



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANTONIA THAYNA SOUSA COSTA

**RESERVA EXPLOTÁVEL E MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE
ÁGUA EM AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

FORTALEZA

2026

ANTONIA THAYNA SOUSA COSTA

RESERVA EXPLOTÁVEL E MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE
ÁGUA EM AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

Coorientadora: Profª. Dra. Kenya Gonçalves Nunes.

FORTALEZA

2026

ANTONIA THAYNA SOUSA COSTA

RESERVA EXPLOTÁVEL E MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE
ÁGUA EM AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em 13/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Kenya Gonçalves Nunes (Coorientadora)

Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Dra. Renata Nayara Câmara Miranda Silveira

Instituto Inovagri

Prof. Dr. Alexandre Reuber Almeida da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Iguatu*

Aos meus pais, Rosivam e Elenir, e às minhas
irmãs Alice e Giullya.

AGRADECIMENTOS

A Deus, todo-poderoso e a santa virgem Maria, mãezinha tão cuidadosa que foi meu auxílio e consolo em todos os momentos aflitivos.

À minha mãe terrena, Elenir, por todo amor, pelo colo e por nunca ter me deixado desistir. Ao meu paizinho, pelo bom exemplo de fé, integridade e moral. Às minhas amadas irmãs, Alice e Giullya, pelos momentos de alegria que me proporcionaram, ao meu cunhado querido, Felipe Lopes.

Ao meu orientador, Nonato Távora, pelos ensinamentos, paciência, generosidade e amizade. À minha coorientadora, Kenya Nunes, pelas valiosas contribuições. Ao meu amigo Almiro Medeiros pela ajuda e incentivo.

Aos meus queridos amigos, com quem partilhei a experiência de uma convivência diária, Gleyce Lins, Gilbenes Rosal, João Vítor e Rafaela Arruda.

Aos meus irmãos de alma, Valdízio Lima, Mateus Gleidilson, Aglauberto Gouveia, Kelly Baetha, e Janaína Peixoto. À minha amiga Fernanda Carvalho por tornar meus dias mais leves, à minha amiga Hellen Karine, pela ajuda, atenção e amizade, às minhas amigas Mariana Gonçalves e Sharon Gomes pelas longas e produtivas conversas e pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), ao grupo de pesquisa em Engenharia de água e Solo – Semiárido (GPEAS), à Fundação Cearense de Apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico (FUNCAP).

“É justo que muito custe o que muito vale.”

Santa Teresa D’Ávila

RESUMO

A região Nordeste do Brasil tem enfrentado longos períodos de estiagem, com consequente esgotamento das reservas superficiais. Diante desse cenário, a fonte de água subterrânea, sobretudo, em aquíferos aluviais, tornou-se vital para dar suporte às atividades agropecuárias, em especial, nas áreas instaladas com projetos públicos de irrigação, como o Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), no Estado do Ceará. Frente a esse problema e por considerar os riscos potenciais de superexploração desse recurso, este trabalho teve como objetivo geral obter um plano ótimo de exploração agropecuária para o PIMN, tendo como principal restrição a reserva de água anual explotável do aquífero aluvial. Especificamente, a pesquisa teve os seguintes objetivos: calcular a reserva de água anual explotável do aquífero aluvial no trecho do PIMN; realizar uma análise econômica da atividade carcinicultura em base nos indicadores de rentabilidade da análise de investimento; gerar um modelo de programação linear tendo como função objetivo a maximização da receita líquida do PIMN. Na solução do modelo foi utilizado o programa de computação denominado LINDO (*Linear Interactive and Discrete Optimizer*), que resolve sistemas de equações lineares, utilizando o algoritmo iterativo “método *simplex* revisado”. A reserva explotável foi calculada com base na variação da superfície potenciométrica entre o final do período não chuvoso e o final da quadra chuvosa, período em que se observa a máxima recarga do aquífero, seja pela contribuição das precipitações pluviométricas e/ou da interação rio-aquífero. Os resultados da pesquisa permitiram as seguintes conclusões: As reservas hídricas subterrâneas do aquífero aluvial no PIMN são bastante significativas, porém o aquífero é explorado em regime de superexploração em razão da elevada demanda hídrica da carcinicultura, atividade que tem apresentado um crescimento exponencial. A atividade carcinicultura se mostrou viável do ponto de vista econômico a uma taxa real anual de juros de 12%, e recuperação do capital investido no terceiro ano, destacando-se como a atividade de maior rentabilidade e representando 96% da receita líquida total anual. A área ocupada com a carcinicultura no PIMN no ano de 2024 já superava em 13,3% o limite de área sugerido pelo plano ótimo de ocupação. A não segurança hídrica sinaliza para riscos associados à dimensão econômica, porquanto uma redução de 40% na disponibilidade hídrica, acarreta uma redução na receita líquida que se aproxima de 50%.

Palavras-chave: programação linear; gestão de água; carcinicultura.

ABSTRACT

The Northeast region of Brazil has faced long periods of drought, resulting in the depletion of surface water reserves. Given this scenario, groundwater sources, especially in alluvial aquifers, have become vital to support agricultural activities, particularly in areas with public irrigation projects, such as the Morada Nova Irrigation Project (PIMN) in the state of Ceará. In view of this problem and considering the potential risks of overexploitation of this resource, the overall objective of this study was to obtain an optimal agricultural exploitation plan for the PIMN, with the main constraint being the annual exploitable water reserve of the alluvial aquifer. Specifically, the research had the following objectives: to calculate the annual exploitable water reserve of the alluvial aquifer in the PIMN section; to perform an economic analysis of shrimp farming based on the profitability indicators of the investment analysis; to generate a linear programming model with the objective function of maximizing the net revenue of the PIMN. The model was solved using the LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer) computer program, which solves systems of linear equations using the iterative “revised simplex method” algorithm. The exploitable reserve was calculated based on the variation in the potentiometric surface between the end of the dry season and the end of the rainy season, a period in which the maximum recharge of the aquifer is observed, either through rainfall and/or river-aquifer interaction. The results of the research led to the following conclusions: The groundwater reserves of the alluvial aquifer in the PIMN are quite significant, but the aquifer is overexploited due to the high-water demand of shrimp farming, an activity that has grown exponentially. Shrimp farming proved to be economically viable at a real annual interest rate of 12% and a return on invested capital in the third year, standing out as the most profitable activity and accounting for 96% of total annual net revenue. The area occupied by shrimp farming in the PIMN in 2024 already exceeded the area limit suggested by the optimal occupation plan by 13.3%. Water insecurity signals risks in the economic dimension, as a 40% reduction in water availability leads to a reduction in net revenue of nearly 50%.

