





Proposta de um modelo de locação de poços tubulares para o atendimento à população afetada por secas

Proposal of a model for locating artesian wells to serve the population affected by droughts

Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes¹ , Orivalde Soares da Silva Júnior¹ ,
Renata Albergaria de Mello Bandeira¹ , Yesus Emmanuel Medeiros Vieira² 

¹Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mails: dayanna_nunes@ime.eb.br, orivalde@ime.eb.br, renatabandeira@ime.eb.br

²Escuela Militar de Cadetes José María Córdova, Bogotá, Cundinamarca, Colombia. E-mail: yesus.medeiros@esmic.edu.co

Como citar: Nunes, D. R. C., Silva Júnior, O. S., Bandeira, R. A. M., & Vieira, Y. E. M. (2023). Proposta de um modelo de locação de poços tubulares para o atendimento à população afetada por secas. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e10. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e10>

RESUMO: A perfuração de poços é uma das medidas adotadas para prover água às comunidades afetadas pela seca. No entanto, há desafios técnicos relacionados à determinação dos locais para perfuração que aumentem as chances de obtenção de poços produtivos. Além disso, normalmente as verbas destinadas para esse tipo de obra são bastante limitadas, o que requer uma aplicação eficiente. Uma vez que o objetivo é o abastecimento da população mais afetada, faz-se necessária uma priorização dos beneficiados. Nesse sentido, este artigo propõe um modelo de locação de poços tubulares que leva em consideração aspectos físicos, a fim de aumentar a taxa de sucesso na obtenção de poços produtivos, e aspectos sociais, visando priorizar as comunidades mais afetadas pela seca. Foi desenvolvido um modelo de programação multiobjetivo e aplicado a um estudo de caso com 739 pontos da Operação Carro-Pipa no semiárido brasileiro. Duas otimizações multiobjetivo foram procedidas: uma considerando o índice de risco de seca como parâmetro do modelo e outra sem. A análise dos resultados mostrou o ganho social obtido pela consideração desse índice, além de mostrar que a consideração da probabilidade de ocorrência de água subterrânea como restrição para a locação de poços pode levar ao aumento nas taxas de sucesso nas perfurações.

Palavras-chave: Locação de Facilidades; Poços Tubulares; Desastre; Seca; Semiárido Brasileiro.

ABSTRACT: The drilling of wells is one of the measures adopted to provide water to communities affected by the drought. However, there are technical challenges related to determining drilling locations that increase the chances of obtaining productive wells. In addition, funds allocated for this type of work are usually quite limited, which requires efficient application. Since the objective is to supply the most affected population, it is necessary to prioritize the beneficiaries. In this sense, this article proposes a model for locating tube wells that takes into account physical aspects, in order to increase the success rate in obtaining productive wells, and social aspects, aiming to prioritize the communities most affected by drought. A multi-objective programming model was developed and applied to a case study with 739 points of the Carro-Pipa Operation in the Brazilian semiarid region. Two multi-objective optimizations were performed: one considering the drought risk index as a model parameter and another without. The analysis of the results showed the social gain obtained by considering this index, in addition to showing that the consideration of the probability of occurrence of groundwater as a restriction for the location of wells can lead to an increase in the success rates in drilling.

Keywords: Facility Location; Tube Wells; Disaster; Drought; Brazilian Semiarid.

INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno climático recorrente, caracterizado por uma redução no volume de chuvas em relação ao que é considerado normal para uma zona específica, fazendo com que a água disponível não seja suficiente para atender às necessidades humanas e dos ecossistemas (Ortega-Gaucin et al., 2016). As mudanças climáticas têm contribuído para o aumento da incidência desse fenômeno, que se torna cada vez mais frequente e severo em função da crescente demanda de água e de regimes de

Recebido: Agosto 02, 2022. Revisado: Fevereiro 09, 2023. Aceito: Abril 24, 2023.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

precipitação mais extremos (Nam et al., 2015; Cunha et al., 2019). Atualmente, cerca de metade da superfície terrestre é suscetível a seca (Poonia et al., 2021).

Como um fenômeno natural que ocorre em várias regiões do planeta, a seca é considerada um desastre somente quando acontece de forma intensa e extensiva em áreas altamente povoadas, de modo que a capacidade local seja insuficiente para lidar com os danos e perdas, sejam eles humanos, materiais ou socioeconômicos (Cunha et al., 2019). Dentre os desastres naturais, a seca figura entre aqueles que possuem os maiores impactos sobre a sociedade e os ecossistemas (Hao et al., 2017; Vieira et al., 2021). Entre 1991 e 2010, foram registrados mais de 32.000 eventos e de 96 milhões afetados em todo o mundo (Alpino et al., 2016). Além disso, no que tange à mortalidade, é o tipo de desastre com maior índice de vítimas (Zamani et al., 2006), sendo responsável por quase metade de todas as mortes causadas por desastres naturais em todo o mundo. Estima-se que a seca tenha sido responsável por cerca de três milhões de mortes entre o início do século XIX e o final do século XX (Alpino et al., 2016).

A perfuração de poços se constitui como uma das práticas mais adotadas pelos gestores de terras áridas para o combate à seca, uma vez que, dependendo da quantidade e qualidade da água obtida nesses poços, eles podem ser empregados como mananciais para a distribuição de água à população local ou, até mesmo, para comunidades mais afastadas, por meio do transporte por caminhões-pipa (Vieira, 2019). Contudo, um desafio recorrente nas obras de perfuração de poços em regiões áridas diz respeito à escolha dos pontos mais prováveis para obtenção de poços produtivos. Nessas regiões, as águas subterrâneas ocorrem predominantemente em bacias hidrográficas inseridas em terreno de rocha cristalina (Nag & Kundu, 2016; Singh et al., 2019), nos pontos em que há fratura da rocha. Assim, apresentam, muitas vezes, vazões limitadas, bem como elevadas concentrações iônicas, não sendo recomendada para o consumo humano (Machado et al., 2017). Desse modo, buscando contribuir para o aumento de sucesso na perfuração de poços em regiões áridas, Vieira (2019) propõe um modelo preditivo de ocorrência de água subterrânea, por meio de regressão logística binomial, com base em aspectos físicos, relacionados às áreas de geologia, topografia e hidrologia.

Por outro lado, a escolha dos locais para a perfuração de poços não deve ser puramente baseada em critérios físicos. Como o objetivo é o abastecimento da população, é prudente levar em consideração o risco de seca das comunidades, de forma a fazer a melhor utilização possível dos recursos disponíveis para obras de perfuração. Esse risco é uma combinação da exposição da região à seca (ameaça), determinada pela frequência e intensidade do fenômeno, e da vulnerabilidade da sociedade ao evento (Wilhite, 2000; Bravo et al., 2021). Índices de seca têm sido empregados na avaliação desse tipo de fenômeno (Zhang et al., 2015). Contudo, é recomendado que esses sejam índices compostos, que combinem indicadores para identificar as evidências das condições de seca a indicadores relacionados à vulnerabilidade da comunidade local (Tánago et al., 2016; Bravo, 2021). Porém, a revisão sistemática de literatura desenvolvida por Bravo (2021) identificou apenas sete índices compostos para avaliar a seca meteorológica (Neri & Magaña, 2016; Olivares et al., 2017; Wang et al., 2019; Wang & Meng, 2013; Guo et al., 2017; Zhang et al., 2015; Wu et al., 2015), sendo que nenhum deles foi aplicado no Brasil. Assim, Bravo (2021) desenvolveu o sistema DRAI (*Drought Risk Assessment Interface*) de monitoramento e alerta de risco de secas meteorológicas na região do semiárido do Brasil, por meio da criação de um índice composto, baseado nas componentes ameaça e vulnerabilidade.

