolides, perhaps best named "Mars Rams," which impact the surface of Mars will create a human-cyborg dominated *Funnel Optopia* — the optimum possible teamwork environment. Rather tiresomely, Terraforming's current popularizers put forth thickening of Mars' entire atmosphere as the *only* means by which achieve the necessary atmoshell Armstrong Limit — the absolute intra-aerial limit beyond which the human-body, at least as presently constituted — that is, without any genetic or prosthetic enhancements [34-35] — cannot survive without a sealed pressure-suit fitted with all the equipment to maintain a suitable mini-environment — a self-propelled walkable "room" as it were — for its live and active wearer.

The average atmospheric pressure in Mars is ~ 6.1 mb and the pressure at Mars' topographic lowest place, the -6,000 m Hellas Planitia as measured from Mars' internationally agreed base-datum, is ~ 10 mb. The Armstrong Limit is 62.8 mb! Named to honor Dr. Harry George Armstrong (1899-1983), he was first to realize that below 62.8 mbar, the fully exposed human-body's fluids (saliva, tears, urine, non-vascular blood as well as the liquids wetting our lung alveoli) will boil and evaporate, leaving that unfortunate person quite dead within a few minutes! The *Funnel Optopia*'s materialization obligates us to require new definitions of "human" as well as post-Homo sapiens "human." Andeans and Tibetans [36] seem pre-adapted to Mars and even allegedly disabled persons can successfully fulfill vital tasks in outer space and within Mars' planetaric environs. Imagine predesignating species in purely locative terms: (I)

Earth humans as “Homo terrans”; (II) normal or enhanced Mars humans as “Homo ares” and (III) self-engineering cyborgs as post-Homo sapiens “AI robots”. (We have in mind, too, that AI robots ought to be sub-divided into a species habituated to celestial object gravities as well as a species habituated strictly to the Universe-wide conditions of hard-vacuum outer space, interplanetary and interstellar.) Humans, whether dwelling in the Earth or in Mars, basically, annually require ~1.3 metric tons of sustaining mass (food, > 1 cubic meter of freshwater per person et cetera). *In situ* support mass for humans residing on Mars will require inflatable, well-anchored Mars surface greenhouses, repairable balloons within which are grown nutritionally safe foods [37] whilst humans work and play most of the time inside natural caves and/or dug tunnels [38] just to avoid lethal solar and cosmic irradiation! Neither existential prospect is truly appetizing, comfortable, or entertaining for all but a few weird, strange, or exotic Earthlings, even those persons specially physiologically trained or psychologically conditioned. Landscape exploration, industrialized exploitation and necessary farming is arduous work requiring, minimally, great dedication and determination by all living participants.

The unique shell-like crusts of Earth and Mars differ in their mineral contents and relief — that is, topographic range (highest and lowest elevations) — with Earth having a range of ~20 kilometers whilst Mars’s range is ~30 km. [The astronomer Charles Dillon Perrine (1867-1951) postulated “The Origin of the Earth’s Land Formations” in the 6 September 1940 issue of *Science*, Volume 92, Number 2384, pages 210-212; since then, it is now known that Moon as well as Mars have very similar lithospheric dichotomies.] That physiographic difference means there is a useful areomorphic transformational opportunity to be decisively advanced in our *gedankenexperiment!* Mars’ two moons, the largest is Phobos and its smaller companion Deimos, are oddities probably not originating from a split larger precursor Mars satellite. **Figure 1.** Phobos orbits below the synchronous limit (20400 kilometers) and Deimos above it. Deimos (mass = 1.47×10^{15} kilograms; Volume is 1017 cubic kilometers), which moves from east to west east in eleven hours, is at present receding from Mars while Phobos (mass = 1.06×10^{16} kilograms; Volume is 5742 cubic kilometers) moves from east to west in 30 hours. Proposals have been offered to make hollow the moons of Mars to serve humans as shirt-sleeve Mars Space Stations. Their suitability for such a role may increase or decrease depending on future analysis by structural macro-engineers. In summary, a multiscale, comprehensive report of those rocky settings and their natural structural architecture is fundamental for any future site-specific, appropriate Space Station development.

