

Otimização da Rede de Terapia Renal Substitutiva no SUS: Uma Abordagem de Localização-Alocação na Macrorregião de Caruaru – PE

Alex Junior Lima de Oliveira¹, Cleiton de Lima Ricardo², Marcílio Ferreira dos Santos³

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA),
Bacharelado Interdisciplinar de Ciências e Tecnologia, Caruaru, PE, Brasil.
(alex.jloliveira@ufpe.br)

² Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA),
Núcleo Interdisciplinar de Ciências Exatas e da Natureza, Caruaru, PE, Brasil.
(cleiton.lricardo@ufpe.br)

³ Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA),
Núcleo de Formação Docente, Caruaru, PE, Brasil.
(Marcilio.santos@ufpe.br)

Resumo: A Doença Renal Crônica (DRC) impõe expressivos desafios logísticos e financeiros ao Sistema Único de Saúde (SUS), especialmente devido à centralização geográfica do tratamento de hemodiálise. Este estudo objetivou otimizar a rede de Terapia Renal Substitutiva (TRS) na macrorregião de saúde de Caruaru-PE, visando minimizar os custos de deslocamento associados ao Tratamento Fora de Domicílio (TFD). Para isso, formulou-se o Problema de Localização de Instalações Capacitadas (CFLP) por meio de Programação Linear Inteira Mista (MILP), utilizando dados secundários de demanda extraídos de forma automatizada do DATASUS (2020–2025). O modelo foi desenvolvido em Python 3.11 com a biblioteca PuLP e resolvido de forma ótima com o solver COIN-OR Branch and Cut (CBC). Os resultados indicam que a abertura de novas unidades em Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe reduz o custo de transporte em 45,5% e o número de pacientes em trânsito de 195 para 139. O custo total otimizado do sistema (Z), ponderando custos fixos operacionais e logísticos, gerou uma economia líquida de R\$ 307.120,70 anuais em relação à linha de base centralizada. A análise de sensibilidade confirmou a robustez espacial das instalações selecionadas frente a projeções de crescimento da demanda em até 20%. Conclui-se que a descentralização planejada, baseada em otimização matemática, é viável e economicamente favorável, servindo como ferramenta de suporte à decisão para gestores públicos de saúde na mitigação de iniquidades no acesso à diálise.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional; Otimização em Saúde; Hemodiálise; Tratamento Fora de Domicílio; Localização-Alocação.

INTRODUÇÃO

A Doença Renal Crônica (DRC) configura-se como um dos problemas de saúde pública mais expressivos do século XXI, caracterizada pela perda progressiva e irreversível da função renal. No Brasil, a prevalência de pacientes em programa crônico de diálise mais que dobrou em menos de uma década, impulsionada pelo envelhecimento populacional e pela elevação da prevalência de hipertensão arterial sistêmica e diabetes mellitus (MARINHO et al., 2017). O Censo Brasileiro de Diálise de 2023 estimou mais de 157 mil pessoas em terapia dialítica no país, com a hemodiálise respondendo por aproximadamente 90% dos casos tratados no âmbito do Sistema Único de Saúde — SUS (SOCIEDADE BRASILEIRA DE NEFROLOGIA, 2023).

A natureza crônica e intensiva do tratamento hemodialítico — tipicamente realizado em três sessões semanais ao longo de toda a vida do paciente, salvo indicação de transplante — impõe um desafio logístico singular aos sistemas de saúde. Quando a oferta de clínicas especializadas se concentra em poucos polos urbanos, parcela significativa da população passa a depender do Tratamento Fora de Domicílio (TFD), modalidade do SUS instituída pela Portaria SAS/MS nº 55/1999. Embora o TFD garanta o acesso constitucional à saúde, representa um ônus financeiro recorrente para o Estado e um desgaste físico documentado para o paciente renal crônico.

A literatura internacional evidencia essa relação de forma consistente. O estudo DOPPS (Dialysis Outcomes and Practice Patterns Study),

conduzido com 20.994 pacientes em múltiplos países, demonstrou que o tempo de deslocamento até a unidade dialítica associa-se de forma independente a menor qualidade de vida, menor adesão ao tratamento e maior mortalidade (MOIST et al., 2008). No contexto brasileiro, Santos et al. (2024) confirmaram a existência de marcantes iniquidades geográficas no acesso à terapia renal substitutiva, com as regiões Norte e Nordeste apresentando distâncias médias de deslocamento substancialmente maiores que o Sul e o Sudeste. No Nordeste, a prevalência de diálise situa-se em 608 pacientes por milhão de população (pmp), contra 1.019 pmp no Sudeste (SOCIEDADE BRASILEIRA DE NEFROLOGIA, 2023).