Além dos aspectos físicos e sociais, deve-se prever também a utilização dos poços para o abastecimento de água e, inclusive, considerar para a seleção dos locais para perfuração de poços tubulares a proximidade aos pontos de demanda, com o intuito de minimizar as distâncias percorridas para a distribuição de água às comunidades vulneráveis e, conseqüentemente, abrir a possibilidade de ampliação da rede de atendimento em face da maior efetividade dos recursos aplicados.

Nesse sentido, este artigo tem por objetivo apresentar um modelo de locação de poços tubulares, caracterizado por ser um problema de otimização multiobjetivo, que visa: aumentar as chances de obtenção de poços produtivos, utilizando o modelo prospectivo baseado em regressão logística desenvolvido por Vieira (2019); priorizar as comunidades mais afetadas pela seca, por meio da consideração do índice de risco composto de seca proposto por Bravo (2021); reduzir custos, tanto de instalação dos poços quanto de transporte da água por caminhões-pipa; e reduzir as distâncias aos pontos de demanda. O modelo proposto é exemplificado em um estudo de caso no semiárido brasileiro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Problema de Locação de Facilidades

O problema de locação de poços tubulares pode ser tratado como um problema de locação de facilidades (*Facility Location Problem* - FLP) que aborda decisões sobre onde devem ser localizadas facilidades,

considerando os clientes que podem ser servidos de forma a otimizar um certo critério (Daskin, 1997). Trata-se de um problema NP-difícil, que vem sendo abordado por heurísticas e metaheurísticas.

Os primeiros problemas desse tipo a serem estudados foram os problemas fundamentais do p -centro e da p -mediana, tratados em Hakimi (1964) e Hakimi (1965). Ambos têm por finalidade localizar p facilidades em uma rede. O primeiro busca minimizar a máxima distância entre um ponto de demanda e a facilidade mais próxima, enquanto o segundo minimiza a soma das distâncias entre cada ponto de demanda e a facilidade mais próxima. Toregas et al. (1971) definiram o conceito de cobertura, segundo o qual um ponto de demanda é coberto somente se estiver dentro de uma distância pré-especificada de uma facilidade, introduzindo o problema de cobertura de conjuntos (*Set Covering Problem* - SCP), que visa minimizar o número de facilidades a serem instaladas enquanto assegura que todos os pontos de demanda sejam cobertos. Church & Reville (1974) estudaram o problema de máxima cobertura (*Maximal Covering Location Problem* - MCLP), a fim de localizar p facilidades com o objetivo de maximizar a cobertura total. Cornuejols et al. (1977) apresentaram o problema de locação de facilidades não-capacitadas (*Uncapacitated Facility Location Problem* - UFLP), que busca minimizar a soma dos custos de instalação das facilidades e de transporte entre as facilidades e os pontos de demanda, com o número de facilidades indeterminado.

Erdoğan et al. (2019) conseguiram abordar todos esses problemas clássicos e desenvolveram uma planilha, denominada *FLP Spreadsheet Solver*, para a resolvê-los. Implementada como um *Ad-in* do Excel, utiliza um algoritmo de Busca Tabu que consegue soluções próximas da ótima para problemas com até 200 localizações. Esse limite, segundo os autores, se deve às limitações do serviço SIG disponível, o que pode ser manualmente ajustado pelos usuários para contemplar um número maior de localidades. A planilha consegue resolver muitos dos problemas básicos de localização, como p -centro, p -mediana, UFLP e MCLP, além de trabalhar com mais de uma função objetivo simultaneamente.

O problema de localização de facilidades pode ser aplicado nas mais diversas áreas de conhecimento. Lin et al. (2018) o abordaram na logística reversa de veículos; Ghahremani-Nahr et al. (2019) na cadeia de suprimentos de ciclo fechado; Mohammed & Wang (2017) em uma cadeia de suprimentos de carne baseada em RFID; Mogale et al. (2018) na localização e alocação de silos de grãos; Wang et al. (2018) e Chen & Lai (2022) o utilizaram para determinar a localização de instalações de saúde; Maharjan & Hanaoka (2020) e Mohammadi et al. (2020) o fizeram na área de logística humanitária. Entretanto, a sua aplicação na locação de poços para exploração de águas subterrâneas ainda é pouco estudada. A seguir, são apresentados os trabalhos encontrados na literatura mais congruentes em relação ao tema.

Cunha & Antunes (1997) apresentaram modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo para auxiliar na definição da localização, tamanho e área de influência de instalações de bombeamento para suprir com água de um aquífero um dado número de pontos de demanda. O modelo leva em consideração o efeito da extração de águas subterrâneas na superfície piezométrica do aquífero, a fim de evitar a sobre-exploração.

Posteriormente, Ferreira et al. (2009) aplicaram o modelo de Cunha & Antunes (1997) a um estudo de caso referente ao aquífero de Querença-Silves, em Portugal. O problema envolvia 10 pontos de demanda e 100 possíveis localizações para os poços. O modelo foi testado para um número máximo de poços de 5, 15 e 25, para fins de comparação, e as soluções ótimas de Pareto foram obtidas utilizando o método da ϵ -restrição. O estudo mostrou que o modelo provê resultados consistentes com os objetivos propostos.

Ng (2014) propôs um algoritmo de busca Tabu melhorado para a resolução de problemas de localização de facilidades voltados para o planejamento de infraestrutura hídrica. O algoritmo incorpora elementos da meta-heurística de busca em vizinhança variável, sendo a vizinhança de busca expandida conforme um ranqueamento das potenciais localidades.

Roman et al. (2021) trataram da questão da segurança hídrica em área costeira sujeita à alta salinidade das águas subterrâneas e a grandes desigualdades sociais. Para isso, desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo para analisar os *trade-offs* entre dois objetivos: maximizar o acesso geral e maximizar o acesso da população de baixa renda a um abastecimento de água melhorado. O modelo de otimização espacial das infraestruturas leva em consideração medidas de salinidade das águas subterrâneas, uma extensa pesquisa domiciliar e uma auditoria da infraestrutura de água potável, bem como os custos de uma variedade de opções de abastecimento, como poços tubulares profundos, usinas de dessalinização e sistemas encanados.

Apesar de abordarem o tema, nenhum dos estudos levou em consideração algum parâmetro que priorizasse a escolha de pontos mais suscetíveis à ocorrência de poços produtivos ou que priorizasse as comunidades mais afetadas pela escassez hídrica, como se propõe neste artigo.

Desenvolvimento do Modelo

O problema envolve i pontos de demanda, cada qual um reservatório de água (cisterna), e j poços a serem localizados de forma a atenderem esses pontos de demanda. Além da locação dos poços, o problema objetiva fazer a alocação poço-cisterna, definindo qual poço atenderá cada ponto de demanda. A Figura 1 ilustra o problema.