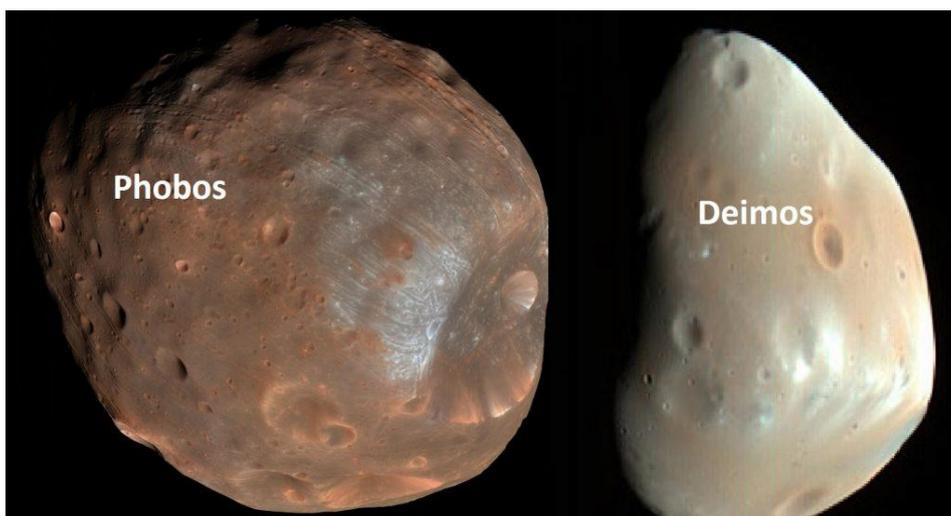


Figure 1. Mars’ non-twin natural satellites (Source: Google Images).

WHAT IF.... a very deep hole (pit) in a chosen landscape mobilized, in part, by gravity-obeying wind, can work as effective triggers enacting more favorable planetary conditions for a “New Mars Nature.” No politically-imposed building codes or environmental regulations applicable to Mars still allows for the unimpeded future development of its rocky and dusty, cratered, canyon-riven and granularly mobile surface and ultra-thin atmosphere by all future-present species of mechanical, electronic, and biotic “intruders” [39]. Natural meteorites are solid interplanetary or interstellar materials that survive high-speed passage through Mars’ ablative atmosphere and strike the subaerial landscape. (Several small pure iron meteorites have been examined remotely by scientists employing calibrated, treaded and wheeled roving robots relentlessly trekking that distant, arid Red Planet’s obviously rugged landscape.) Unnatural meteorites might yet become an economical deep pit excavation tool, if bent to one single purpose by those humans intentionally wielding for macro-engineering purposes such controlled impactful masses. We do not foresee a generalized or widespread increase in the pulverization of Mars’ already exposed landscape to induce a more chemically reactive landscape [40]; instead our Open-pit Option macro-project plan is to focus intentionally targeted bombarding bolides such as Mars’ anthropogenically de-orbited moonlets Phobos and Deimos — “Mars Rams” [41], buried thermonuclear explosives to cause targeted Mars ground-surface “bombturbation” elevation reductions [42], multiple successive same-target “Rods From God” descending from surrounding outer space [43] and Mars-adapted bucket-wheel excavators [44] on Hellas Planitia alone. The goal: dig the deepest artificial Mars hole possible, a subaerial open-pit that would never be disarranged by uncontrolled landslides. Why? We desire an enormous gravity and density instigated safe gaseous depository for as much of Mars’s extant atmosphere as possible! Our imagined mega-project is necessary because there is an insufficient inventory of carbon dioxide gas available nowadays on Mars to warrant its anthropogenic release by any of the time-consuming and expensive techniques touted by virtually all 21st Century Terraforming’s newsy popularizers and proficient publicity generators [45]!

Since 2008, the Earth’s deepest hole, a small-diameter vertical rotary-drilled shaft penetrating the seabed in the Persian Gulf to 12,289 meters, is the Al Shaheen Oil Well (BD-04A). It is, therefore, extremely doubtful that huge, costly, and heavily maintenance-reliant mechanical or even rock-melting drills would ever be utilized on Mars, consequently our significantly more direct-action agency material removal macro-imagineered techniques [46]. Fifty-megaton yield thermonuclear explosives were tested in Earth’s air, so it does not seem at all implausible that an aggregation of such powerful devices, when simultaneously exploded and blast yielding the equivalent of $\sim 177 \times 10^{12}$ metric tons, might be carefully emplaced ~ 10 kilometers below the anthropogenically enlarged crater’s floor present after the previous serial impacts of Phobos and Deimos. Then, to follow-up, stand-off explosives such as numerous tungsten “Rods from God” could finish the conical hole’s edge and road approaches without exposing early-generation implanted Martians, whether flesh or metal, to mortal or rapid disassembly dangers!