Do ponto de vista metodológico, a Pesquisa Operacional oferece um arcabouço consolidado para endereçar esse tipo de problema por meio dos modelos de localização-alocação de instalações. Originados nos trabalhos seminais de Hakimi (1964), esses modelos evoluíram para formulações capazes de incorporar restrições de capacidade, sendo amplamente aplicados ao planejamento de redes de saúde pública (DASKIN; DEAN, 2004; AHMADI-JAVID; SEYEDI; SYAM, 2017). Em particular, o Problema de Localização de Instalações Capacitadas (Capacitated Facility Location Problem — CFLP) busca determinar simultaneamente onde instalar novas unidades de serviço e como alocar a demanda entre as instalações disponíveis, minimizando o custo total do sistema sujeito a restrições de capacidade por meio de Programação Linear Inteira Mista — MILP (ALBANESE, 2023). Aplicações dessa família de modelos ao planejamento de saúde no Brasil já demonstraram ganhos expressivos em estudos de reconfigurações ótimas de unidades de saúde em casos reais brasileiros (OLIVEIRA; MOTA, 2012).

A despeito da relevância desses modelos, observa-se uma lacuna na literatura nacional referente ao planejamento regionalizado da TRS, em especial na região do Agreste pernambucano. Embora existam estudos focados em grandes centros metropolitanos ou análises agregadas em nível estadual, há escassez de modelagens matemáticas de localização-alocação capacitadas que considerem a microrregião de saúde sob a ótica de pipelines de dados automatizados e atualizados do DATASUS. A maioria das abordagens vigentes utiliza dados estáticos ou não considera as restrições operacionais específicas e dinâmicas do TFD regional. Esta lacuna impede que gestores locais tomem decisões ágeis fundamentadas em dados reais de fluxo de pacientes e custos logísticos vigentes.

Para preencher essa lacuna, o presente trabalho aplica um modelo MILP estruturado como CFLP à rede de hemodiálise do polo macrorregional de saúde de Caruaru-PE, região do Agreste

pernambucano caracterizada por forte centralização dos serviços de alta complexidade. Utilizando dados públicos do DATASUS extraídos de forma automatizada para o período de 2020 a 2025, o estudo tem como objetivos: (i) mapear a demanda atual por hemodiálise nos 26 municípios no raio de 50 km de Caruaru e quantificar o custo logístico vigente; (ii) determinar, via otimização matemática, a configuração ótima de localização de novas clínicas e o roteamento correspondente de pacientes; e (iii) avaliar a robustez dessa configuração frente a cenários prospectivos de crescimento da DRC.

MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de um estudo de pesquisa operacional, retrospectivo e de base populacional, focado na otimização da rede de Terapia Renal Substitutiva (TRS). A área de estudo compreendeu a microrregião de saúde de Caruaru, Pernambuco. Utilizou-se a malha vetorial municipal do IBGE para calcular os centroides geométricos de cada município por meio do método do ponto representativo (`representative_point()` da biblioteca GeoPandas), que garante geometricamente que o ponto de referência esteja contido dentro dos limites do polígono municipal, evitando distorções em polígonos côncavos. A partir de Caruaru, estabeleceu-se um raio de cobertura de 50 quilômetros baseado na distância geodésica de Vincenty, capturando 26 municípios. Estes nós funcionaram simultaneamente como pontos de origem da demanda e localizações candidatas à alocação de novas infraestruturas de atendimento.

2.1 Coleta e Processamento Automatizado de Dados

A coleta de dados baseou-se em fontes secundárias de acesso público do DATASUS, extraídas de forma automatizada para o período de 2020 a 2025. A demanda por tratamento hemodialítico foi extraída do Sistema de Informação Ambulatorial (SIA/SUS), por meio de um algoritmo de extração direta via protocolo FTP (`ftplib`) conectado aos servidores do DATASUS. Foram baixados os arquivos de Produção Ambulatorial (PA) do estado de Pernambuco, com filtragem pelo código de procedimento 03.05.01.010-7 (hemodiálise por sessão) e pelo campo PA_MUNPCN (município de residência do paciente).

Os arquivos, originalmente no formato proprietário comprimido `.dbc`, foram convertidos com a biblioteca `pyreaddbc` e armazenados localmente em formato serializado `.pkl` (Pandas DataFrame) para otimizar execuções subsequentes. O volume de sessões registrado na série histórica foi convertido em quantidade equivalente de pacientes ativos, assumindo a premissa clínica padrão de 13 sessões

mensais obrigatórias por paciente (156 sessões por ano) para tratamento crônico contínuo.