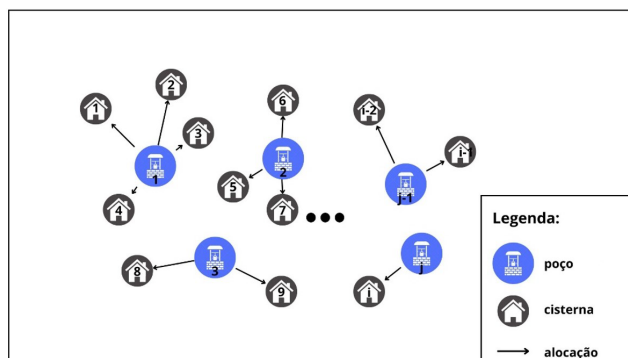


Figura 1 - Problema de locação de poços.

O modelo proposto para o problema de locação de poços é baseado na formulação de programação inteira de Erdoğan et al. (2019) para o problema de locação de facilidades, incorporadas algumas modificações a fim de adequá-la ao problema em questão. Erdoğan et al. (2019) trabalham com três funções objetivo, enquanto neste artigo são quatro as funções objetivo. Optou-se por desmembrar a função objetivo referente ao custo total, separando-a em custo de transporte e custo de instalação. Isso porque, uma vez que o custo de instalação de um poço supera em muito o custo de transporte diário, a solução ótima buscaria minimizar o número de poços localizados em detrimento da minimização da distância durante as alocações. Outra modificação diz respeito ao objetivo de máxima cobertura da demanda. Ao passo que Erdoğan et al. (2019) trabalham com a probabilidade de um ponto de demanda ser atendido, este estudo adotou a probabilidade de ocorrência de água subterrânea, além de introduzir um parâmetro referente ao índice composto de risco de seca, buscando priorizar os municípios mais afetados pela seca.

Assim sendo, o modelo proposto considera o grafo direcionado $G = (V, A)$, em que o conjunto de vértices, V , é a união de três subconjuntos disjuntos, V_1 , V_2 e V_3 . O primeiro subconjunto V_1 contém os vértices onde já estão localizados poços. O segundo subconjunto V_2 é composto pelos vértices que podem vir a localizar um poço, ou seja, os pontos com probabilidade de ocorrência de água subterrânea maior ou igual a 50%. O terceiro subconjunto V_3 contém os vértices que não podem vir a localizar um poço, em outras palavras, os pontos com probabilidade de ocorrência de água subterrânea menor do que 50%. Para o cálculo da probabilidade de ocorrência de água subterrânea (p_j), utilizou-se a Equação 1, decorrente do modelo prospectivo proposto por Vieira (2019), baseado em regressão logística, que possui como variáveis independentes o litotipo predominante (lit_j), a densidade de lineamento (lin_j), a drenagem superficial ($dren_j$) e a distância do ponto ao lineamento estrutural mais próximo ($dist_j$). O conjunto de arcos A contém todos os arcos conectando os vértices em V , inclusive os arcos que ligam os vértices neles mesmos, $(i, i) \forall i \in V$.

$$p_j = \left(\frac{e^{-5,943+0,853 \cdot lit_j + 0,537 \cdot lin_j + 0,101 \cdot dren_j + 2,739 \cdot dist_j}}{1 + e^{-5,943+0,853 \cdot lit_j + 0,537 \cdot lin_j + 0,101 \cdot dren_j + 2,739 \cdot dist_j}} \right) \quad (1)$$

Cada vértice $i \in V$ possui uma demanda q_i , uma probabilidade de obtenção de água subterrânea p_i , calculada a partir da Equação 1, e um índice composto de risco de seca IR_i , referente ao município ao qual pertence. Para cada município, utiliza-se o índice proposto por Bravo (2021), o qual consiste em uma combinação dos índices de ameaça e de vulnerabilidade, conforme Equação 2. O índice de vulnerabilidade (IV) é dado pela Equação 3, função da exposição (E), sensibilidade (S) e capacidade adaptativa (CA). Já o índice de ameaça em uma estação e em um mês m (IA_{em}) é dado pela Equação 4, função da precipitação P (em milímetros), da evapotranspiração potencial ET (em milímetros), da temperatura compensada média TM (em °C), da umidade relativa média do ar UR (em %), da velocidade do vento média VV (em metros por segundo), da insolação total IT (em horas), da temperatura mínima média $TMin$ (em °C) e da temperatura máxima média $TMax$ (em °C). Os valores

$\max(P)$, $\max(ET)$, $\max(TM)$, $\max(UR)$, $\max(VV)$, $\max(IT)$, $\max(TMin)$ e $\max(TMax)$ representam os valores máximos dos indicadores, considerando todas as estações e todos os meses. W_P , W_{ET} , W_{TM} , W_{UR} , W_{VV} , W_{IT} , W_{TMin} e W_{TMax} são os pesos dos indicadores, obtidos pelo método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Por meio do cálculo do índice de ameaça de seca para cada uma das 59 estações consideradas no estudo de Bravo (2021) e de uma interpolação dos dados, é garantido que cada município do semiárido tenha seu índice calculado por meio da ponderação dos valores das três estações mais próximas.

$$IR = IV \times IA \quad (2)$$

$$IV = \frac{(E+S-CA+1)}{3} \quad (3)$$

$$IA_{em} = W_P \times \left(1 - \frac{P_{em}}{\max(P)}\right) + W_{ET} \times \frac{ET_{em}}{\max(ET)} + W_{TM} \times \frac{TM_{em}}{\max(TM)} + W_{UR} \times \left(1 - \frac{UR_{em}}{\max(UR)}\right) + W_{VV} \times \frac{VV_{em}}{\max(VV)} + W_{IT} \times \frac{IT_{em}}{\max(IT)} + W_{TMin} \times \frac{TMin_{em}}{\max(TMin)} + W_{TMax} \times \frac{TMax_{em}}{\max(TMax)} \quad (4)$$

Além disso, cada vértice $i \in V_1 \cup V_2$ possui um custo de instalação s_i , que é incorrido se o vértice i é selecionado para receber uma facilidade, e uma capacidade Q_i . O número máximo de facilidades é denotado por m e o parâmetro binário α recebe o valor 1 se todas as m facilidades devem ser locadas, 0 caso contrário. O parâmetro β representa a distância limite de serviço, acima da qual um poço não pode atender um ponto de demanda. O custo médio de transporte de água é denotado por c . Associada a cada arco $(i, j) \in A$, há uma distância d_{ij} .

Para as variáveis de decisão, tem-se: $x_{ij} = 1$ se o vértice i é servido por uma facilidade no vértice j , 0 caso contrário; $y_j = 1$ se é locada uma facilidade no vértice j , 0 caso contrário; e w , representando a máxima distância entre qualquer ponto de demanda e a facilidade pela qual ele é servido. O modelo é definido nas expressões de (5) a (17).