The quickly resulting magnificent funnel-like hole would have a topmost diameter exceeding 50 km. Funnel-like holes have fascinated architects for a long time: stimulated by a visit to Brazil, Walter Jonas (1910-1979) proposed *Intrapolis* in 1956 and Jean-Louis Rey (1931-1993, AKA, “Chaneac”) displayed *Ville Cratres* in 1963 and, later, the group Superstudio (extant 1966-1878) proffered *Temporal Cochlea-City*. During modern times, innovative underground macro-engineering, featuring the *Earthscraper*, an inverted pyramid penetrating 300 meters into the Earth-crust, designed by the architecture practice BNKER Arquitectura was presented during 2015 for future installation in central Mexico City, Mexico. An American macro-engineer, Jonathan John Gwiazda, has proposed “Power generation by solar/pneumatic cogeneration in a large, natural or man-made, open pit” in US Patent Application US 2005/0150225 A1 published 14 July 2005. Quick excavation of a Mars conoidal pit will for-ever alter the Chandler Wobble of Mars and certainly redistribute the greater part of the total mass of the Red Planet’s gravitationally free-flowing atmoshell! The anthropogenic concentration of gases in one selected planetary geomer, a cone-shaped landscape region of three-dimensions, opens the prospect of

centralized urban settlement for Homo ares and post-biological AI robots, a place from which expeditions may originate to explore and exploit whatever materials and energies Mars holds in store for discovery. The obvious possibility of subsequent planetary outgassing induced by the digging of the *Funnel* means the gas replenishment within the cone will become natural. Drone-crafted bench terraces will stabilize slopes forming the cone. Indeed, the complete replacement of people by collaborative AI robots in mining efforts is in the immediate offing, sometimes identified by the terminology “Mining 5.5” expected to be operating after 2050 AD. (In Earth’s bioshell, the rational presumption is that no human, whatever the technology available, could ever work efficiently at >10 kilometers below sea-level.) Observed from orbit and by landed robotic missions, it is known that Mars undergoes new space debris impacts — crater-creation by blasts — sand and dust transport by wind, a variety of material flows on slopes and enormous changes to perennial surface ice deposits. Cratering events have shown that subsurface ice plays a crucial role in the stability of the ground as well as the overall content of the planet’s atmosphere.

5. A replacing anthropogenic Mars landscape dichotomy!

Approximately 66% of Mars’ ground-surface is intensely cratered, strongly resembling the highlands of Earth’s Moon. The most cratered terrain is in the Southern Hemisphere yet it is ~6 km higher than the more sparsely cratered lowlands of the Northern Hemisphere — the contrast between the two spatially vast and volumetrically large geomers scientists have dubbed the “global dichotomy”. The Hellas Planitia bolide-impact basin, which is ~4,000 km in diameter nowadays, has an up-thrust rim ~2 km above the geoidal datum and a Nature-made depth of ~8 km below that same datum. In his now classic book *New Earths: Restructuring Earth and Other Planets* (1981), at pages 169-170, its author James Edward Oberg summarized the Macro-Imagineering idea of a geologist, A.W. Gerhard Kunze, to concentrate all the available gases — mostly carbon dioxide, of course — then composing Mars’ atmosphere in one locale, Hellas Planitia via an extra-ordinarily isothermal deep shaft. By 1989, A.E Smith’s *Mars: The Next Step*, at pages 131-132, added helpfully decorative details: “An asteroid with a diameter of 67 km and a density of 3 gcm³...crashing into Mars at a velocity of 5.1 [kilometers per second], would excavate a crater 41 km deep. At that depth below the mean Martian surface the atmosphere would have a pressure of 500 mb, or half the atmospheric pressure at sea-level on Earth. Liquid water would...exist. [if] the temperature was above 0⁰ C and humans would be able to live with normal protective clothing and an oxygen mask. Conditions, in fact, would not be significantly inferior to those on top of high terrestrial mountains.... If the asteroid...[was] ice...that would itself dump...water in the crater forming a permanent lake. But if the target area were one of those on Mars with subsurface water [groundwater], there would also be copious springs, streams and even rivers. According to... [Dr. Kunze’s] theory, plants would be able to grow in the bottom of this enormous crater without the benefit of a greenhouse and eventually the atmosphere would come to contain oxygen formed biogenically....” Therefore, living settlers could use standard revolving doors [47] instead of air-locks to enter and exit their otherwise air-conditioned offices, homes and other types of work-place enclosures necessitated by our common cultural habits of minded outlook per Clifford Geertz!