A capacidade física de atendimento foi mapeada utilizando a base de Habilitações (HB) do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES). A identificação dos estabelecimentos habilitados para hemodiálise utilizou o filtro de classificação de grupo habilitado SGRUPHAB = "1504", correspondente à Habilitação em Atenção Especializada em DRC com Hemodiálise, instituída pela Portaria GM/MS nº 1.675/2018. Os estabelecimentos identificados no CNES/HB foram cruzados com a base de equipamentos (CNES/EQ) para quantificar o parque ativo de máquinas de hemodiálise. A capacidade máxima de atendimento de cada polo existente foi definida pelo parâmetro padrão de 10 pacientes crônicos por máquina instalada, premissa baseada no funcionamento do serviço em três turnos diários e uso de escalas alternadas de pacientes às segundas/quartas/sextas e terças/quintas/sábados, conforme os requisitos de dimensionamento técnico-sanitário da RDC ANVISA nº 11/2014. A capacidade de novas clínicas hipotéticas candidatas foi padronizada em 20 máquinas de diálise (equivalente a 200 pacientes), correspondendo ao porte operacional médio padrão de unidades satélites de nefrologia no SUS.

2.2 Formulação Matemática do Modelo de Otimização (MILP)

Para otimizar o fluxo intermunicipal de pacientes e os custos de TFD, formulou-se o Problema de Localização de Instalações Capacitadas (CFLP) estruturado como Programação Linear Inteira Mista (MILP). O modelo matemático é definido a seguir:

Conjuntos

- I : Conjunto de municípios de origem de demanda de pacientes, indexados por $i \in I$ (total de 26 municípios).
- J_{exist} : Conjunto de municípios com clínicas de hemodiálise ativas já existentes, indexados por $j \in J_{exist}$ (no caso, apenas Caruaru-PE).
- J_{cand} : Conjunto de municípios candidatos a receberem novas clínicas, indexados por $j \in J_{cand}$ (total de 25 municípios candidatos).
- J : Conjunto de todos os municípios de destino possíveis ($J = J_{exist} \cup J_{cand}$).

Parâmetros:

- d_i : Demanda anual estimada de pacientes de hemodiálise originários do município $i \in I$.
- Q_j : Capacidade máxima de atendimento de pacientes na clínica do município $j \in J$ ($Q_j = 10 \times \text{máquinas}_j$ para clínicas existentes; $Q_j = 200$ pacientes para novas clínicas candidatas com 20 máquinas padronizadas).

- c_{ij} : Custo logístico anual de TFD para deslocar um paciente do município de origem $i \in I$ para a clínica no município $j \in J$. É calculado com base na distância de Vincenty multiplicada pelo referencial de ressarcimento quilométrico da Portaria SAS/MS nº 55/1999, considerando 156 deslocamentos de ida e volta por ano:
- f_j : Custo fixo anual de operação da clínica candidata no município $j \in J_{cand}$. Estimado em R\$ 355.680,00 por ano, com base no valor médio de ressarcimento do procedimento de hemodiálise do SIGTAP 2025 (R\$ 22,80 por sessão por máquina operando na capacidade padronizada de 20 máquinas). Para as clínicas existentes, esse custo fixo operacional é nulo no modelo ($f_j = 0, \forall j \in J_{exist}$), pois sua infraestrutura já está implantada e custeada na rede atual.
- p : Quantidade máxima permitida de novas clínicas a serem abertas na macrorregião (definido no cenário base como $p = 2$).

Variáveis de Decisão:

- $y_j \in \{0,1\}$: Variável binária de decisão de localização. Assume o valor 1 se uma nova clínica de hemodiálise for aberta no município candidato $j \in J_{cand}$, e 0 caso contrário.
- $x_{ij} \geq 0$: Variável contínua de alocação que representa a quantidade (fluxo) de pacientes do município de origem $i \in I$ direcionados para a clínica no município de destino $j \in J$.