$$\text{lex min} \left(-\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} q_i \times x_{ij} \times p_j \times IR_i, \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c \times d_{ij} \times x_{ij}, \sum_{j \in V} s_j \times y_j, w \right) \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \in V \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} q_i \times x_{ij} \leq Q_j \times y_j \quad \forall j \in V_1 \cup V_2 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V} y_j \leq m \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V} y_j \geq m \times \alpha \quad (10)$$

$$w \geq \sum_{j \in V} d_{ij} \times x_{ij} \quad \forall i \in V \quad (11)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in V \mid d_{ij} > \delta \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \mid d_{ij} \leq \delta \quad (13)$$

$$y_j = 1 \quad \forall j \in V_1 \quad (14)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_2 \quad (15)$$

$$y_j = 0 \quad \forall j \in V_3 \quad (16)$$

$$w \geq 0 \quad (17)$$

A função objetivo (5) maximiza a cobertura, buscando tanto maximizar a probabilidade de se obter um poço produtivo (p_j) quanto priorizar os municípios com maior risco de seca (IR_i), além de

minimizar o custo de transporte, o custo de instalação e a máxima distância entre cada ponto de demanda e o manancial ao qual é alocado, na ordem lexicográfica apresentada. A restrição (6) assegura que toda cisterna seja atendida por um manancial. A restrição (7) requer que um manancial que seja locado no nó j para que uma cisterna i possa ser atendida por ele. A restrição (8) garante que, para cada manancial, a soma das demandas dos pontos que ele atende seja menor ou igual a sua capacidade. A restrição (9) estipula que o número de facilidades locadas não pode ser maior que o número máximo de facilidades (m). Caso $\alpha = 1$, todas as m facilidades devem ser locadas, a restrição (10), juntamente com a anterior, faz com que isso seja verificado. A restrição (11) assegura que w seja maior ou igual à distância entre cada cisterna e o manancial pelo qual é atendida. A restrição (12) impede a alocação de qualquer cisterna a um manancial que esteja a uma distância maior que a distância de cobertura (β). A restrição (13) diz respeito à natureza binária das variáveis x_{ij} . As restrições (14), (15) e (16) estabelecem que os nós em V_1 devem ser facilidades, que os nós em V_2 podem ser facilidades e que os nós em V_3 não podem ser, respectivamente. Finalmente, a restrição (17) garante que a variável w seja não-negativa.

O modelo proposto para a locação de poços tubulares em áreas suscetíveis a seca é aplicado, em um estudo de caso, na região semiárida do Nordeste brasileiro. A seguir, apresenta-se a área de estudo, bem como as características da coleta de dados e processamento.

Área de Estudo

No Brasil, a seca assume proporções desastrosas devido à sua ampla cobertura espacial e recorrência na região do semiárido, principalmente quando se leva em consideração a sua deficiência hídrica (Alvalá et al., 2017). Aproximadamente 28 milhões de pessoas vivem nessa região (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018b), o que faz dela a região seca mais populosa do mundo (Marengo, 2010).

O Semiárido brasileiro é uma região delimitada pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), considerando condições climáticas de semiaridez. Atualmente é composto por 1.262 municípios, pertencentes a dez diferentes estados, conforme limites evidenciados pela Figura 2.



Figura 2 - Mapa do Semiárido. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018b)

Essa região passou por um período de seca severo entre 2010 e 2017, o que tornou mais intensas as discussões sobre melhorias nas estratégias de gestão da seca, tanto em um nível estadual quanto

federal. A fim de mitigar os efeitos decorrentes da seca nessa região, algumas medidas foram adotadas ao longo do tempo, dentre elas: construção de cisternas, perfuração e recuperação de poços, construções de barragens e estações de bombeamento, bem como uma rede de mecanismos para segurança social, tais como a operação Carro-Pipa, Bolsa estiagem e Garantia Safra (Gutiérrez et al., 2014).

O Exército Brasileiro teve participação em dois desses programas. Primeiramente, na Operação Carro-Pipa (OCP), criada juntamente com o Ministério do Desenvolvimento Regional em 2012, com o intuito de complementar a distribuição de água realizada pelas prefeituras na região do semiárido brasileiro. A operação, que inicialmente era temporária, passou a ser realizada de forma contínua, tendo em vista o rigor e o caráter prolongado dos períodos de seca e estiagem nessa região, bem como o crescente número de municípios incluídos na operação. A função do Exército é a de planejar, coordenar e fiscalizar a busca, o transporte, a desinfecção e a distribuição de água potável, atividades realizadas por meio de caminhões-pipa contratados (Exército Brasileiro, 2021).

Já na Operação Semiárido, produto também de uma parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional, o principal objetivo era diminuir a dependência das comunidades do semiárido da água proveniente de caminhões-pipa, aumentando a subsistência hídrica dessa região. Para isso, ainda na fase de planejamento, foi realizado um estudo, com base no banco de dados da Operação Carro-Pipa, a fim de definir os pontos de perfuração dos poços que beneficiassem os municípios mais populosos e mais afastados dentro da logística de distribuição de água. A operação abrangeu sete estados da Região Nordeste, sendo atendidos 80 municípios da Região Semiárida, beneficiando, diretamente, quase 69 mil pessoas. Iniciada em 2016 e com duração aproximada de três anos, a operação teve um custo total de 15,7 milhões de reais e estima-se que ela possa gerar uma economia de 6 milhões de reais por ano na Operação Carro-Pipa. Na operação, foram perfurados 593 poços, sendo que 302 destes continham água. Porém, parte da água encontrada possuía altos teores de sais, devido, essencialmente, a condições hidrogeológicas da região, caracterizada pela predominância de rochas cristalinas (Zanella, 2014), o que propicia a ocorrência de água salobra. Para esses casos, foram instalados, também, 23 equipamentos de osmose reversa (dessalinizadores), para o tratamento da água salobra (Exército Brasileiro, 2019).

Aquisição de Dados e Processamento

Para a validação do modelo proposto, utilizou-se um conjunto de 739 pontos de demanda, espalhados por 170 municípios do nordeste brasileiro, englobando os estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Bahia, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, conforme ilustrado na Figura 3. Esses pontos são provenientes da Operação Carro-Pipa.

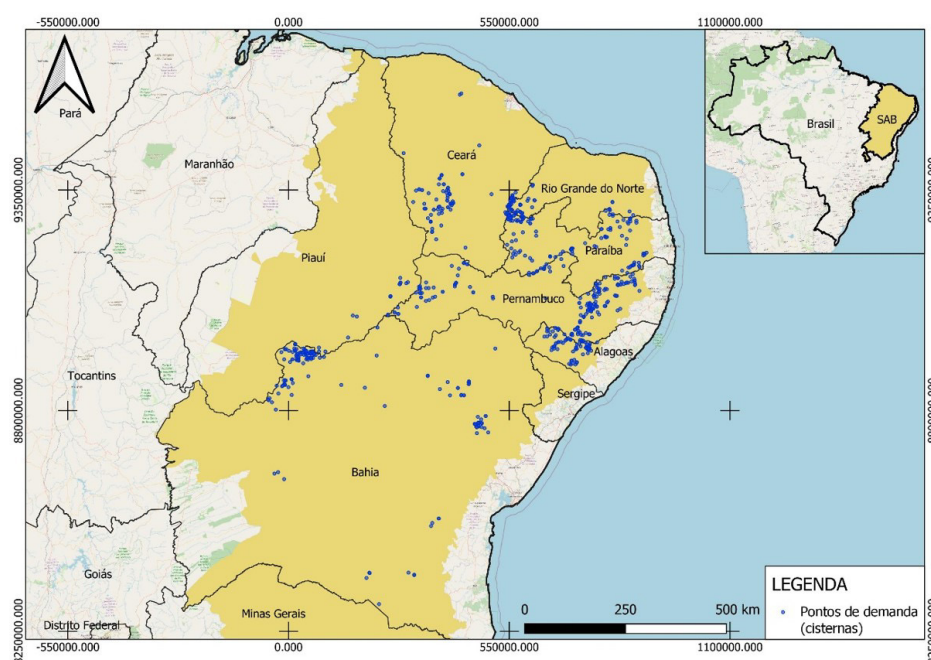


Figura 3 - Pontos de demanda considerados.