Evidently, no reputable scientist has published completely descriptive calculations about the state of the Red Planet’s remaining free atmosphere — by then a mere exoshell maintained by a diverse range of gaseous content caused by the efflux of gases seeping from Mars’ interior owing to radioactive decay — that which does not enter or stay for any duration within the anthropogenic terrain declivity. Mars without an atmosphere can be characterized as in a state close to radiative equilibrium for without an atmosphere there are no known event-processes extant by which energy and entropy can drive significant energy conversions associated with other planetary event-processes. In fact, Mars might come to closely resemble Earth’s Moon. In other words, most of the Mars’s landscape will become geo-physically dichotomized, in no uncertain terms anthropically Moonscaped! (“Moonscape” is probably not the result

of word blending but, more probably, word compounding [48]. We are rather fond of the term “Moonify”!) Moon dust is medically certified as toxic to life-forms as is Mars’ natural dust [49]; strictly enforced avoidance of dust on both celestial bodies is a health priority for living folks. “Operations on the Martian surface that could be advanced with knowledge from the Moon... [this includes] human health and bio-medicine, power systems, manned exploration rovers, and space suits” [50]. We submit that all techniques and special equipment developed to institute a globalized lunar industrialization enterprise may be used, almost without engineering modifications, in the subsequent industrialization of our Solar System’s infamous Red Planet [51-52]. Such a program of logical action encourages further outer space adventures for humans as well as their robotic “off-spring” because it keeps the monetary cost of the effort affordable for curious taxpayers! The mandate of necessity for digging *Funnel City* would be to serve as a headquarters for Jack Smith’s proposed Mars-centered Dyson Swarm [53]. Preferably, Mars’ moon would be removed as obstacles to the physicalizing of Smith’s solar satellite swarm which might harness 0.74 to 2.77% of our Solar System’s primary energy output!

6. Into the well

Planetary excavation for colonization purposes holds significant positive prospects to be considered a viable option when it comes to Mars, or even harsh planets like the Red Planet, which, in the distant future, could be the target of anthropogenic actions. The pressure reached at the bottom of the “well”, where *Funnel City* would be established, make it possible to implement essential hydraulic systems for a satisfactory anthropogenic transformation of the walkable geophysical environment. Incidentally, if the latest predictions about the amount of groundwater on Mars are confirmed, artificial lakes with artificially generated waves would form the basis for sophisticated water resource management through metamaterials capable of controlling the shape of the waves. Huanyang Chen and his colleagues at Xiamen University in China, studying the physics underlying the inherent endowment of metamaterials to drive light, found that the same principles apply not only to electromagnetic waves, but also to other oscillations, such as water waves [54]. They evinced a frame capable of changing the propagation of water waves into localized waves in a manner analogous to what occurs when an electromagnetic excitation called surface plasmon polariton is obtained. In the experiments conducted, the waves propagated formed a series of localized surface-plasmon-polariton-like excitations traveling in a selectable direction. The changing of other parameters that interfere with the behavior of water waves through metamaterials, such as gravity, is also in the sights of Chen and his team. This parameter manipulation can help compensate for environmental deficiencies on Mars compared to conditions found here on Earth, even into the conical “well”, enabling unusual infrastructural solutions, including architectonic solutions.

At the current stage of research, the applicability limits of metamaterials are virtually indeterminable, encompassing wave guiding, wave filtering and, especially, superfocusing, to mention a few examples regarding control and energy harvesting by capturing mechanical energy of water waves. With innovative designs, in addition to solar panels with cells doped by metamaterials, the conversion of energy by these composites can even revolutionize the design of interstellar spacecraft engines, certainly facilitating tremendously the access to Mars. It is not difficult to imagine how much this technology could contribute to energy production for the human population of *Funnel City*.



In fond memory

This chapter is dedicated to Russian-American physicist Dr. Alexander A. Bolonkin (1933-2020), our friend now departed.