Função Objetivo:

Minimizar o custo anual consolidado do sistema, que integra as despesas logísticas de TFD e os custos operacionais fixos das novas unidades instaladas:

$$\min Z = \sum_{j \in J_{cand}} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Restrições:

1. Atendimento integral de toda a demanda: Garante que todos os pacientes de cada município de origem sejam alocados a alguma clínica:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

2. Capacidade física das clínicas existentes: Limita o fluxo de pacientes alocados às clínicas já ativas ao teto de sua capacidade instalada:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q_j, \quad \forall j \in J_{exist} \quad (3)$$

3. Capacidade condicional para novas clínicas candidatas (Acomplamento Big-M): Limita o

fluxo de pacientes em novas clínicas candidatas. Se o município j não for selecionado para abertura ($y_j = 0$), o fluxo de entrada x_{ij} é forçado a zero; caso seja aberto ($y_j = 1$), a capacidade operacional máxima de 200 pacientes é liberada:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q_j y_j, \quad \forall j \in J_{cand} \quad (4)$$

4. Limite físico-orçamentário de novas instalações: Restringe o número de novos estabelecimentos abertos ao teto orçamentário e logístico planejado:

$$\sum_{j \in J_{cand}} y_j \leq p \quad (5)$$

5. Condições de não-negatividade e integridade:

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J_{cand} \quad (7)$$

2.3 Definição dos Cenários de Linha de Base (Baselines)

Para validar a efetividade econômica da otimização proposta pelo modelo MILP/CFLP, foram definidos dois cenários de linha de base (baselines) para comparação direta:

1. Baseline 1 (Status Quo - Rede Centralizada): Mantém a rede em sua configuração histórica de centralização absoluta, onde nenhuma nova clínica é aberta ($p = 0$). Consequentemente, todos os 296 pacientes mapeados no raio de 50 km de Caruaru são alocados à única clínica disponível em Caruaru. O custo anual total do sistema é o custo de TFD decorrente desse fluxo centralizado.
2. Baseline 2 (Heurística de Proximidade Sem Capacidade): Representa um modelo de planejamento puramente geográfico e descentralizado. Cada município $i \in I$ aloca sua demanda para a clínica (existente ou candidata) mais próxima espacialmente (menor distância geodésica), ignorando qualquer limite de capacidade operacional ($Q_j = \infty$). Se a localidade mais próxima for um município candidato, assume-se obrigatoriamente a abertura da clínica ($y_j = 1$). Esse cenário simula uma política descentralizada que desconsidera os custos fixos de escala de manter múltiplas clínicas de baixo aproveitamento.

2.4 Implementação e Execução do Solver

A formulação algébrica e a renderização geoespacial foram desenvolvidas na linguagem Python 3.11. O modelo de otimização foi estruturado por meio da

biblioteca PuLP (versão 2.7.0). O solver utilizado para obter a solução exata foi o COIN-OR Branch and Cut (CBC), versão 2.10.3. A tolerância de gap relativo para convergência do algoritmo Branch and Cut foi configurada no padrão de 0,00% (gap zero), assegurando a obtenção do ótimo absoluto global, com limite de tempo de processamento estipulado em 600 segundos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta de forma neutra e descritiva os dados extraídos das fontes do SUS, a comparação direta entre os cenários de linha de base e a solução ótima do modelo MILP, e as tabelas resultantes das alocações e análises de sensibilidade.

3.1 Caracterização do Cenário Vigente (Baseline 1)

O cruzamento das bases de habilitações do CNES/HB com a base de equipamentos (CNES/EQ) identificou apenas o município de Caruaru-PE com clínicas habilitadas em hemodiálise (código de grupo 1504) dentro da macrorregião delimitada de 50 km de raio. Caruaru abriga três estabelecimentos distintos habilitados, totalizando um parque ativo de 50 máquinas instaladas. Com base na métrica operacional de 10 pacientes por máquina (RDC 11/2014), a capacidade máxima declarada da rede de Caruaru é de 500 pacientes ativos.

A extração automatizada de dados de produção ambulatorial do SIA/SUS no período de 2020 a 2025 quantificou um total de 296 pacientes crônicos ativos residindo no raio estudado. Desse total, 101 pacientes residem no próprio município de Caruaru, dispensando transporte intermunicipal. Os 195 pacientes restantes residem nos outros 25 municípios da microrregião e dependem ativamente do TFD para a realização do tratamento.

No cenário vigente (Baseline 1), a centralização gera um fluxo rodoviário anual acumulado de 156 viagens de ida e volta por paciente, resultando em um custo logístico anual total de R\$ 2.237.368,00 pago pelo Estado na forma de ressarcimento de TFD. A distância geodésica média de viagem para os pacientes em trânsito é de 44,7 km.

3.2 Comparativo entre Baselines e o Modelo Otimizado

A Tabela 1 apresenta a comparação detalhada das principais variáveis de desempenho logístico e financeiro entre o cenário atual (Baseline 1), o cenário heurístico puramente geográfico (Baseline 2) e a solução de otimização matemática proposta (MILP/CFLP).

Tabela 1. Comparativo de desempenho financeiro e logístico entre as linhas de base e a otimização MILP/CFLP.