Keywords: linear programming; water management; shrimp farming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização do Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.	25
Figura 2 – Ocupação da Rizicultura no PIMN (2005-2024).	27
Figura 3 – Evolução da área com carcinicultura no PIMN - CE.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ocupação mensal das atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	28
Tabela 2 – Volume de água mensal disponível para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.	37
Tabela 3 – Fluxo monetário referentes aos valores nominais e aos valores atualizados, 2025.	39
Tabela 4 – Solução ótima do modelo de programação linear para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	42
Tabela 5 – Ocupação mensal para cada atividade desenvolvida no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.	43
Tabela 6 – Análise de sensibilidade da receita líquida gerada para cada atividade desenvolvida no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	44
Tabela 7 – Análise de sensibilidade do recurso terra para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.	45
Tabela 8 – Requerimento de água (m ³ /há) para as atividades desenvolvidas em cada mês no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	45
Tabela 9 – Análise de sensibilidade do recurso água para cada mês no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	46
Tabela 10 – Solução ótima do modelo de programação linear para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na oferta hídrica no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	48
Tabela 11 – Análise de sensibilidade da receita líquida para os níveis de 20, 40 e 60% de redução na disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	49
Tabela 12 – Análise de sensibilidade do recurso água com reduções de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	51
Tabela 13 – Análise de sensibilidade do recurso água com reduções de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Projetos Públicos de Irrigação (PPI'S).....	16
2.2	Reservas hídricas subterrâneas.....	17
2.3	Aquífero aluvial	18
2.4	Indicadores de Rentabilidade da Análise de Investimento para a Carcinicultura	20
2.5	Programação linear	20
2.6	Modelo de Programação Linear para alocação de águas subterrâneas	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Caracterização do local da pesquisa	25
3.2	Principais atividades de produção no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN).....	26
3.3	Reservas hídricas subterrâneas	28
3.4	Coefficientes de requerimento de água	30
3.5	Análise de Viabilidade Econômica da Carcinicultura	31
3.6	Formulação geral do modelo de programação linear	32
3.7	Coefficientes e limites das restrições	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1.	Reservas hídricas subterrâneas	36
4.2	Sustentabilidade e Potencial de Exploração do Aquífero Aluvial no PIMN	37
4.3	Indicadores de Rentabilidade da Análise de Investimento	39
4.4	Resolução do Modelo de Programação Linear	42
4.5	Análise de sensibilidade da receita líquida	44
4.6	Análise de sensibilidade do recurso terra.....	44
4.7	Análise de sensibilidade do recurso da água.....	45
4.8	Otimização do modelo de programação linear considerando quatro níveis de disponibilidade hídrica e diferentes volumes de disponibilidade de água mensal.	47
4.8.1	Solução do modelo para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica... ..	47
4.8.2	Análise de sensibilidade da receita líquida para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.	49

4.8.3 Análise de sensibilidade do recurso terra para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.	50
4.8.4 Análise de sensibilidade do recurso água para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.	52
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO INDICADORES DE RENTABILIDADE DA ANÁLISE DE INVESTIMENTO	63
APÊNDICE B – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO REQUERIMENTO DE ÁGUA	64
APÊNDICE C – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES NÍVEIS DE REDUÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	68
APÊNDICE D – PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	70
APÊNDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O RECURSO TERRA E ÁGUA.....	71
APÊNDICE F – PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 20% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	72
APÊNDICE G – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 20% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	73
APÊNDICE H – PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 40% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	74
APÊNDICE I – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 40% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	75
APÊNDICE J – PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO	

LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 60% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	76
APÊNDICE K – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 60% DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	77

1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil possui 87,8% de seu território localizado no semiárido e está inserido no polígono das secas, com precipitações naturais mal distribuídas no tempo e no espaço. A região é marcada por uma alta taxa de evapotranspiração ($2.000 \text{ mm ano}^{-1}$), condição que, associada aos baixos índices pluviométricos observados na região (800 mm ano^{-1}), leva a um risco de seca superior a 60%, o que reduz significativamente a disponibilidade hídrica dos reservatórios superficiais, ocasionando problemas de ordem social e econômica (Cavalcante *et al.*, 2019).

Em consonância com tais aspectos, os estados que constituem a referida região têm enfrentado longos períodos de escassez hídrica, como a compreendida entre os anos de 2010 a 2020 e intensificada entre os anos de 2012 a 2017, quando as limitadas precipitações anuais culminaram para que muitos reservatórios chegassem ao seu volume morto. Diante de tais aspectos, o setor mais prejudicado com o referido fenômeno é a agricultura, em especial, a irrigada. Nesse sentido, a convivência com a seca passou a ser uma política pública, e o governo federal criou medidas intervencionistas, tais como a construção de açudes públicos federais e os Projetos Públicos de Irrigação (PPI's) no semiárido.

Todavia, mesmo com a implantação das estruturas hídricas destacadas, e contrapondo-se ao que se esperava, a água não deixou de ser um fator limitante para a produção agrícola. Embora essas iniciativas tenham sido de grande valia, fornecendo um aporte significativo de água para a agropecuária, não demorou muito até que as disponibilidades das reservas superficiais fossem comprometidas pelos longos períodos de estiagem. Além disso, fatores como infraestruturas hídricas em estado de deterioração, adoção de métodos e sistemas de irrigação pouco eficientes, cultivos em solos com baixa aptidão agrícola e utilização de espécies pouco adaptadas ao semiárido contribuíram para a não sustentabilidade de muitas áreas irrigadas (Garjulli, 2003).

Diante dos fatores expostos, a exploração de aquíferos passou a ser vista como uma alternativa viável do ponto de vista socioeconômico, levando em consideração o elevado consumo de água na produção agropecuária. Entretanto, a exploração desses reservatórios subterrâneos, embora apontada como uma solução promissora, apresenta-se também como uma problemática, pois a superexploração de aquíferos já é considerada um grande desafio na utilização dessas fontes hídricas, visto que se trata de um recurso esgotável.

Em decorrência das sucessivas secas vivenciadas no Estado do Ceará entre os anos de

2012 a 2017, especificamente, na região do Vale do Jaguaribe, houve a suspensão da oferta de águas superficiais para o Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN) no ano de 2014. Como consequência, a fonte hídrica para suprimento das atividades passou a ser exclusivamente originária de poços rasos e medianamente profundos, caracterizados por vazões que chegam a superar a ordem de $100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Marengo; Torres; Alves, 2017).

Uma atividade em expansão significativa no PIMN é a carcinicultura de águas interiores (criação de camarões fora das áreas costeiras, em viveiros de água doce ou de baixa salinidade). No ano de 2021, essa atividade foi responsável pelo valor bruto da produção (VBP) de R\$ 573 milhões para o Estado do Ceará, com uma produção de 33.714 toneladas, o que representa aproximadamente 43% da produção nacional (IBGE, 2023).

Paiva (2019) constatou a aplicação de uma lâmina média acumulada de água em um ciclo de 90 dias correspondente a 2.400 mm. Considerando que, em média são praticados três ciclos anuais de cultivo, urge a necessidade de estabelecer um plano de exploração que seja capaz de otimizar as atuais atividades agropecuárias do PIMN, com foco aliado à gestão sustentável do aquífero local.

Lins *et al.* (2025) verificaram que a disponibilidade de água proveniente do aquífero aluvial mostrou-se como um fator limitante ao desenvolvimento das atividades agropecuárias locais, no PIMN. Para os referidos autores, isso se reflete no fato de que, mesmo quando o seu nível hídrico está mais favorável, apenas 35% da área total do projeto é mensalmente ocupada, restringindo as potencialidades locais.

Nesse sentido, a utilização de modelos matemáticos, como os empregados na programação linear, apresenta-se como uma alternativa com capacidade de antecipar riscos, projetar possíveis cenários e corrigir erros na utilização de recursos naturais de forma sustentável. Portanto, tem-se como expectativa que a alocação de água subterrânea gerada com base na capacidade de exploração do aquífero aluvial e ao modelo de otimização econômica poderá propiciar no PIMN um ambiente de consciência sobre o uso racional do recurso hídrico e a minimização de riscos de conflitos pelo uso da água.

Nessa perspectiva, o estudo teve como objetivo geral obter um plano ótimo de exploração agropecuária para o PIMN tendo como principal restrição a reserva de água anual explotável do aquífero aluvial. E como objetivos específicos proceder ao cálculo da reserva de água anual explotável; gerar um modelo de programação linear tendo como função objetivo a maximização da receita líquida e incorporando as principais restrições; obter a solução ótima do modelo de programação linear e análise de sensibilidade das variáveis básicas e restrições do modelo; proceder à análise de sensibilidade para níveis decrescentes da reserva de água

anual explotável.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Projetos Públicos de Irrigação (PPI'S)

O semiárido nordestino tem a sua história marcada por longos períodos de estiagem e secas. Nesse contexto, as políticas hidroagrícolas assumem um papel relevante na perspectiva de implantação de estruturas hídricas, que se caracterizam como uma estratégia geopolítica.

Foram criados inúmeros órgãos com o intuito de mitigar os efeitos causados pela escassez hídrica, dentre esses, cabe destacar o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), uma autarquia criada no ano de 1945 e que atua prioritariamente na implantação e gestão de açudes e de projetos de irrigação em regiões semiáridas (Sousa, 2022).