References

- [1] Garforth, L. (2019) “Environmental Futures, Now and Then” *Osiris* 34: 238-257. SEE also: Lyon, C. et al. (2021) “Climate change research and action must look beyond 2100” *Global Change Biology* 28: 349-361.
- [2] Russell, M.J. (October 2019) “Figuring out how life first took off is (much like) rocket science!” *Planetary and Space Science* 175: 13-20.
- [3] Sayre, N.F. (2008) “The Genesis, History, and Limits of Carrying Capacity” *Annals of the Association of American Geographers* 98: 120-134.
- [4] De Blasio, F.V. (2018) *Mysteries of Mars*. Springer Praxis, 204 pages.
- [5] Szocik, K. (2019) “Should and could humans go to Mars? Yes, but not now and not in the near future” *Futures* 105: 54-66.
- [6] Levchenko, I. et al. (2019) “Mars Colonization: Beyond Getting There” *Global Challenges* 3: 180062.
- [7] Verbeek, P-P. (2008) “Cyborg intentionality: rethinking the phenomenology of human-technology relations” *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 7: 387-395.
- [8] Miller, M.J. and Freigh, K.M. (2019) “Addressing the envisioned world problem: a case study in human spaceflight operations” *Design Science* 5: e3.
- [9] Lane, K.M.D. (2005) “Geographers of Mars: Cartographic Inscription and Exploration Narrative in Late Victorian Representations of the Red Planet” *Isis* 96: 479.
- [10] Rosenzweig, C. et al. (September 2014) “Enhancing climate resilience at NASA centers” *Bulletin of the American Meteorological Society* 95: 1351-1363.
- [11] Dorr, A. (March 2017) “Common errors in reasoning about the future: Three informal fallacies” *Technological Forecasting & Social Change* 116: 6-7.
- [12] Phillips, J.D. (2007) “The perfect landscape” *Geomorphology* 84: 159-169.
- [13] Sleator, R.D. and Smith, N. (2019) “Terraforming: synthetic biology’s final frontier” *Archives of Microbiology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s0020-3-019-01654-x>. For a non-living, carpet-like covering of Mars that accomplishes some of the aims of Terraforming, SEE: Wordsworth, R. et al. (October 2019) “Enabling Martian Habitability with silica aerogel via the solid-state greenhouse effect” *Nature Astronomy* 3: 898-903.
- [14] Ogden, L.E. (May 2019) “Ionizing Radiation and the Life Sciences” *BioScience* 69: 324-331.
- [15] Chinnery, H.E. et al. (2019) “The Penetration of Solar Radiation Into Water and Carbon Dioxide Snow, With Reference to Mars” *Journal of Geophysical Research: Planets* 124: 337-348.

- [16] Aydin, C. et al. (2019) “Technological Environmentalty: Conceptualizing Technology as a Mediating Milieu” *Philosophy & Technology* 32: 321-338.
- [17] Klepeis, N. et al. (2001) “The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants” *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 11: 239.
- [18] Schmidt, N. (December 2017) “Planetary Defense as a Gateway to Space for Commercial and Deep Space Exploration” *New Space* 5: 219-229. SEE: Carrillo-Sanchez, J.D. et al. (2020) “Cosmic dust fluxes in the atmospheres of Earth, Mars, and Venus” *Icarus* 335: 113395.
- [19] Zalasiewicz, J. et al. (April 2017) “Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective” *The Anthropocene Review* 4: 9-22.
- [20] Krausmann, F. et al. (21 February 2017) “Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 1880-1885.
- [21] Hermann-Pillath, C. (July 2018) “The Case for a New Discipline: Technosphere Science” *Ecological Economics* 149: 212-225.
- [22] Hunt, J.D. and Byers, E. (2019) “Reducing Sea level rise with submerged barriers and dams in Greenland” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24: 779-794.
- [23] Sotala, K. and Gloor, L. (2017) “Superintelligence as a Cause or Cure for Risks of Astronomical Suffering” *Informatica* 41: 389-400.
- [24] Cirkovic, M.M. (May 2018) “Post-post biological evolution?” *Futures* 99: 28-35.
- [25] Reimann, L. et al. (2018) “Mediterranean UNESCO World Heritage at Risk from Coastal Flooding and erosion due to sea-level rise” *Nature Communications* 9: 4161.
- [26] Chen, S. et al. (December 2015) “Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams” *Radiation Physics and Chemistry* 117: 12-22.
- [27] Hinton, G.R. (13 January 2011) “Method and Apparatus of Space Elevators” USA Patent Application Publication 2011/0005869 A1.
- [28] Tachibana, S. et al. (29 September 2017) “Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures” *Science Advances* 3: eaao2538.
- [29] Wilde, P. and Quinby-Hunt, M.S. (August 1997) “Collisions with ice/volatile objects: Geological implications—A qualitative treatment” *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 132: 47-63.
- [30] Oszcewski, R. (April 2014) “Martian windchill in terrestrial terms” *Bulletin of the American Meteorological Society* 95: 533-541.
- [31] Shaposhnikov, D.S. et al. (28 April 2019) “Seasonal Water ‘Pump’ in the Atmosphere of Mars: Vertical Transport to the Thermosphere” *Geophysical Research Letters* 46: 4161-4169. SEE: March, B.H. and Casler, J.G. (March 2020) “Dust Storm: The cost-saving benefits of a compute cloud on Mars” *Acta Astronautica* 168: 31-36.
- [32] Campa, R. et al. (June 2019) “Why space colonization will be fully automated” *Technological Forecasting & Social Change* 143: 162-171.
- [33] Geertz, C. (1989) *A interpretacao das culturas*. Rio de Janeiro: Livro Tecnico e Cientifica. Page 15.