Métrica Operacional e Financeira	Baseline 1 (Status Quo)	Baseline 2 (Heurística)	Otimização MILP/CFLP (Proposta)
Novas clínicas abertas (n)	0	5	2
Localidades das novas clínicas	Nenhuma	Gravatá, Santa Cruz, Bezerros, Bonito, Brejo	Gravatá, Santa Cruz do Capibaribe
Pacientes em trânsito intermunicipal (TFD)	195	87	139
Custo anual de TFD (R\$)	2.237.368,00	754.200,00	1.218.887,30
Custo fixo anual de novas clínicas (R\$)	0	1.778.400,00	711.360,00
Custo Total Consolidado do Sistema Z (R\$)	2.237.368,00	2.532.600,00	1.930.247,30
Economia líquida anual vs. Baseline 1 (R\$)	--	- 295.232,00 (Prejuízo)	307.120,70
Redução percentual no custo de TFD (%)	--	66,30%	45,50%
Redução percentual no Custo Total Z (%)	--	-13,2% (Acréscimo)	13,7%

3.3 Solução de Otimização e Roteamento Ótimo

O algoritmo de otimização processou o modelo MILP (composto por 25 variáveis binárias, 676 variáveis contínuas e 53 restrições operacionais) no solver CBC, convergindo para a solução ótima global com status "Optimal" em 0,42 segundos. O modelo determinou a abertura de duas novas unidades operacionais: uma no município de Gravatá (distância geodésica de 45,07 km de Caruaru) e outra no município de Santa Cruz do Capibaribe (distância geodésica de 45,42 km de Caruaru).

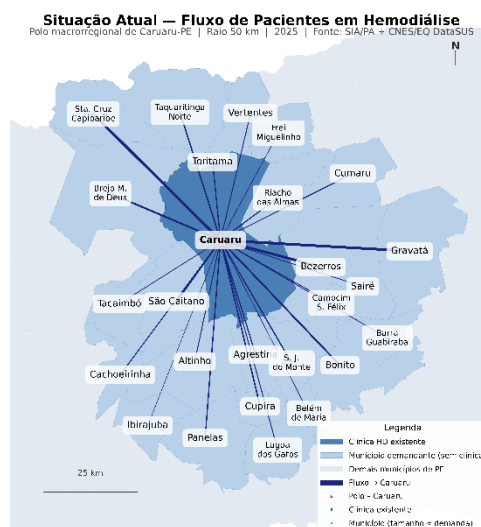
Com a abertura dessas duas clínicas, o volume de pacientes que realizam viagens intermunicipais sob o regime de TFD reduziu de 195 para 139 (queda de 28,7%). O custo anual de transporte logístico reduziu-se em 45,5%, caindo de R\$ 2.237.368,00 para R\$ 1.218.887,30. O custo fixo anual das duas

novas clínicas totalizou R\$ 711.360,00 (R\$ 355.680,00 por clínica).

Desta forma, o custo total do sistema otimizado (Z) fixou-se em R\$ 1.930.247,30, gerando uma economia líquida anual para o SUS de R\$ 307.120,70 (redução de 13,7% no orçamento consolidado anual, absorvendo integralmente o investimento fixo operacional das novas instalações). A Tabela 2 apresenta o roteamento ótimo sugerido pelo modelo, identificando o município de origem, o destino selecionado (clínica alocada), a quantidade de pacientes e os custos logísticos residuais.

Tabela 2. Resumo do roteamento ótimo de pacientes sob TFD e custos logísticos anuais no cenário otimizado (MILP).

Município de Origem (Nó i)	Clínica de Destino (Nó j)	Pacientes Alocados (x_{ij})	Custo Anual de TFD (R\$)
Bonito	Caruaru (Existente)	11	115.415,00
Bezerros	Caruaru (Existente)	18	112.296,00
São Caitano	Caruaru (Existente)	10	110.480,00
Brejo da Madre de Deus	Santa Cruz do Capibaribe (Nova)	12	108.423,00
Cupira	Caruaru (Existente)	8	93.926,00
Panelas	Caruaru (Existente)	7	91.556,00
Taquaritinga do Norte	Santa Cruz do Capibaribe (Nova)	8	47.444,00
Cumaru	Gravatá (Nova)	5	41.369,00
Vertentes	Santa Cruz do Capibaribe (Nova)	4	33.372,00