Nesse sentido, os Projetos Públicos de Irrigação (PPI's) se caracterizam como uma política pública, com o objetivo principal de promover o desenvolvimento socioeconômico de regiões semiáridas com aptidão agrícola. Os PPI's foram implantados em áreas desapropriadas pelo poder público, mediante prévio acordo e indenização para os proprietários legais da terra. Para isso, foram realizados estudos prévios de caracterização do local, onde foi realizado um dimensionamento com vistas a identificar a viabilidade de implantação da estrutura de alocação da água via canalização (Castro; Neves; Nakatani, 2013). No país, os perímetros irrigados se concentram predominantemente na bacia hidrográfica do rio São Francisco e na bacia hidrográfica do rio Atlântico Nordeste Oriental, e esses compreendem em torno de 90% dos projetos de irrigação (Ferreira; Vieira Filho, 2020).

Na região semiárida, a implantação de estruturas hídricas teve início no ano de 1970 e pode ser citado como um exemplo de sucesso o Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), localizado na microrregião do Baixo Jaguaribe, no Estado do Ceará. O Projeto foi inicialmente abastecido por dois açudes públicos federais, o Vinícius Berredo (Pedras Brancas) e o Arrojado Lisboa (Banabuiú), atualmente a terceira maior reserva hidrográfica do Estado do Ceará. A implantação do PIMN teve como objetivo principal o redimensionamento de recursos hídricos em regiões fortemente afetadas por longos períodos de estiagem e secas, e cuja renda é proveniente da agropecuária.

A implantação do PIMN, assim como as demais obras hídricas instaladas no semiárido, constituiu-se como um plano de ação no sentido de se evitar processos migratórios recorrentes, ocasionados pela perda de safra e rebanhos, além de mitigar os impactos causados na

economia regional (Castro, 2018). Com isso, o objetivo primordial foi reduzir os efeitos causados pela irregularidade das chuvas no semiárido, visando promover o desenvolvimento socioeconômico das populações locais.

2.2 Reservas hídricas subterrâneas

As águas subterrâneas fazem parte do ciclo hidrológico e são definidas de acordo com Manoel Filho (2008) como aquelas cuja origem de ocorrência se dá abaixo do nível de saturação ou nível freático, e que podem estar presentes tanto em formações geológicas que afloram na superfície e estão apenas parcialmente saturadas, quanto em formações geológicas de camadas mais profundas, que se encontram totalmente saturadas.

Essas reservas correspondem a aproximadamente 99% da água doce em estado líquido, em condições favoráveis para o consumo humano (UNESCO, 2022). Em se tratando do Brasil, o país possui 181 aquíferos, que são intensamente explorados, como afirmam Madroñero *et al.* (2022). De acordo com os referidos autores, estima-se que existam no país mais de 2,5 milhões de poços tubulares, e o volume de água extraído anualmente deles é superior a 17.580 milhões de m³.

A exploração desse recurso ocorre principalmente em regiões áridas e semiáridas, tendo desempenhado um papel crucial, no suprimento da alta demanda de água exigida na agricultura, representando muitas vezes uma reserva estratégica local. Contudo, embora os aquíferos sejam uma alternativa para os períodos de estiagem prolongada, é um recurso esgotável, e que pode, devido a contínua exploração, se tornar escasso nas próximas décadas, o que alerta para o seu correto gerenciamento. Desse modo é importante fazer uma estimativa das reservas hídricas subterrâneas, levando em conta suas características, conforme Moura *et al.* (2025) que conceituam três tipos de reserva:

A reserva permanente (Rp) é aquela fração hídrica que não sofre alteração em decorrência das flutuações pluviométricas, apresentando um comportamento estático. O volume de água armazenado se mantém constante no tempo não sendo afetado pela variabilidade das chuvas, isso ocorre porque a Rp está situada numa porção inferior àquela que é afetada pelas flutuações sazonais

Em relação à reserva renovável (Rr), também denominada de reserva reguladora, essa recebe recarga anual, o que impacta diretamente sua disponibilidade para exploração. Ao contrário da reserva permanente, que não é influenciada pela sazonalidade pluviométrica, a reserva renovável, tem sua amplitude diretamente correlacionada ao ciclo hidrológico,

apresentando oscilações no tempo. Por ter esse comportamento dinâmico, a R_r é tida como o equilíbrio entre a recarga e a descarga anual do aquífero.

No que se refere à reserva explotável (R_e), essa se correlaciona com a potencialidade do aquífero, ou seja, com o máximo de descarga permitida dentro de um limite seguro e admissível. Utiliza-se, portanto, o conceito de *safe yield*, definido como o volume de descarga segura. Esse conceito leva em conta duas premissas básicas, o volume da recarga anual e o volume de água que é extraído do aquífero anualmente.

A reserva explotável é considerada o fator de maior relevância quando se fala em uso de águas provenientes de aquíferos, pois o seu cálculo busca definir o volume de água que pode ser utilizado, sem, contudo, trazer prejuízos ao meio ambiente. Isso a caracteriza, portanto, como um importante parâmetro utilizado na gestão de recursos hídricos. A água é um recurso limitado, e sua disponibilidade para consumo humano é alterada por meio de eventos hidrológicos críticos e pela ação antrópica, conforme destacam Saeed, Al-Khafaji e Al-Faraj (2021), que ao realizarem estudo a respeito da necessidade hídrica em regiões áridas e semiáridas constataram que a agricultura irrigada consome cerca de 70% da água superficial e subterrânea.

Em face do exposto, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2024), estima que a disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos já explorados no território nacional para usos diversos é de $1.083,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que corresponde a 8% das reservas explotáveis. Tais dados foram obtidos por meio de um levantamento realizado entre os anos de 2017 a 2021, sendo que no referido período já existiam cerca de 2,6 milhões de poços espalhados por todo o país, onde foi levado em consideração o volume de água que é explotado de cada um desses poços.

Alves *et al.* (2018), ao apresentarem estudo relacionado à exploração de aquíferos no semiárido, explicam que a superexplotação de aquíferos isolados pode comprometer permanentemente o uso de todos os demais aquíferos. Em consonância com isso, Bouderbala (2019) observou que nas últimas décadas, o nível potenciométrico dos reservatórios subterrâneos de todo o mundo apresentou um decréscimo acentuado. O autor entende que esse declínio ocorreu devido a sua superexplotação, que foi amplificada pela redução da recarga proveniente das precipitações naturais.

2.3 Aquífero aluvial

Os aquíferos aluviais estão presentes em quase todo o território semiárido, o que

facilita sua exploração e uso para o setor agrícola nessa região. De acordo com Yousif, Hussien e Abotalib (2020), os aquíferos aluviais podem armazenar quantidades expressivas de água, devido à alta condutividade hidráulica apresentada. Eles são formados a partir da disposição de cascalho, e de elementos da matriz sólida mineral do solo (areia, silte e argila). Esses processos têm sua origem nas margens dos canais fluviais (rios e lagos), e sua gênese inicia-se com a erosão das rochas, resultado da ação de agentes biológicos, químicos, e da temperatura. Em seguida, ocorre o transporte dessas rochas intemperizadas pela água e finaliza-se com a sedimentação e depósito desse material no leito da bacia hidrográfica.

Silveira *et al.* (2020), caracterizam os aluviões como aquíferos localizados no semiárido nordestino cuja funcionalidade é fornecer um aporte hídrico estratégico em períodos críticos. Nessa região, tais reservatórios assumem relevante importância por sua contribuição tanto na dessedentação humana e animal, quanto na agricultura irrigada. Os aluviões, representam, portanto, uma alternativa prática de convívio com as secas, pois possuem baixa perda evaporativa, boa adequabilidade para consumo humano, animal e agrícola (irrigação), além de apresentarem alta vazão. Por conseguinte, a perfuração de poços rasos, cuja profundidade não excede os 20 metros da superfície, já representa um fator proeminente na perspectiva de substituição de uso das águas superficiais, e uma alternativa para períodos de escassez hídrica, onde as bacias hidrográficas fornecem um aporte insuficiente.