Do banco de dados da Operação Carro-Pipa, foi possível obter a locação dos pontos de demanda, assim como o número de pessoas atendidas por cada cisterna, sendo possível determinar a demanda de cada ponto, utilizando para isso o valor estabelecido para consumo de água de 20 litros por pessoa por dia. Trabalhou-se com uma demanda anual, tendo em vista que as secas geralmente são anuais. A matriz de distâncias foi obtida por meio da API do Google Maps. Para a distância máxima de cobertura, considerou-se o valor de 250 km, tomando por base as distâncias realizadas pela OCP.

Os valores dos parâmetros necessários para o cálculo das probabilidades de ocorrência de água subterrânea por meio da regressão de Vieira (2019), representada pela Equação 1, foram obtidos utilizando-se como bases cartográficas as cartas de integração geológica geofísica do banco de dados do GeoSGB, o sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Dentre os produtos de sensoriamento remoto empregados, destacam-se as informações obtidas da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponíveis no site da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), com resolução espacial de 30 metros (National Aeronautics and Space Administration, 2023). Assim, de posse das representações cartográficas e dos produtos de sensoriamento remoto, foram elaborados, com o auxílio do software de geoprocessamento QGIS (Versão 2.8.9), mapas temáticos e modelos sombreados que auxiliaram na extração e vetorização das feições geomorfológicas presentes na área de estudo. As variáveis explicativas foram, então, subdivididas em classes, segundo o potencial de ocorrência de água subterrânea (Quadro 1). As classificações se basearam em alguns estudos: primeiro, os litotipos predominantes foram agrupados e classificados de acordo com a escala apresentada por Feitosa (2008); as densidades de lineamentos estruturais e de drenagem superficial seguiram o proposto por Abuzied & Alrefae (2017), adaptando-se os intervalos numéricos de classe de acordo com os valores médios de densidades de lineamentos e de drenagem superficial observados na área de um conjunto de pontos onde já existem poços; para a proximidade do ponto de perfuração em relação aos contatos geológicos e lineamentos estruturais, estabeleceu-se, com auxílio do QGIS, um buffer circular de 100 metros de raio, reduzindo-se a distância utilizada em Madrucci et al. (2008), de 250 metros, para os aquíferos cristalinos no estado de São Paulo (Vieira, 2019).

Quadro 1 - Classificação das variáveis independentes conforme potencial teórico de acumulação de água subterrânea

Variável	Classe	Descrição/intervalos	Potencial teórico de acumulação de água subterrânea	Peso atribuído	Referência
Litotipo predominante	1	Granitoides não deformados/quartzodioritos/granodioritos/corpos tabulares de granito	Muito ruim	3	Feitosa (2008)
	2	Paragneisse/granodioritos e granitos porfíricos gnaissificados	Ruim	4	
	3	Ortogneisses fortemente bandados/migmatitos paraderivados/calciossilicáticas	Moderado	5	
	4	Xistos/quartzitos/biotitagneisses/metacalcários	Bom	6	
	5	Rochas sedimentares intemperizadas ou decompostas/Aluviões	Muito bom	9	
Densidade de lineamentos (km/km ²)	1	0-0,490	Muito ruim	1	Abuzied & Alrefae (2017)
	2	0,490-0,980	Ruim	3	
	3	0,980-1,470	Moderado	5	
	4	1,470-1,960	Bom	7	
	5	>1,960	Muito bom	9	
Densidade de drenagem superficial (km/km ²)	1	0-0,452	Muito ruim	1	Abuzied & Alrefae (2017)
	2	0,452-0,904	Ruim	3	
	3	0,904-1,356	Moderado	5	
	4	1,356-1,808	Bom	7	
	5	>1,808	Muito bom	9	
Distância do ponto de perfuração ao lineamento mais próximo	1	<100m	Favorável	1	Madrucci et al. (2008)
	2	>100m	Desfavorável	0	

Fonte: Adaptado de Vieira (2019)

Além disso, a partir de dados de poços perfurados pelo 1º Batalhão de Engenharia de Construção (1º BEC) do Exército Brasileiro, situado em Caicó, Rio Grande do Norte, estimou-se a vazão média dos poços perfurados, em 3 m³/h, e, considerando-se 8 horas por dia para o carregamento dos caminhões-pipa, foi possível obter a capacidade anual dos poços. Desse Batalhão também se retirou o custo de instalação dos poços, estimado em R\$ 18.310,45, o equivalente a \$58.959,65 (na cotação do dólar em julho de 2015), desconsiderando o caso de água salobra, o que implicaria em um custo mais elevado, por conta da necessidade de dessalinizador. O custo de transporte, por sua vez, segue metodologia de cálculo própria, conforme estipulada na ordem de serviço referente à Operação Carro-Pipa (Comando Militar do Nordeste, 2015). Segundo ela, o transporte é pago com base na unidade de medida de transporte (*UMT*), calculada por meio da Equação 18, em que *V* é o volume transportado, *D* é a distância do manancial ao ponto de abastecimento, *Q* é a quantidade de viagens realizadas e *I* o índice multiplicador, dependendo do tipo de estrada, conforme Tabela 1. Para o estudo de caso, considerou-se todas as estradas 100% sem asfalto (chão) (*I* = 0,79) e a capacidade dos caminhões-pipa de 20m³, pois, de acordo com Vieira (2019), são os mais utilizados na distribuição de água.

$$UMT = V \times D \times Q \times I \quad (18)$$

Tabela 1 - Fatores de pagamento do serviço executado pelo pipeiro

Tipo de rodovia	Índice Multiplicador
Estrada 100% sem asfalto (chão)	0,79
Estrada mista (mais chão do que asfalto)	0,74
Estrada mista (mais asfalto do que chão)	0,71
Estrada com 100% de asfalto	0,68

Fonte: Anexo C à OS Nr 008 - EscOCP/CMNE de 2015

Quanto aos valores de índice composto de risco de seca, eles foram retirados da plataforma DRAI (Drought Risk Assessment Interface, 2023). Foi utilizado o ano de 2019 para obtenção dos índices, por ser o dado mais atual disponível na plataforma. Foi realizada uma análise para determinar qual mês utilizar para o modelo. Na avaliação dos valores dos índices para cada mês, verificou-se que o mês de novembro foi o que teve maiores índices naquele ano, demonstrando, assim, um período mais seco. Optou-se, então, por utilizá-lo, por estar a favor da segurança. A Figura 4 apresenta os valores do índice para o ano de 2019 e a Tabela 2 a sua categorização.