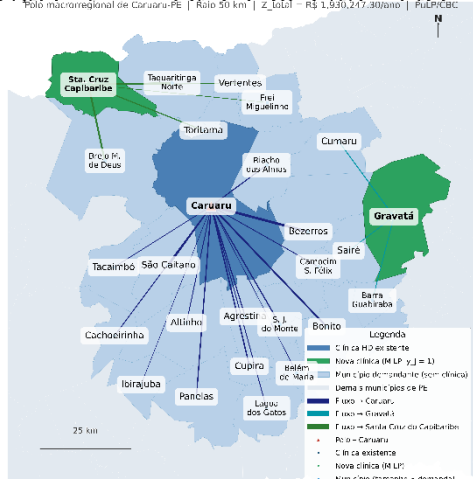


Tabela 3. Resultados da análise de sensibilidade com projeção de crescimento da demanda de pacientes por DRC (5 anos).

Cenário de Crescimento	Demanda Total (Pacientes)	Custo Total do Sistema Z (R\$/ano)	Localização Ótima das Novas Clínicas ($y_j = 1$)
Cenário Base (Otimizado)	296	1.930.247,30	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe
Crescimento de 4%	308	2.086.081,57	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe
Crescimento de 8%	320	2.374.211,70	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe

Crescimento de 12%	332	2.777.185,05	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe
Crescimento de 20%	355	3.593.099,00	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe
Crescimento de 30%	385	5.114.170,00	Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe

2. Santa Cruz do Capibaribe (Efeito de Rede): Santa Cruz do Capibaribe apresenta uma demanda isolada de 22 pacientes/mês. Sob uma análise individual simples, o custo de TFD gerado por esse grupo (R\$ 152.320,00/ano) não justificaria isoladamente o custo fixo de abertura da clínica (R\$ 355.680,00). No entanto, ao processar o modelo sob a ótica do CFLP, observa-se o surgimento de um "efeito de rede". A clínica de Santa Cruz do Capibaribe passa a funcionar como um polo

integrador para a sub-região norte do Agreste pernambucano, absorvendo a demanda de municípios adjacentes como Brejo da Madre de Deus, Taquaritinga do Norte, Vertentes, Toritama e Frei Miguelinho (cluster de 44 pacientes combinados). O custo de TFD consolidado desse cluster de origem geográfica, no cenário centralizado, atinge R\$ 241.562,00. Ao consolidar essa demanda regional sob a clínica de Santa Cruz do Capibaribe, o modelo reduz as distâncias de viagem e a despesa de transporte coletivo, validando a sustentabilidade financeira da clínica no modelo de custos consolidados. Esse redirecionamento de fluxos é visualizado de forma evidente na transição entre a rede centralizada (Figura 1a) e a descentralizada (Figura 1b), onde as novas clínicas de Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe atuam como bacias de atração gravitacional, interceptando a demanda periférica da macrorregião.

A comparação com a heurística de proximidade (Baseline 2) reforça a necessidade de modelos matemáticos acoplados com restrições de capacidade e custos operacionais. A Baseline 2, focada apenas na minimização geométrica da distância do paciente ao ponto mais próximo, propõe a abertura de 5 clínicas na macrorregião (Gravatá, Santa Cruz do Capibaribe, Bezerros, Bonito e Brejo da Madre de Deus). Embora essa abordagem reduza o TFD ao menor patamar histórico (R\$ 754.200,00) e alivie o desgaste físico de mais pacientes, a pulverização de recursos gera uma sobrecarga de custos fixos operacionais (R\$ 1.778.400,00). Isso eleva o custo total do sistema consolidado para R\$ 2.532.600,00 anuais, resultando em um prejuízo líquido de R\$ 295.232,00 em relação ao status quo centralizado. A otimização MILP/CFLP, ao limitar e selecionar estrategicamente duas aberturas, atinge o ponto de equilíbrio financeiro ótimo (Z de R\$ 1.930.247,30), equilibrando a acessibilidade geográfica com a sustentabilidade econômica.

3.5.2 Robustez Espacial e Resiliência Epidemiológica

Os dados apresentados na Tabela 3 da análise de sensibilidade indicam estabilidade estrutural na descentralização proposta. Em todos os cenários estressados de demanda — simulando o crescimento da DRC em horizontes temporais de 5 anos com aumentos acumulados de 4% a 30% —, as decisões binárias de localização mantiveram-se inalteradas ($y_{Gravatá} = 1$ e $y_{Santa Cruz} = 1$).

Essa estabilidade sugere que as bacias de atração gravitacional delimitadas pelas novas clínicas são estruturais e resilientes a flutuações na prevalência da

DRC. Para gestores e planejadores de saúde pública, essa constatação reduz o risco de obsolescência ou subaproveitamento de investimentos em infraestrutura física de saúde na microrregião ao longo do tempo.