A exploração de aquíferos aluviais no Brasil remonta à década de 90 e, atualmente, existem muitas discussões sobre seu uso consciente, principalmente na agropecuária, que é o setor que mais consome água, sendo responsável por 69% do consumo total (FAO, 2016). A adequada gestão dos recursos hídricos objetiva assegurar que as próximas gerações tenham acesso à água em qualidade e quantidade suficientes para suprir suas necessidades básicas e para que se possa continuar produzindo alimentos.

Em consonância com isso, Nunes *et al.* (2022), ao caracterizarem quantitativamente as reservas exploráveis provenientes de aquífero aluvial para uso na agropecuária, verificaram que a expansão de áreas agricultáveis afeta a disponibilidade hídrica dos reservatórios subterrâneos, o que poderá acarretar sua superexploração nos próximos anos. Os autores elucidam que uma alternativa para evitar isso seria a adoção de métodos mais eficientes de irrigação, tais como o método de irrigação localizado.

Pesquisa semelhante foi desenvolvida por Monteiro, Montenegro e Montenegro (2014), na qual os autores realizaram o estudo de aquífero aluvial em uma região semiárida, e sua exploração para a agricultura irrigada, o qual ocasionou no rebaixamento do lençol freático, com consequente redução dos níveis potenciométricos. Tais fatores evidenciam a

necessidade de se fazer uma correta gestão desse recurso.

2.4 Indicadores de Rentabilidade da Análise de Investimento para a Carcinicultura

O uso de água proveniente de aquífero para a produção de organismos aquáticos tem se intensificado no Nordeste. Dentre as atividades desenvolvidas, destaca-se a carcinicultura, que por ser uma atividade de alto valor agregado tem substituído as atividades agrícolas já tradicionalmente desenvolvidas na região, tendo desempenhado um papel central em sua economia, sobretudo no estado do Ceará, que lidera a produção do crustáceo no Brasil com 47,17% da produção nacional, o que corresponde a 56.600 t (Rocha; Fernandes, 2022).

Apesar desses aspectos, o empreendimento exige um elevado aporte inicial e custos operacionais constantes. Torna-se necessária, portanto, a adoção de indicadores econômicos que considerem tanto o capital de implantação quanto os custos variáveis de manutenção das atividades. A partir desses dados, realiza-se a análise de viabilidade para mensurar a capacidade de retorno do capital e a geração de lucro, assegurando a sustentabilidade econômica do projeto.

Nesta perspectiva, os principais indicadores econômicos utilizados são o Valor Presente Líquido (VPL), Relação Benefício Custo (B/C), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período *Payback* (Costa *et al.*, 2016). O VPL indica a viabilidade absoluta do projeto sendo utilizado como critério de escolha; a relação B/C compara os lucros provenientes de uma atividade com o capital nela investido; a TIR indica o rendimento durante um horizonte de análise, devendo sempre apresentar um valor maior que a taxa mínima de atratividade; e o período *Payback*, diz respeito ao período que a atividade vai recuperar o capital nela investido.

2.5 Programação linear

A programação linear (PL) é uma área da pesquisa operacional (PO), utilizada para maximizar ou minimizar uma função linear, conhecida como função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições também lineares. Em 1947, George B. Dantzig revolucionou esse modelo ao desenvolver o método *simplex*, um algoritmo projetado para resolver problemas de programação linear.

O método simplex tem como objetivo encontrar a solução ótima para problemas de programação linear, determinando os valores das variáveis de decisão que maximizam ou minimizam a função objetivo, respeitando um conjunto de restrições. O método busca,

sobretudo, a solução de problemas provenientes da gestão de algum tipo de recurso, no sentido de subsidiar a tomada de decisão. Desde o seu desenvolvimento, o método tem desempenhado um papel importante na alocação de recursos nos mais diversos setores, tendo assumido relevância a partir da constatação da necessidade de se utilizar uma abordagem científica na resolução de problemas de gestão nas empresas.

Com a ascensão desse método, a pesquisa operacional passou a ser amplamente utilizada na resolução de problemas voltados para o uso de recursos escassos e, a exemplo disso, Cock *et al.* (2023) destacam a eficiência da utilização da PO no gerenciamento de riscos correlacionados às práticas agropecuárias. Em seus estudos, os autores utilizaram PO para identificar o desempenho das culturas, com base nas condições ambientais. A partir do tratamento de dados, foi possível, então, definir uma combinação de práticas, com vistas a uma gestão adequada para atingir a máxima produtividade da cultura, levando-se em conta as características espaço-temporais existentes nas condições de suas pesquisas.

Hillier e Lieberman (2006) enfatizam que o modelo de programação linear apresenta hipóteses, com função de garantir que o modelo tenha restrições lineares, ou seja, o modelo apresentado deve sempre satisfazer as hipóteses abaixo descritas:

Possibilidades finitas: Implica que para um determinado problema localizado, as possibilidades de solução são limitadas, dado que alguns fatores restringem as atividades e recursos que poderiam ser utilizados na resolução desse problema.

Certeza: Supõe que as variáveis utilizadas são constantes conhecidas, entretanto, são utilizados parâmetros, com critério de escolha com base na projeção de um cenário futuro. Diante disso, é válido considerar que tais dados estão sujeitos a incertezas, sendo necessário, portanto, uma análise de sensibilidade do modelo.

Divisibilidade: Pressupõe que todas as variáveis de caráter quantificável são infinitamente divisíveis, dessa forma, assume que sejam utilizadas frações da unidade das variáveis trabalhadas. Desse modo, infere-se que em muitos casos a PL fornece uma solução linear não inteira.

Linearidade: Estabelece que deve ser adotada uma proporção fixa entre o insumo que será utilizado e o alcance de um determinado nível de produtividade, e, mesmo que ocorram variações, a proporção não deve ser alterada.

Aditividade: indica que o uso dos recursos e a eficácia resultante constituem a soma das contribuições individuais; dessa forma, as atividades provenientes da utilização desse recurso não podem ser interdependentes, sendo excluída a possibilidade de utilização de termos cruzados.

As relações tratadas dentro da PL por meio do método simplex, possuem aplicações múltiplas, podendo ser utilizadas nos mais diversos setores, como no siderúrgico, na engenharia e na agricultura, tratando parâmetros e auxiliando a alocação estratégica de recursos.

Nesse sentido, Difallah *et al.* (2017) realizaram um relevante trabalho utilizando um modelo de Programação Linear para fins de otimização do uso da água. O objetivo desse estudo foi avaliar a quantidade de água necessária para a irrigação, levando em consideração a precipitação média. Utilizando o modelo de Programação Linear, os autores conseguiram reduzir o consumo de água em 28,5%. O que indica a eficácia do referido modelo para utilização no setor agrícola.

Resultados importantes também foram encontrados por Santos *et al.* (2009), que utilizaram um Modelo de Programação Linear em um projeto de irrigação para fins de maximizar a renda líquida obtida. O modelo consistiu, portanto, em uma função objetivo, onde os autores pretendiam identificar quais recursos, dentre eles, água, solo e mercado, apresentavam restrições quanto a sua disponibilidade, sendo, portanto, um fator limitante na produção agrícola, ou na posterior comercialização. Através da utilização do modelo, os mencionados autores concluíram que o recurso água se apresenta como um fator não limitante à produção. Esse resultado sugere a importância do modelo para quantificar os recursos utilizados e avaliar possíveis riscos quanto a sua disponibilidade futura.

Bartolini *et al.* (2006) utilizaram um Modelo de Programação Linear para simular os efeitos de uma política de precificação do uso da água e de seus impactos sobre os sistemas irrigados. Por meio do modelo, os autores concluíram, que a adoção de tal política pode tornar o setor agrícola insustentável, podendo acarretar problemas de ordem econômica, social e ambiental.