Figura 4 - Valores do índice composto de risco de seca para o ano de 2019

Tabela 2 - Categorias para o índice de risco

Índice de Risco (IR)	Categoria
0,00<=IR<0,15	Nenhum
0,15<=IR<0,20	Muito baixo
0,20<=IR<0,25	Baixo
0,25<=IR<0,30	Moderado
0,30<=IR<0,35	Alto
0,35<=IR<1,00	Muito alto

Fonte: Adaptado de Bravo (2021)

Finalmente, para o parâmetro m , que representa o número máximo de poços a serem perfurados, atribuiu-se valor igual a 388, sendo este o número de nós que atendem à restrição de probabilidade de ocorrência de água subterrânea maior ou igual a 50%. Todavia, em um cenário real, esse número seria limitado por uma restrição orçamentária, de forma que, conhecido o custo de instalação de um poço, seria possível determinar o número máximo de poços que poderiam ser financiados. Adotou-se, ainda, para este estudo de caso, $\alpha = 0$, de forma a não obrigar que os m poços sejam perfurados. Assim, se o modelo encontrar uma solução que exija um menor número de poços perfurados, essa solução seria mais interessante do ponto de vista financeiro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a resolução do problema de programação matemática, foi utilizado o *software* de modelagem AIMMS em um sistema operacional Windows 8.1 64-bit, com processador Core i7 e processador de 8GB de memória RAM. O modelo proposto e os parâmetros de entrada do estudo de caso foram inseridos no AIMMS. Em uma primeira etapa, executou-se a otimização multiobjetivo tal como o modelo apresentado na seção 3, ou seja, considerando o índice de risco de seca. Para a segunda etapa, retirou-se da função objetivo o parâmetro referente a esse índice e executou-se novamente uma otimização multiobjetivo considerando essa mudança, em outras palavras, desprezando o índice de risco. Finalmente, em uma terceira etapa, executou-se as otimizações mono-objetivo, para fins de comparação. O modelo de programação matemática inteira mista foi resolvido pelo *solver* CPLEX 20.1. Foram criadas 546.867 variáveis, sendo 546.860 inteiras, e as soluções ótimas foram obtidas em 9.786,08 segundos, utilizando 4.011,3 Mb de memória, para a primeira etapa, e em 11.047,69 segundos, utilizando 3.552,6 Mb de memória, para a segunda etapa. As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados das duas otimizações. É possível verificar, por meio delas, que o modelo retorna diferentes localizações para os poços e alocações poço-cisterna dependendo da consideração ou não do índice de risco de seca. A Tabela 3, por sua vez, apresenta os resultados obtidos em cada otimização segundo os diferentes objetivos. A numeração das funções objetivos encontra-se de acordo com a ordem lexicográfica definida na Equação 5.

Por meio da análise da Tabela 3, é possível verificar que as duas otimizações apresentaram valores bem semelhantes no que tange aos critérios analisados. A otimização com índice de risco apresentou melhor resultado para a função objetivo referente aos aspectos físicos e sociais, porém apresentou maior custo de transporte, o que pode ser explicado pela alocação das cisternas a poços mais confiáveis (maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea), mesmo estando a distâncias maiores. A distância máxima cisterna-poço obtida nas duas otimizações corresponde à distância de serviço limite considerada no estudo de caso.

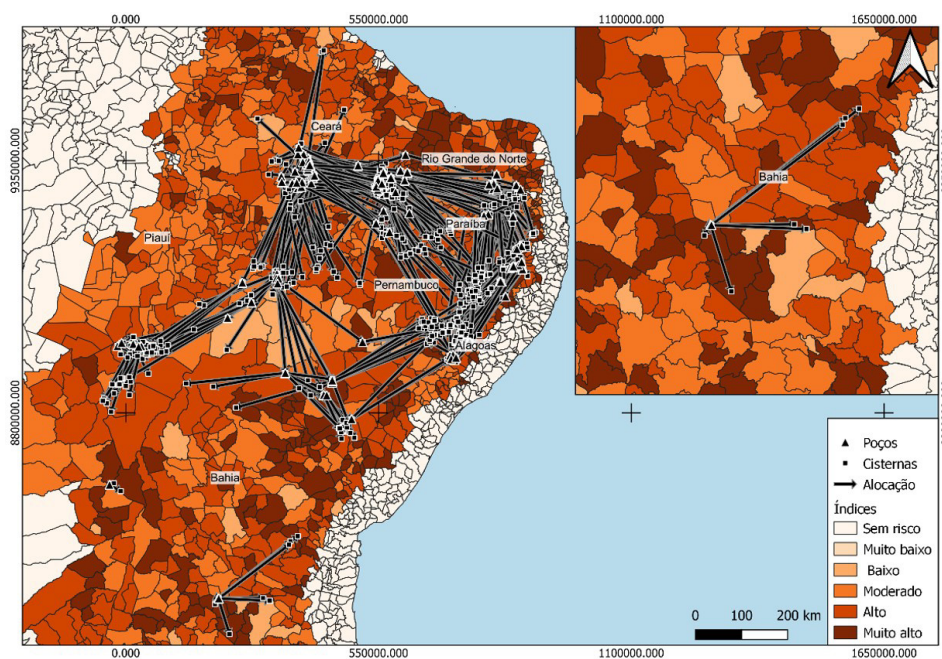


Figura 5 - Resultado da otimização multiobjetivo com índice de risco.

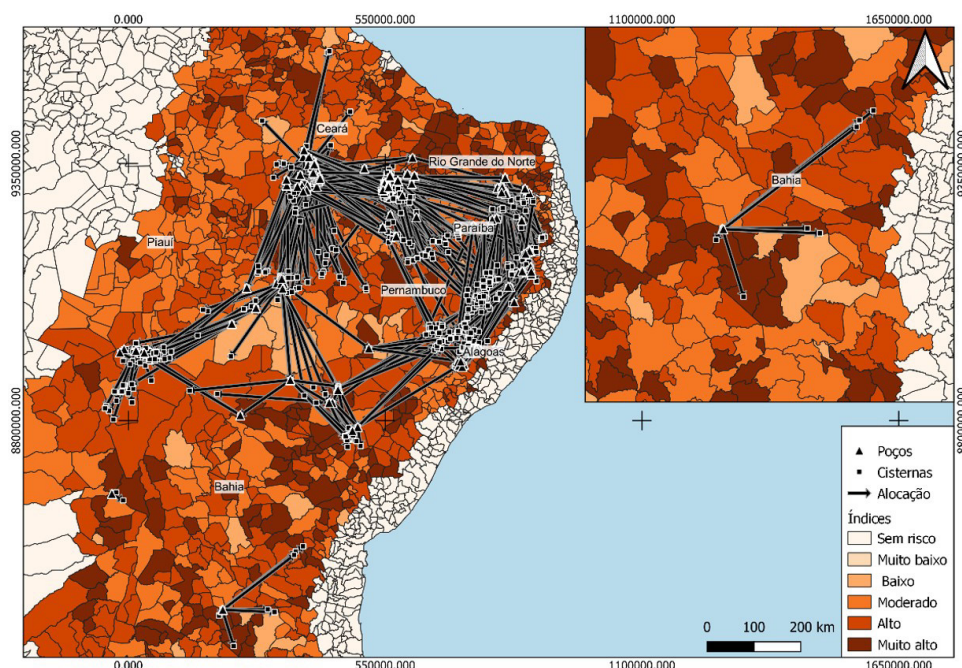


Figura 6 - Resultado da otimização multiobjetivo sem índice de risco.

Tabela 3 - Comparação dos resultados das otimizações multiobjetivo

	Otimização com índice de risco	Otimização sem índice de risco
Quantidade de pontos com maior favorabilidade hidrogeológica escolhidos pelo modelo para localizar poços ($\sum_j y_j$)	388	388
Aspectos físicos e sociais (F01)	-268.689,43	-268.352,30
Custo de transporte (F02)	151.169.484,70	149.458.816,30
Custo de instalação (F03)	7.104.454,60	7.104.454,60
Distância máx. cisterna-poço (F04)	250	250

Tabela 4 - Resultados das otimizações mono-objetivo

	F01	F02	F03	F04
Qtde de poços localizados ($\sum_j y_j$)	388	388	134	388
Aspectos físicos e sociais (F01)	-268.678,90	-231.267,24	-233.401,90	-231.315,74
Custo de transporte (F02)	152.387.251,45	9.964.177,04	118.057.314,10	45.371.954,74
Custo de instalação (F03)	7.104.454,60	7.104.454,60	2.453.600,30	7.104.454,60
Distância máx. cisterna-poço (F04)	250	154	250	154

Já pela comparação da Tabela 3 com a Tabela 4, é possível perceber a coerência dos resultados, uma vez que os menores valores obtidos para cada objetivo foram os referentes à otimização para aquela função objetivo em específico (otimização mono-objetivo). Por sua vez, a otimização multiobjetivo foi a que obteve melhor desempenho, considerando todos os objetivos na ordem lexicográfica considerada.