3.5.3 Qualificação das Implicações em Políticas Públicas

Embora o modelo MILP indique viabilidade econômica e redução de custos logísticos, os resultados devem ser analisados à luz da complexidade regulatória e física do SUS. A otimização de custos logísticos sugerida pela modelagem matemática funciona sob pressupostos de alocação determinística e capacidade de financiamento estável. Na prática das redes de saúde do SUS, a descentralização planejada de serviços de alta complexidade como a hemodiálise envolve restrições reais adicionais:

1. Recursos Humanos Especializados: A habilitação de novos polos satélites de hemodiálise sob o código 1504 (Portaria GM/MS nº 1.675/2018) exige o dimensionamento mínimo de equipes médicas e de enfermagem especializadas, impondo a presença obrigatória de médicos nefrologistas e enfermeiros especializados em nefrologia por turno de atendimento. A escassez desses profissionais no interior do estado pode representar um gargalo na implementação real das clínicas selecionadas.
2. Requisitos de Infraestrutura e Saneamento: Os serviços de diálise exigem infraestrutura específica de biossegurança e tratamento de água de alta qualidade, regulados pela RDC ANVISA nº 11/2014. A viabilidade técnica de abertura de novas clínicas nos municípios indicados de Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe depende da adequação física dessas redes municipais de saneamento básico e suporte elétrico ininterrupto.
3. Capacidade Logística Municipal: O ressarcimento de TFD pressupõe trajetos estruturados e veículos municipais disponíveis. A redução teórica de 45,5% nas despesas de transporte pressupõe a reorganização administrativa das frotas de ambulâncias e ônibus municipais para convergirem aos novos polos descentralizados de atração.

Portanto, em vez de se classificar a descentralização como um "imperativo de saúde" ou que ela "garante o acesso universal", os resultados sugerem que ela se configura como uma diretriz de planejamento espacial de alta viabilidade econômica, que reduz o ônus logístico do SUS e o desgaste dos pacientes,

necessitando de estudos complementares de engenharia sanitária e atração de profissionais de saúde para sua execução final.

3.5.4 Limitações Metodológicas Categorizadas

Os resultados obtidos estão condicionados a limitações do desenho metodológico, que devem ser consideradas na interpretação das economias estimadas:

1. Distância Geodésica versus Trajeto Rodoviário Real: O modelo calculou os custos de TFD utilizando distâncias geodésicas de Vincenty entre os centroides dos polígonos municipais. Na malha de transporte real, as viagens ocorrem sobre rodovias e estradas locais, cujos trajetos tendem a ser de 20% a 40% mais extensos que as distâncias retilíneas ou geodésicas calculadas. Consequentemente, o custo logístico real do cenário centralizado (Baseline 1) e dos cenários descentralizados é subestimado no modelo. Essa subestimação, contudo, reforça a validade das conclusões do estudo: uma distância rodoviária maior elevaria o custo de TFD atual de forma ainda mais rápida, tornando o ponto de equilíbrio de instalação física das novas clínicas ainda menor e a economia anual gerada pelo modelo de otimização superior aos R\$ 307 mil estimados.
2. Modelo Estático versus Dinâmica de Investimento: A análise de custos e fluxo de pacientes foi modelada de forma estática sobre uma série histórica consolidada de 2020 a 2025. O modelo não incorpora o faseamento temporal de desembolsos, taxas de desconto intertemporais ou cálculos de Valor Presente Líquido (VPL) para amortizar os custos de construção de novas instalações ao longo de uma vida útil de 10 ou 20 anos, tratando custos fixos de operação e custos logísticos em uma escala anual de custos correntes.
3. Rigidez de Parametrização da Capacidade: O modelo padronizou o tamanho das novas clínicas candidatas ao valor fixo de 20 máquinas de diálise (200 pacientes), assumindo custos fixos homogêneos. Na realidade, a rede física de saúde permite a instalação de unidades satélites de menor porte (ex: 10 ou 12 máquinas de diálise), o que ampliaria a flexibilidade de descentralização para municípios de menor demanda, reduzindo custos operacionais fixos iniciais e aproximando o serviço de comunidades mais isoladas.

CONCLUSÃO

O estudo atestou, por meio de modelagem matemática exata baseada em Programação Linear Inteira Mista (MILP), que a atual configuração espacial da TRS na microrregião de saúde de Caruaru apresenta oportunidades de melhoria em termos de eficiência alocativa e logística. Sob as premissas adotadas, a manutenção de um modelo altamente centralizado de atendimento de hemodiálise gera custos elevados de TFD para o orçamento público de saúde e impõe um desgaste logístico e físico recorrente aos pacientes renais crônicos.