Filippi, Mansini e Stevanato (2017) utilizaram dois modelos de programação linear, objetivando a seleção de culturas que apresentassem maior valor agregado. No primeiro modelo utilizado, priorizou-se a maximização dos lucros por meio da diferença da receita líquida obtida com a venda dos produtos e o capital investido para a sua produção. Já no segundo modelo utilizado, considerou-se a variabilidade dos preços de comercialização e dos rendimentos agrônômicos. Com isso, os autores concluíram que o modelo de programação linear apresenta elevado grau de confiabilidade no sentido de antecipar riscos, prever lucros e orientar a utilização de recursos de forma eficiente; os autores consideraram adequada a utilização do modelo para outros problemas agrícolas.

Daghighi, Nahvi e Kim (2017), ao realizarem estudo em região semiárida, verificaram

que as culturas agrícolas são fortemente afetadas pelo regime hídrico nessas regiões, pois frequentemente as plantas chegam ao estado de murcha permanente. Diante disso, os autores desenvolveram um modelo de programação linear que lhes forneceu subsídios para a tomada de decisão na escolha de um padrão de cultivo adequado, no qual foi possível otimizar o uso da água.

2.6 Modelo de Programação Linear para alocação de águas subterrâneas

A Programação Linear, como visto anteriormente, tem aplicação em diversos setores da economia, e se apresenta como uma alternativa promissora para otimizar a alocação de recursos também no setor agrícola. Nesse aspecto, convém destacar que, alguns autores já realizaram relevantes trabalhos utilizando a programação linear para fornecer modelos de alocação de água proveniente de aquíferos.

Isso se justifica devido à iminente necessidade de se otimizar a utilização desses recursos. Nesse contexto, estima-se que mundialmente o volume de águas subterrâneas é da ordem de 10,3 milhões de km³, o que corresponde a 98% da água doce no mundo. De acordo com Scheiber et al. (2020), atualmente 43% da água utilizada na agricultura irrigada é proveniente de aquíferos, com volumes alocados em torno de 545 km³ ano⁻¹.

Nesse sentido, Lins *et al.* (2025) utilizaram a programação linear, visando otimizar o uso da água proveniente de aquífero aluvial para aplicação em atividades agrícolas, ao mesmo tempo, o modelo objetivou também maximizar a renda líquida do produtor. De acordo com os resultados obtidos por esses autores, o recurso água mostrou-se limitante em anos de escassez hídrica, podendo acarretar prejuízos econômicos. Dessa forma, o modelo propôs como alternativa para o cultivo de camarões em viveiro a redução de quatro para três ciclos anuais em período de escassez moderada, que, de acordo com Nunes e Medeiros (2020), em termos de precipitação pluviométrica, corresponde a uma precipitação total entre 70% a 90% da média das chuvas esperadas no local de acordo com o Índice de Porcentagem Normal (IPN).

Estudo semelhante foi realizado por Nouri *et al.* (2019), com o objetivo de desenvolver um padrão de cultivo ideal com vistas à recuperação de aquíferos e, para tanto, a programação linear desempenhou um papel importante, ao identificar o comportamento dos agentes envolvidos nas atividades agrícolas, e dessa forma maximizar as suas rendas. Além disso, o trabalho trouxe notáveis resultados, pois mostrou que, em um cenário de intensa exploração do aquífero, houve redução média de 0,18 m por ano, enquanto, em um cenário de recuperação

do aquífero, o nível da água aumentou em uma média de 0,48 m por ano.

Danapour *et al.* (2021), ao desenvolverem um trabalho objetivando a otimização da captação de água subterrânea, constataram que, ao utilizar o algoritmo de programação linear em conjunto com outros modelos integrados, foi possível obter informações consideráveis na perspectiva de orientar na tomada de decisão.

O crescimento populacional, aliado à degradação ambiental, tornam o homem cada dia mais dependente da exploração de recursos hídricos, principalmente em regiões áridas e semiáridas. Aliado a isso, ainda se tem a redução na precipitação média anual, o que culmina no aumento da pressão sobre os aquíferos. A esse respeito, Ghadimi e Ketabchi (2019) buscaram abordar em seu estudo o gerenciamento sustentável de aquíferos; para isso, os autores aplicaram soluções ótimas com o objetivo de maximizar a receita líquida. Para o gerenciamento desse recurso, os autores utilizaram vários métodos de programação linear e não linear.

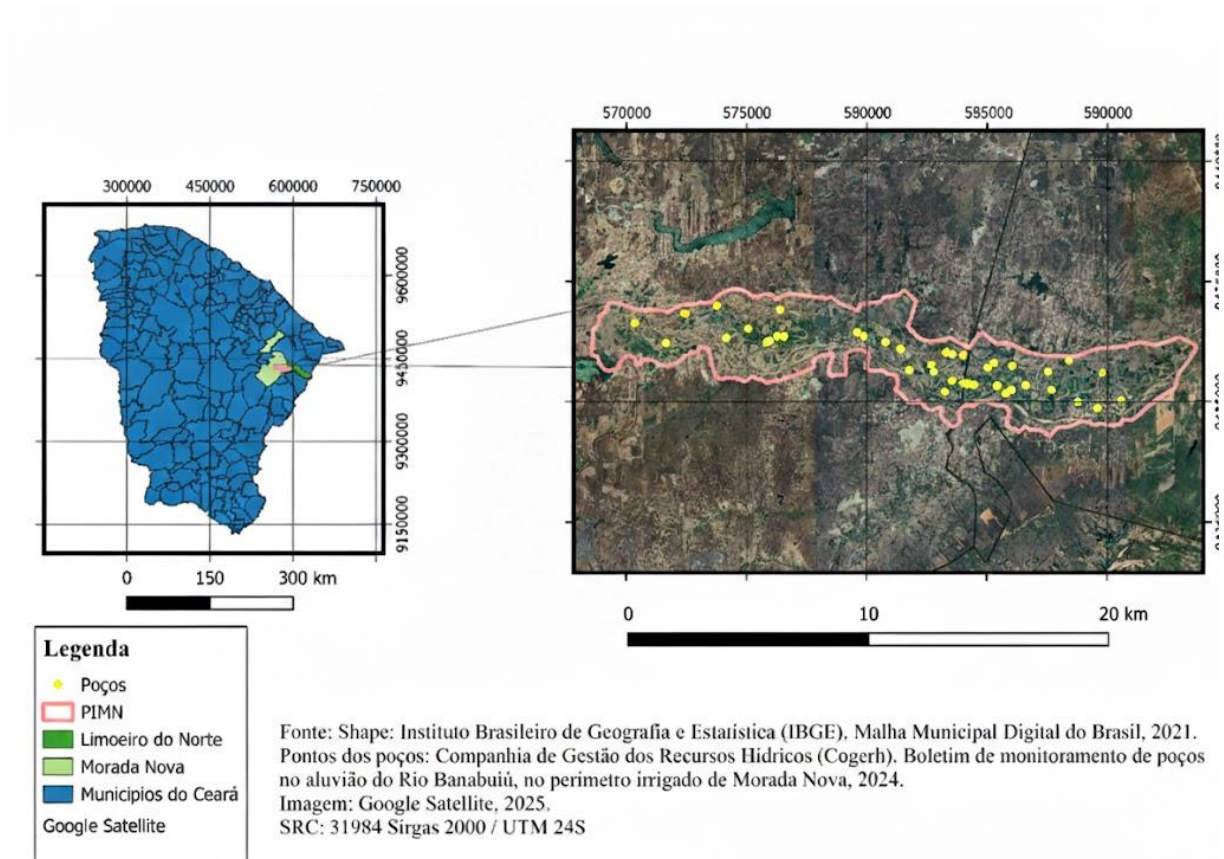
O gerenciamento do uso de águas subterrâneas tem se mostrado desafiador devido ao declínio na quantidade e qualidade das águas superficiais e à expansão de áreas destinadas à produção agrícola, Lalehzari e Kerachian (2020) desenvolveram modelos de otimização utilizando a programação linear. O modelo teve como foco a relação ótima entre a exploração das reservas subterrâneas, produtividade e rendimento das culturas e os índices econômicos. Constatou-se que os modelos de otimização com função objetivo foram fundamentais para a gestão dos recursos hídricos com vistas a maximizar a receita líquida.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), cuja extensão territorial abrange parte dos municípios de Morada Nova (70%) e de Limoeiro do Norte (30%). Localizado na macrorregião de planejamento Vale do Jaguaribe, no Estado do Ceará, o PIMN situa-se entre as coordenadas geográficas 5° 06' 24" de Latitude e 38° 22' 21" de Longitude e 89 m de altitude (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização do Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.