- [34] Liao, S.M et al. (June 2012) “Human Engineering and Climate Change” *Ethics, Policy and the Environment* 15: 206-221.
- [35] Szocik, K. et al. (June 2018) “Biological and social challenges of human reproduction in a long-term Mars base” *Futures* 100: 56-62.
- [36] Yang, J. et al. (18 April 2017) “Genetic signatures of high-altitude adaptation in Tibetans” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 4189-4194.
- [37] Hublitz, I. et al. (2004) “Engineering concepts for inflatable Mars surface greenhouses” *Advances in Space Research* 34: 1546-1551.
- [38] von Ehrenfried, M. (2019) *From Cave Man to Cave Martian: Living in Caves on the Earth, Moon and Mars*. The Netherlands: Springer. 340 pages.
- [39] Tarolli, P. et al. (2019) “From features to fingerprints: A general diagnostic framework for anthropogenic geomorphology” *Progress in Physical Geography* 43: 95-128.
- [40] Rugenstein, J.K.C. et al. (2019) “Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes” *Nature* 571: 99-102.
- [41] Black, B.A. and Mittal, T. (2015) “The demise of Phobos and development of a Martian ring system” *Nature Geoscience* 8: 913-917. SEE also: Wahlisch, M. et al. (2014) “Phobos and Deimos cartography” *Planetary and Space Science* 102: 60-73.
- [42] Hupy, J.P. and Schaetzel, R.J. (2006) “Introducing ‘bombturbation,’ a singular type of soil disturbance and mixing” *Soil Science* 171: 823-836.
- [43] SEE: USA Patent 6,779,462 B2, “Kinetic energy rod warhead with optimal penetrators”, awarded to Richard M. Lloyd on 24 August 2004.
- [44] Muff, T. et al. (2004) “A Prototype Bucket Wheel Excavator for the Moon, Mars and Phobos” *AIP Conference Proceedings* 699: 967.
- [45] Jakosky, B.M. (October 2019) “The CO₂ inventory of Mars” *Planetary and Space Science* 175: 52-59.
- [46] Guerra, V. et al. (2022) “Plasmas for *in situ* resource utilization on Mars: Fuels, life support, and agriculture” *Journal of Applied Physics* 132: 070902.
- [47] Haese, A. (January 2019) “Revolving entrance doors: Machines or structural elements?” *Glass Structures and Engineering* 4: 17-27.
- [48] Algeo, J. (Spring-Summer 1977) “Blends, A Structural and Systemic View” *American Speech: A Quarterly of Linguistic Usage* 52: 51.
- [49] Davila, A.F. et al. (October 2013) Perchlorate on Mars: a chemical hazard and a resource for humans” *International Journal of Astrobiology* 12: 321-325.
- [50] Kramer, D. (1 July 2019) “*Quo Vadis*, NASA: The Moon, Mars, or both?” *Physics Today* 72: 24.
- [51] Battersby, S. (20 August 2019) “Quantum sensors probe uncharted territories, from Earth’s crust to the human brain” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 16663-16665.
- [52] Cathcart, R.B. “Mars, A Stepping Stone World, Macro-Engineered”, Chapter 3, pages 37-50, *IN* Beech, M. and Seckbach, J. *Terraforming Mars*. (Scrivener Publishing, 2021).

[53] Smith, J. (2022) “Review and viability of a Dyson Swarm as a form of Dyson Sphere” *Physica Scripta* 97: 122001.

[54] Han, L., Chen, S., & Chen, H. (2022) “Water wave polaritons” *Physical Review Letters* 128(20): 204501.