A modelagem de localização-alocação demonstrou que a descentralização estratégica da alta complexidade na região é economicamente viável sob as premissas testadas. A abertura planejada de novas clínicas em Gravatá e Santa Cruz do Capibaribe reduziu o custo logístico de TFD em 45,5% e o número de pacientes em trânsito intermunicipal em 28,7%, gerando uma economia líquida estimada de R\$ 307.120,70 anuais para o SUS, mesmo absorvendo integralmente o custeio operacional fixo das novas instalações. A análise de sensibilidade comprovou que a topologia de rede proposta é estável e resiliente diante de projeções de aumento de demanda de DRC em horizontes de até 5 anos.

Como agenda de pesquisa futura, sugere-se a ampliação do rigor metodológico da rede de custos por meio do uso de APIs de roteamento rodoviário aberto (como OSRM ou OpenStreetMap) para substituir as distâncias geodésicas por trajetos e tempos reais de rodagem. Recomenda-se também o desenvolvimento de modelagem estocástica com cenários probabilísticos para acomodar variações sazonais de demanda e incertezas clínicas na evolução dos pacientes, bem como a transição do modelo estático para uma formulação de otimização multiperíodo que incorpore o fluxo de caixa descontado e custos de capital para amortização física das clínicas ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA), pelo suporte institucional e espaço para a condução desta pesquisa. Agradecem também ao Departamento de Informática do SUS (DATASUS) pela manutenção e disponibilização pública das bases de dados secundárias utilizadas, essenciais para a reprodutibilidade de estudos aplicados de pesquisa operacional na saúde pública brasileira.

REFERÊNCIAS

AHMADI-JAVID, Amir; SEYEDI, Peyman; SYAM, Siddhartha S. A survey of healthcare facility location. **Computers & Operations Research**, v. 79, p. 223-263, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.cor.2016.05.018.



ALBANESE, Nicolo Cosimo. Optimization: Capacitated Facility Location Problem in Python. **Towards Data Science**, 28 fev. 2023. Disponível em: <https://medium.com/data-science/optimization-capacitated-facility-location-problem-in-python-57c08f259fe0>. Acesso em: 25 jun. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde. **Portaria SAS/MS nº 55, de 24 de fevereiro de 1999**. Dispõe sobre a rotina do Tratamento Fora do Domicílio no Sistema Único de Saúde — SUS, com inclusão dos procedimentos específicos na tabela de procedimentos do SIA/SUS. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 1999.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 1.675, de 7 de agosto de 2018**. Altera a Portaria de Consolidação nº 2/GM/MS, de 2017, e a Portaria de Consolidação nº 6/GM/MS, de 2017, para dispor sobre os critérios e requisitos para a habilitação de serviços de saúde em Atenção Especializada em Doença Renal Crônica. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2018.

DASKIN, Mark S.; DEAN, Laura K. Location of health care facilities. In: BRANDEAU, Margaret L.; SAINFORT, François; PIERSKALLA, William P. (ed.). **Operations Research and Health Care: a handbook of methods and applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 43-76.

HAKIMI, Seppo L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

MARINHO, Alice W. G. B. *et al.* Prevalência de doença renal crônica em adultos no Brasil: revisão sistemática da literatura. **Cadernos de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 379-388, 2017. DOI: 10.1590/1414-462X201700030134.

MOIST, Louise M. *et al.* Travel time to dialysis as a predictor of health-related quality of life, adherence, and mortality: the Dialysis Outcomes and Practice Patterns Study (DOPPS). **American Journal of Kidney Diseases**, v. 51, n. 4, p. 641-650, abr. 2008. DOI: 10.1053/j.ajkd.2007.12.021.

OLIVEIRA, F. A. R. A. V.; MOTA, I. S. Optimization models in the location of healthcare facilities: a real case in Brazil. **Journal of Applied Operational Research**, v. 4, n. 1, p. 37-50, 2012.

SANTOS, G. P. A. *et al.* Geographic inequities in hemodialysis access: a call to reassess dialysis facility locations in Brazil. **Journal of Nephrology**, v. 37, n. 9, p. 2601-2608, dez. 2024. DOI: 10.1007/s40620-024-02120-5.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE NEFROLOGIA. **Censo Brasileiro de Diálise 2023**. São Paulo: SBN, 2023. Disponível em:

<https://www.sbn.org.br/profissional/informacoes-e-dados/censo-de-dialise-sbn>. Acesso em: 25 jun. 2026.