Fonte: Elaborado pela autora.

O clima da região é tropical quente semiárido, com chuvas concentradas entre os meses de fevereiro a abril, com média pluviométrica de 742,5 mm ano⁻¹, evapotranspiração potencial

de 2.159 mm ano⁻¹, e temperatura média de 26 a 28°C. Os solos da região são de origem aluvionar, classificados como neossolos litólicos e flúvicos, planossolos e argissolos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006). A vegetação é composta por caatinga arbustiva aberta, floresta caducifólia espinhosa e floresta subcaducifólia tropical pluvial (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2012).

O projeto foi inicialmente abastecido por dois açudes públicos federais, Vinícius Berredo, conhecido como Pedras Brancas, com capacidade de 456 hm³ e o açude Arrojado Lisboa, conhecido como Banabuiú, com capacidade de 1.601 hm³, com descarga regularizada de 1,5 e 11 m³ s⁻¹, respectivamente.

Todavia, em razão da crise hídrica ocorrida entre 2012 a 2017, o volume da bacia do Banabuiú se reduziu a apenas 2,68% de sua capacidade total, o que levou à suspensão da liberação de água para as atividades agrícolas do PIMN. Diante desse cenário, os agricultores irrigantes recorreram alternativamente à utilização de água do aquífero aluvial local, solução que se mostrou fundamental para assegurar a continuidade da produção agropecuária no projeto.

3.2 Principais atividades de produção no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN)

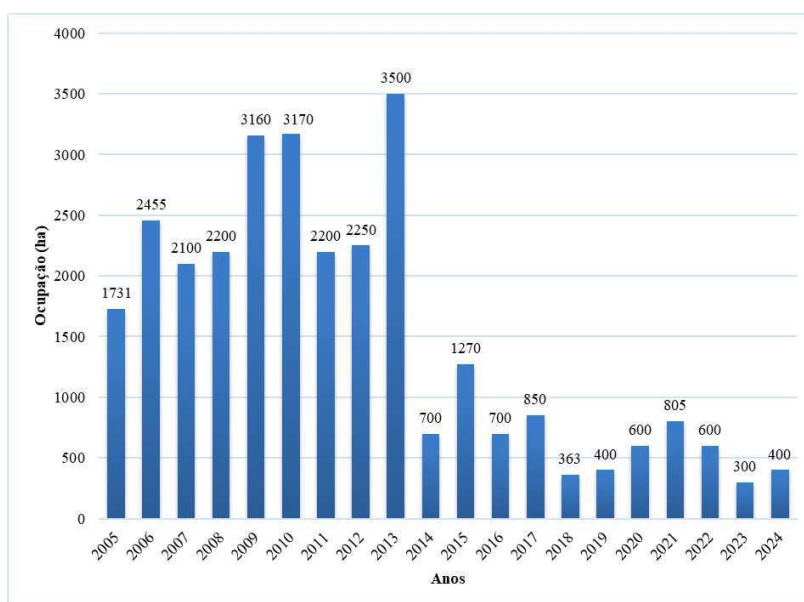
No PIMN destacam-se as atividades voltadas para a agricultura de base familiar, com área destinada à exploração agrícola correspondente a lotes com 4,3 ha, sendo que a bovinocultura de leite e a rizicultura, constituíram a base das atividades econômicas durante muitos anos.

Historicamente, a ocupação do PIMN teve na cultura do arroz a sua principal atividade quando era abastecido com fonte de água superficial proveniente do açude Banabuiú. Contudo, os solos predominantes na região são de textura fina e média, tais características levam à recomendação da ocupação de apenas 28% da área total do projeto ou seja 1.046 ha de 3.737 ha. Não obstante, a indicação de ocupação foi ignorada pelos agricultores irrigantes ao longo dos anos, sendo que, até o ano agrícola de 2013 (Figura 2) a área irrigada ultrapassou o indicado levando ao aumento no consumo do volume de água devido aos solos inadequados para o cultivo de arroz.

Atualmente, a atividade da rizicultura vem apresentando um declínio acentuado em detrimento da ascensão da carcinicultura, atividade que tem crescido de forma expressiva. A carcinicultura de águas interiores, conforme já se presumia no início da década de 2010 para a região do Baixo Jaguaribe, onde se localiza o PIMN (Miranda *et al.*, 2010), é

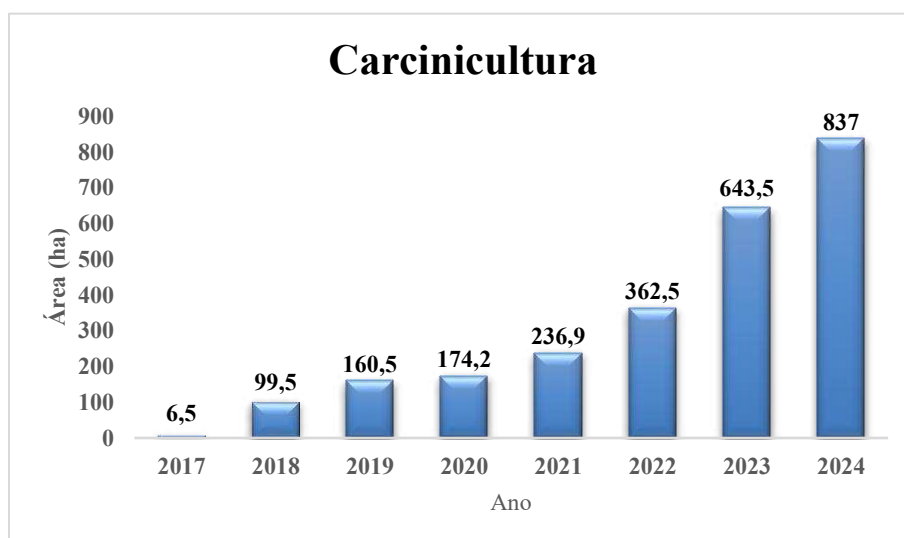
atualmente, a principal atividade desenvolvida. A área de tanques com cultivo do camarão *Litopenaeus vannamei* aumentou exponencialmente nos últimos anos, passando de 6,5 ha em 2017 para 837 ha no ano de 2024 (Figura 3).

Figura 2 – Ocupação da Rizicultura no PIMN (2005-2024).



Fonte: IBGE (2025).

Figura 3 - Evolução da área com carcinicultura no PIMN - CE.



Fonte: Associação dos Usuários do Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Morada Nova (Audipimn) – 2025

No que tange à atividade de exploração pecuária, a bovinocultura leiteira, embora

tenha atingido seu auge e venha apresentando redução, mantém no PIMN o cultivo de espécies vegetais para suporte forrageiro, incluindo sorgo forrageiro, capim paulistinha, capim-elefante, capim- buffel e pastagem nativa. A Tabela 1 ilustra a ocupação atual do PIMN com as principais atividades desenvolvidas.