Em termos de ganho com relação às duas execuções, isso se mostra mais relevante no âmbito social. A utilização do índice composto de risco de seca como parâmetro do modelo objetiva priorizar as comunidades mais afetadas pela seca. Essa priorização no modelo se dá por meio da alocação de poços localizados em pontos com maior probabilidade de ocorrência de água subterrânea a essas comunidades.

Sendo assim, pela análise dos resultados obtidos nas otimizações (Tabela 5), é possível verificar que para a otimização que considera esse índice a probabilidade média dos poços alocados segue a classificação de risco das comunidades, em que comunidades com maior risco de seca são alocadas a poços em localidades com maior probabilidade de água. Por outro lado, a otimização que não considera esse índice não segue a mesma lógica de risco. Isso deixa evidente o ganho social de se considerar o índice de risco como forma de priorização no modelo, uma vez que as comunidades com maior risco de seca serão alocadas a poços localizados em pontos com maior probabilidade de ocorrência de águas subterrâneas, representando uma maior probabilidade de que suas demandas sejam atendidas.

Tabela 5 - Análise das probabilidades médias obtidas nas otimizações para cada classe de risco

Risco	Probabilidade média de ocorrência de água	
	Otimização com índice de risco	Otimização sem índice de risco
Alto	1,00	0,98
Moderado	0,98	0,98
Baixo	0,98	0,98
Muito baixo	0,96	0,98

CONCLUSÕES

Este artigo propõe um modelo de locação-alocação de facilidades voltado para auxiliar na tomada de decisão referente aos locais indicados para perfuração de poços que tenham maior probabilidade de obtenção de um poço produtivo, bem como que priorizem as comunidades inseridas em locais com maior índice de risco de seca. O modelo, multiobjetivo, considera objetivos conflitantes que buscam uma solução mais eficiente, econômica e equitativa. O estudo de caso mostrou o ganho social obtido ao considerar um índice de risco de seca como forma de priorização das comunidades mais afetadas ao comparar os resultados das otimizações com e sem esse parâmetro. Além desse ganho social, ficou evidente que, com a consideração da probabilidade de ocorrência de água subterrânea como um dos parâmetros, inclusive restringindo os pontos que podem vir a localizar poços, o modelo contribui para o aumento das taxas de sucesso na obtenção de poços produtivos. E, apesar do cenário utilizado para o estudo de caso, o modelo pode ser facilmente adaptado para ser aplicado em outros contextos.

Diante disso, este trabalho representaria uma economia tanto para as operações de perfuração de poços como para as de distribuição de água, uma vez que contribuiria para o aumento da probabilidade de obtenção de água subterrânea nas perfurações, escolhendo pontos com maior favorabilidade hidrogeológica, e, assim, aumentaria também as chances de atendimento da demanda por água, além de otimizar o número de poços necessários para o abastecimento e a proximidade às comunidades. Assim, com o capital economizado, seria possível ampliar a rede logística, contemplando um número ainda maior de beneficiados. Esta seria uma contribuição significativa, uma vez que, segundo a Pesquisa de Informações Básicas Municipais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018a), as ações realizadas nos municípios do Semiárido para evitar ou minimizar os danos causados pela seca ainda estão fortemente concentradas no abastecimento emergencial de água, sobretudo, por meio dos carros-pipas e da construção de poços.

Além disso, tendo em vista que, com as mudanças climáticas, o número de pessoas atingidas pela seca deve aumentar e as condições dos países em desenvolvimento, que sofrem com falta de infraestrutura e investimentos governamentais, não contribuem para a melhoria da situação, este trabalho tem relevância, inclusive, quando levados em consideração os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (Organização das Nações Unidas), principalmente: fome zero e agricultura sustentável, uma vez que fortalece a capacidade de adaptação às secas, contribui para uma agricultura mais resiliente e favorece a produção de alimentos; água potável e saneamento, na medida em que assegura o abastecimento de água doce e reduz o número de pessoas afetadas pela escassez hídrica; e ação contra a mudança global do clima, pois reforça a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países, bem como integra medidas relacionadas à mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais (Nações Unidas Brasil, 2023).

REFERÊNCIAS

- Abuzied, S. M., & Alrefae, H. A. (2017). Mapping of groundwater prospective zones integrating remote sensing, geographic information systems and geophysical techniques in El-Qaà Plain area, Egypt. *Hydrogeology Journal*, 25(7), 2067.
- Alpino, T. A., Sena, A. R. M. D., & Freitas, C. M. D. (2016). Desastres relacionados à seca e saúde coletiva—uma revisão da literatura científica. *Ciência & Saúde Coletiva*, 21, 809-820.
- Alvalá, R., Cunha, A. P., Brito, S. S. B., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L. L., & Carvalho, M. (2017). Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(Supl. 1), e20170209.
- Bravo, R. Z. B. (2021). *Monitoramento e alerta de secas no Brasil: nova abordagem baseada em um índice de risco* (Tese de Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Bravo, R. Z. B., Cunha, A. P. M. D. A., Leiras, A., & Oliveira, F. L. C. (2021). A new approach for a drought composite index. *Natural Hazards*, 108(1), 755-773.