Tabela 1 - Ocupação mensal das atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Cultura	Ocupação mensal											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		X	X	X	X							
Arroz II								X	X	X	X	
Milho		X	X	X	X							
Pastagem Nativa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Capim Paulistinha	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sorgo		X	X	X								
Banana	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Coco	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Camarão	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Reservas hídricas subterrâneas

Para o cálculo da reserva permanente (Rp) foi utilizada a base de dados históricos fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, a partir da qual foi realizada a análise da elevação potenciométrica média do nível estático (NE) do lençol freático no período compreendido entre os anos de 2017 e 2024. É válido destacar que o ano de 2017 foi adotado como ponto de partida da análise por ser o marco inicial do desenvolvimento da carcinicultura,

Complementarmente, para o cálculo da reserva renovável (Rr), utilizaram-se dados de níveis estáticos do lençol freático de uma amostragem de 45 poços distribuídos nos setores CH₁ (16), CH₂ (12), K (9) e NH₃ (8), anteriormente cadastrados e georreferenciados, cujas coordenadas planialtimétricas foram obtidas por meio de um receptor GPS Garmin (*Global Positioning System*) de dupla frequência (L1/L2), com erro máximo de 5 mm,

A Rp representa o volume de água armazenada na camada aquífera limitada na base pelo substrato impermeável e no topo pela superfície potenciométrica mínima. Portanto, refere-se ao volume de água armazenado no aquífero que permanece mesmo diante das variações periódicas do nível freático, sendo capaz de contribuir para o ciclo hidrológico em uma escala plurianual ou até mesmo secular, e que em caso de aquífero aluvial é passível de

exploração.

No cálculo da R_p foi considerada a área irrigável do PIMN no valor de 4.436 ha. A camada média saturada (ΔH) foi obtida pela diferença média de profundidade dos poços (23,98 m) e o nível estático médio relativo ao mês de janeiro (10,61 m) no período de 2017 a 2024. A porosidade drenável (f), também chamada de macroporosidade ou porosidade efetiva no valor de 19,20%, foi adotada conforme Nunes *et al.* (2022).

Moura (2008) verificou por meio de SEVs (sondagens elétricas verticais) que o substrato impermeável é muito variável na área do PIMN, daí porque neste estudo optou-se por utilizar a profundidade média dos poços.

O volume de água correspondente à R_p foi calculado conforme a equação a seguir descrita:

(1)

$$R_p = A * \Delta H * \eta_e$$

em que:

R_p : reserva permanente, $m^3 \text{ ano}^{-1}$;

A : área de ocorrência do aquífero, m^2 ;

ΔH : camada média saturada, m;

η_e : porosidade efetiva, admissível.

A reserva renovável (R_r) é uma medida que representa o volume anual de água que participa do ciclo hidrológico, sendo fortemente influenciada pelas variações sazonais e pelas recargas e explorações anuais do aquífero.

Procedeu-se ao cálculo da reserva renovável (R_r) relativo ao ano de 2025, obtida a partir do monitoramento dos poços de controle que forneceram dados relativos à média do NE do lençol freático no mês em que ele apresenta o nível mais próximo à superfície do solo, que para as condições deste estudo ocorreu no mês de junho de 2025. A carga hidráulica (Δh) de 1,76 m, é o resultado da diferença do valor médio do NE do lençol freático no período de descarga máxima (10,61 m), pelo valor médio do NE do lençol freático no período de recarga máxima (8,85 m).

No cálculo da R_r utilizou-se a equação abaixo descrita:

(2)

$$R_r = A * \Delta h * \eta_e$$

em que:

- Rr: reserva renovável, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$;
 A: Área de ocorrência do aquífero, m^2 ;
 Δh : Variação sazonal do nível estático freático, m;
 η_e : Porosidade efetiva, admissível.

A reserva explotável (Re) indica a quantidade de água que pode ser extraída de forma sustentável, ou seja, sem comprometer a disponibilidade futura do aquífero. O cálculo foi composto pela soma da reserva renovável e uma parcela da reserva permanente, sendo a potencialidade aquífera calculada como 1/3 da reserva total. Esse cálculo é melhor definido na equação abaixo descrita:

(3)

$Re = (Rr + Rp) / 3$ em que:

- Re: Reservas explotável, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$;
 Rr: Reserva renovável, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$;
 Rp: Reserva permanente, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$.

3.4 Coeficientes de requerimento de água

No cálculo dos requerimentos mensais de água das culturas perenes foi considerada a necessidade mensal durante o período de franca produção, estabelecendo-se o seguinte procedimento:

- Evapotranspiração de referência (ET_o): por meio do método de Penman-Monteith.
- Coeficientes das culturas (K_c): para estágio de pleno desenvolvimento das culturas. Para os cultivos anuais foram utilizados os valores de K_c para cada estágio de desenvolvimento.
- Evapotranspiração máxima (ET_m): obtida por meio da expressão:

(4)

$$ET_m = ET_o \times K_c.$$

- Precipitação efetiva (P_e): calculada conforme a expressão:

(5)

$$P_e = (125 - 0,2P_m) P_m / 125$$

sendo P_m a precipitação média.

- Necessidade de Irrigação (NI): calculada conforme equação:

(6)

$$NI = ETm - Pe.$$

f) Requerimento mensal de irrigação ou lâmina bruta (Lb): calculada por meio da expressão:

(7)

$$Lb = NI/E$$

A demanda de água para a atividade carcinicultura nos três ciclos anuais foi estimada tendo como base a reposição de água nos viveiros, a lâmina média de água na superfície e a lâmina de água necessária para saturar o solo.

3.5 Análise de Viabilidade Econômica da Carcinicultura

A análise de viabilidade econômica da atividade carcinicultura no PIMN foi realizada por meio dos indicadores de rentabilidade da análise de investimento relação benefício/custo (B/C), valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e período *Payback*.

Na relação B/C, o critério adotado é de que o quociente deve ser maior que 1,0; indicando que os benefícios superaram os custos, o que torna a atividade viável do ponto de vista econômico. No VPL, o critério adotado para indicar que a atividade é economicamente viável é o VPL maior que 0, indicando que a atividade não gerou prejuízos. Já a TIR deve ser maior que a taxa de desconto real (r), enquanto que o período *Payback* indica o tempo necessário para a recuperação do capital investido. Essas métricas são fundamentais para embasar decisões estratégicas que possam garantir a sustentabilidade econômica da atividade.

As informações necessárias para o cálculo dos indicadores foram obtidas por meio da coleta de dados primários em entrevistas semiestruturadas com os produtores de camarão, das quais constam dos valores monetários de custos fixos associados à aquisição de terra, perfuração de poços e construção de viveiros, e os valores monetários de custos variáveis, associados à energia elétrica, à mão de obra e os insumos (Apêndice A).

Cabe destacar que a atividade de carcinicultura é desenvolvida em três ciclos anuais, com duração média de 90 dias por ciclo e um mês de intervalo entre ciclos. Conforme Costa *et al.* (2016), os valores monetários associados aos custos fixos e variáveis da atividade foram atualizados por meio da equação abaixo descrita:

Equação (8)

$$v_i^0 = v_i \frac{1}{(1+r)^i}$$

sendo r , equivalente ao custo de oportunidade de capital, sendo que para esse trabalho foi considerado um fator de desconto de 12% ao ano, adotada por refletir a taxa mínima de atratividade de projetos no setor agropecuário.

Subsequentemente, foi adotado o Fator de Recuperação de Capital (FRC), conforme proposto por Marques e Coelho (2003), o qual pode ser mensurado a partir da equação abaixo descrita:

(9)

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

sendo,

i : taxa de juros ao ano;

n : vida útil do projeto em anos.

Esse indicador financeiro é fundamental na análise de rentabilidade de um investimento pois incorpora os juros anuais para determinar o custo fixo anual do investimento e a partir desse coeficiente, amortizar o capital investido e confrontá-lo com a receita líquida do projeto. Para esse estudo foi considerada taxa de juros de 12% ao ano e o período de 11 anos, o FRC obtido foi, portanto de 0,1884.

3.6 Formulação geral do modelo de programação linear

Os dados utilizados na construção do modelo de programação linear foram constituídos por dados primários obtidos *in loco*, bem como por meio de dados secundários, obtidos em estudos técnico-científicos anteriormente realizados e reportados na literatura especializada, bem como por informações obtidas junto à Audipimn.