- Chen, Y., & Lai, Z. (2022). A multi-objective optimization approach for emergency medical service facilities location-allocation in rural areas. *Risk Management and Healthcare Policy*, 15, 473.
- Church, R., & Revelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1), 101-118.
- Comando Militar do Nordeste. (2015). *Ordem de serviço nº 008, de 17 de agosto de 2015. Regula a participação do Comando Militar do Nordeste (CMNE) no Programa Emergencial de Distribuição de Água Potável no semiárido brasileiro – Operação Carro-pipa*. Recife: Comando Militar do Nordeste.
- Cornuejols, G., Fisher, M., & Nemhauser, G. L. (1977). On the uncapacitated location problem. *Annals of Discrete Mathematics*, 1, 163-177.
- Cunha, A. P. M. A., Marchezini, V., Lindoso, D. P., Saito, S. M., & Alvalá, R. C. S. (2019). The challenges of consolidation of a drought-related disaster risk warning system to Brazil. *Sustentabilidade em Debate*, 10(1), 43-76.
- Cunha, M. D. C., & Antunes, A. P. (1997). On the efficient location of pumping facilities in an aquifer system. *International Transactions in Operational Research*, 4(3), 175-184.
- Drought Risk Assessment Interface – DRAI. (2023). Recuperado em 18 de janeiro de 2023, de <https://drai.live/>
- Daskin, M. (1997). Network and discrete location: models, algorithms and applications. *The Journal of the Operational Research Society*, 48(7), 763-764.
- Erdoğan, G., Stylianou, N., & Vasilakis, C. (2019). An open source decision support system for facility location analysis. *Decision Support Systems*, 125, 113116.
- Exército Brasileiro. (2019, 12 de setembro). *Exército brasileiro finaliza a entrega de mais de 300 poços artesanais no semiárido nordestino*. Recuperado em 08 de setembro de 2022, de https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/MjaG93KcunQI/content/id/10455464
- Exército Brasileiro. (2021). *Operação carro pipa*. Recuperado em 08 de setembro de 2022, de <http://sedec.5cta.eb.mil.br/>
- Feitosa, F., Alvalá, R., Cunha, A. P., Brito, S. S., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L., & Carvalho, M. A. (2008). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID.
- Ferreira, J., Cunha, M. C., Vieira, J., & Monteiro, J. P. (2009). Optimized exploitation of aquifers: application to the Querença-Silves aquifer system. *Water Resources Management*, 125, 3.
- Gahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 116, 454-471.
- Guo, E., Liu, X., Zhang, J., Wang, Y., Wang, C., Wang, R., & Li, D. (2017). Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 553, 231-247.
- Gutiérrez, A. P. A., Engle, N. L., Nys, E. D., Molejón, C., & Martins, E. S. (2014). Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes*, 3, 95-106.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450-459.
- Hakimi, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3), 462-475.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., Ouyang, W., & Cheng, H. (2017). An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environmental Modelling & Software*, 91, 199-209.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2018a). *Pesquisa de informações básicas municipais - 2017*. Recuperado em 23 de janeiro de 2023, de <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/financas-publicas/19879-suplementos-munic2.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2018b). *Semiárido brasileiro*. Recuperado em 30 de setembro de 2021, de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html>
- Lin, Y., Jia, H., Yang, Y., Tian, G., Tao, F., & Ling, L. (2018). An improved artificial bee colony for facility location allocation problem of end-of-life vehicles recovery network. *Journal of Cleaner Production*, 205, 134-144.
- Machado, T. T. V., Dias, J. T., & Silva, T. C. D. (2017). Evolução e avaliação das políticas públicas para a atenuação dos efeitos da seca no semiárido brasileiro. *Gaia Scientia*, 11(2), 84-103.
- Madrucci, V., Taioli, F., & Araújo, C. C. (2008). Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 153-173.

- Maharjan, R., & Hanaoka, S. (2020). A credibility-based multi-objective temporary logistics hub location-allocation model for relief supply and distribution under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100727.
- Marengo, J. A. (2010). Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, 27, 149-175.
- Mogale, D. G., Kumar, M., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2018). Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network. *Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review*, 111, 40-69.
- Mohammadi, S., Darestani, S. A., Vahdani, B., & Alinezhad, A. (2020). A robust neutrosophic fuzzy-based approach to integrate reliable facility location and routing decisions for disaster relief under fairness and aftershocks concerns. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106734.
- Mohammed, A., & Wang, Q. (2017). Multi-criteria optimization for a cost-effective design of an RFID-based meat supply chain. *British Food Journal*, 119(3), 676-689.
- Nações Unidas Brasil. (2023). *Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. Recuperado em 23 de janeiro de 2023, de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Nag, S. K., & Kundu, A. (2016). Delineation of groundwater potential zones in hard rock terrain in Kashipur block, Purulia district, West Bengal, using geospatial techniques. *International Journal of Waste Resources*, 6(1), 1000201.
- Nam, W. H., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Tadesse, T., & Wilhite, D. A. (2015). Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management*, 160, 106-117.
- National Aeronautics and Space Administration – NASA. (2023). Recuperado em 23 de janeiro de 2023, de www2.jpl.nasa.gov/srtm/
- Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.
- Ng, T. L. (2014). Expanding neighborhood tabu search for facility location problems in water infrastructure planning. In *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 3851-3854). Nova York: IEEE.
- Olivares, B., Cortez, A., Lobo, D., Parra, R., Rey, J., & Rodriguez, M. (2017). Evaluation of agricultural vulnerability to drought weather in different locations of Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 34(1), 103-129.
- Ortega-Gaucin, D., Pérez, M. L., & Cortés, F. A. (2016). Drought risk management in Mexico: progress and challenges. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(2), 161-170.
- Poonia, V., Goyal, M. K., Gupta, B. B., Gupta, A. K., Jha, S., & Das, J. (2021). Drought occurrence in different river basins of India and blockchain technology based framework for disaster management. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127737.
- Roman, O., Hoque, S. F., Ford, L., Salehin, M., Alam, M. M., Hope, R., & Hall, J. W. (2021). Optimizing rural drinking water supply infrastructure to account for spatial variations in groundwater quality and household welfare in coastal Bangladesh. *Water Resources Research*, 57(8), e2021WR029621.
- Singh, K. K. K., Bharti, A. K., Pal, S. K., Prakash, A., Kumar, R., & Singh, P. K. (2019). Delineation of fracture zone for groundwater using combined inversion technique. *Environmental Earth Sciences*, 78(4), 1-12.
- Tánago, G. I., Urquijo, J., Blauhut, V., Villarroya, F., & Stefano, L. D. (2016). Learning from experience: a systematic review of assessments of vulnerability to drought. *Natural Hazards*, 80(2), 951-973.
- Toregas, C., Swain, R., Reville, C., & Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363-1373.
- Vieira, Y. E. M. (2019). *Planejamento de obras de perfuração de poços: procedimento integrado à distribuição de água em regiões afetadas pela seca* (Dissertação de Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Vieira, Y. E. M., Bandeira, R. A. M., & Silva Júnior, O. S. (2021). Multi-depot vehicle routing problem for large scale disaster relief in drought scenarios: the case of the Brazilian northeast region. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102193.
- Wang, J., & Meng, Y. (2013). An analysis of the drought in Yunnan, China, from a perspective of society drought severity. *Natural Hazards*, 67(2), 431-458.
- Wang, L., Shi, H., & Gan, L. (2018). Healthcare facility location-allocation optimization for China's developing cities utilizing a multi-objective decision support approach. *Sustainability*, 10(12), 4580.
- Wang, Y., Zhao, W., Zhang, Q., & Yao, Y. B. (2019). Characteristics of drought vulnerability for maize in the eastern part of Northwest China. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9.

- Wilhite, D. A. (2000). *Drought: a global assessment*. Londres: Routledge. Drought as a natural hazard: concepts and definitions, pp. 3-18.
- Wu, Y., Bake, B., Zhang, J., & Rasuloy, H. (2015). Spatio-temporal patterns of drought in North Xinjiang, China, 1961–2012 based on meteorological drought index. *Journal of Arid Land*, 7(4), 527-543.
- Zamani, G. H., Gorgievski-Duijvesteijn, M. J., & Zarafshani, K. (2006). Coping with drought: towards a multilevel understanding based on conservation of resources theory. *Human Ecology*, 34(5), 677-692.
- Zanella, M. E. (2014). Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. *Caderno Prudentino de Geografia*, 1(36), 126-142.
- Zhang, D. D., Yan, D. H., Lu, F., Wang, Y. C., & Feng, J. (2015). Copula-based risk assessment of drought in Yunnan province, China. *Natural Hazards*, 75(3), 2199-2220.

Contribuições dos autores:

Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes: concepção e desenho do estudo; revisão da literatura; análise e interpretação de dados; elaboração do manuscrito.

Orivalde Soares da Silva Júnior: concepção e desenho do estudo; revisão intelectual do manuscrito; aprovação final da versão a ser submetida à revista.

Renata Albergaria de Mello Bandeira: concepção e desenho do estudo; revisão intelectual do manuscrito; aprovação final da versão a ser submetida à revista.

Jesus Emmanuel Medeiros Vieira: concepção e desenho do estudo; aquisição dos dados.