O modelo matemático de programação linear utilizado neste trabalho consistiu em uma função objetivo de maximização da receita líquida, sujeita às restrições de disponibilidade de terra, reserva explotável do aquífero aluvial por setor e mercado (cultivo do arroz).

O objetivo foi obter um padrão ótimo de exploração agropecuária, compatível com as características de exploração do PIMN, visando a maximização da receita líquida anual.

(10)

$$MAX \quad RL = \sum_{i=1}^n P_i Y_i X_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} C_{ij} X_i - \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{12} CT (W_{ih} / E) X_i$$

O modelo deverá atender as restrições abaixo descritas:

$$\sum_{i=1}^n (W_{ih} / E) X_i \leq VM_h (i = 1 \dots, n; h = 1 \dots, 12)$$

$$\sum_{h=1}^{12} \sum_{i=1}^n (W_{ih} / E) X_i \leq VT (i = 1 \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} X_i \leq D_j (i = 1 \dots, n; j = 1 \dots, m)$$

Onde:

RL: receita líquida total do projeto (R\$);

i: número inteiro representando a cultura (i = 1 ..., n);

j: número inteiro representando outros insumos (j = 1 ..., m);

h: número inteiro representando o mês do ano (h = 1 ..., 12);

Pi: preço unitário do produto da i-ésima cultura (R\$ kg⁻¹);

Xi: área cultivada com i-ésima cultura (ha);

Yi : produtividade obtida com a i-ésima cultura (kg ha⁻¹);

Aij: quantidade demandada do insumo j pela cultura i (kg ha⁻¹);

Cij: custo unitário do insumo j pela cultura i (R\$ kg⁻¹);

CT: custo unitário da tarifa de água (R\$ mm ha⁻¹);

Wih /E: lâmina bruta mensal de água para irrigar a i-ésima cultura (mm);

E: eficiência de irrigação (forma decimal);

VMh: volume mensal de água disponível;

VT: volume anual de água disponível;

Dj: disponibilidade máxima do insumo j.

O modelo de programação linear foi solucionado por meio do “método *simplex*

revisado”, com o uso do *Linear Interactive and Discrete Optimizer* (LINDO), um software desenvolvido pelo *Lindo Systems Inc*, por meio do qual foi possível determinar a solução ótima do modelo de programação linear.

Os coeficientes da função-objetivo representam a renda líquida por unidade de área para cada uma das atividades (R\$ ha⁻¹). Na atividade carcinicultura, o coeficiente da função-objetivo foi obtido por meio de um fluxo de caixa para um período de dez anos, em base aos preços dos produtos, níveis de produtividade e custos de produção, além dos custos fixos associados à aquisição de terra, construção de viveiro e construção de poço ao longo do período considerado na análise.

3.7 Coeficientes e limites das restrições

O modelo de programação linear foi formulado com vistas a maximizar a receita líquida anual por hectare. Os coeficientes da função objetivo foram obtidos através da análise econômica de cada atividade, sendo que para a atividade de carcinicultura os valores foram atualizados de acordo com um fator de recuperação do capital (FRC) de 16%, e para as demais atividades desenvolvidas no PIMN foram consideradas as informações obtidas por meio da Audipimn.

A função objetivo deste modelo buscou maximizar a receita líquida por hectare, além de otimizar a alocação de água, para uma gestão sustentável do aquífero aluvial.

$$\text{Max } 2376A2 + 2376A8 + 1683M + 495PN + 1584P + 7920S + 1980B + 2475C + 56186CAM$$

ÁREA

$$\text{TJAN) } P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TFEV) } A2 + S + M + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TMAR) } A2 + S + M + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TABR) } A2 + S + M + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TMAI) } A2 + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TJUN) } P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TJUL) } P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TAGO) } A8 + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TSET) } A8 + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

$$\text{TOUT) } A8 + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$$

TNOV) $A8 + P + PN + B + C + CAM \leq 4436$

TDEZ) $P + PN + B + C + CAM \leq 4436$

ÁGUA

AJAN) $372P + 372PN + 1531B + 1068C + 2077CAM \leq 33695955$

AFEV) $722A2 + 100M + 627B + 276C + 1498CAM \leq 31069475$

AMAR) $877CAM \leq 30293965$

AABR) $901CAM \leq 32238967$

AMAI) $373A2 + 257M + 414PN + 414B + 100C + 1124CAM \leq 36480056$

AJUN) $1010P + 854PN + 854B + 542C + 1287CAM \leq 36993322$

AJUL) $1670P + 1488PN + 1488B + 1123C + 1796CAM \leq 42954675$

AAGO) $2041A8 + 2268P + 2051PN + 2051B + 1618C + 2438CAM \leq 37345330$

ASET) $2437A8 + 2586P + 2342PN + 2342B + 1855C + 2467CAM \leq 35147315$

AOUT) $2821A8 + 2869P + 2604PN + 2604B + 2075C + 2793CAM \leq 34507743$

ANOV) $2253A8 + 2759P + 1737PN + 2503B + 1993C + 2569CAM \leq 34675325$

ADEZ) $2465P + 1463PN + 2214B + 1714C + 2495CAM \leq 34016082$

ATOT) $1095A2 + 9552A8 + 358M + 13327PN + 16000P + S + 16630B + 12362C + 46322CAM \leq 42954675$

As restrições de área correspondem à combinação do plano de ocupação das atividades no ano e determinam que a ocupação da área deve ser menor ou igual a área disponível por setor.

As restrições de água garantem que a demanda anual de água das atividades não seja maior que o volume de água disponível no período, ou seja, a reserva explotável do PIMN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Reservas hídricas subterrâneas

A gestão sustentável dos aquíferos depende da quantificação precisa da sua disponibilidade hídrica, não obstante, ao mensurar matematicamente essa disponibilidade é possível obter uma análise do comportamento das reservas o que permite estabelecer limites seguros para a exploração do recurso, garantindo o atendimento das demandas socioeconômicas sem o comprometimento de sua sustentabilidade. Dessa forma, a partir dos cálculos realizados, este estudo traz os respectivos resultados obtidos a partir da estimativa de cada reserva.

O volume de água correspondente à reserva permanente é de $113,9 \times 10^6 \text{ m}^3$, sendo a reserva renovável de $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o ano de 2025. A reserva explorável, aquela que pode ser retirada sem comprometer a sustentabilidade do aquífero, corresponde ao volume de água de $42,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o ano de 2025. Cabe destacar que esse valor excede em 19,5% o valor obtido por Lins *et al.* (2025), em estudo das reservas hídricas subterrâneas no PIMN entre os anos de 2021 e 2022, cujo valor obtido foi de $35,886 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$.

Embora essa diferença possa ser atribuída a uma variação metodológica, em que foi utilizado no presente trabalho uma série histórica mais abrangente (2017-2024), além dos diferentes períodos de análise e profundidade média dos poços adotada nos dois estudos, o resultado expressa a variabilidade hídrica, característica marcante da região semiárida, pois a série histórica adotada abrangeu anos de maior precipitação pluviométrica, com médias em torno de $681,62 \text{ mm ano}^{-1}$, segundo dados fornecidos pela Cogerh (2022, 2023, 2024), enquanto que, para o ano base (2021) em que foi desenvolvida a pesquisa de Lins *et al.* (2025), a precipitação pluviométrica foi em torno de 593 mm ano^{-1} .

O volume de água $42,9 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ corresponde à disponibilidade de água do aquífero aluvial para uso no PIMN no segundo semestre de 2025. Considerando o consumo contínuo, e, portanto, a redução nesta disponibilidade ao longo dos meses subsequentes, e tendo em vista os níveis estáticos relativos aos meses de julho a dezembro do ano de 2024, foi possível estimar os volumes de água disponíveis para os meses de janeiro a dezembro, com destaque para o mês de julho com a maior recarga conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Volume de água mensal disponível para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Volume mensal de água explotável (x 10 ⁶ m ³)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
33,6	31,0	30,2	32,2	36,4	36,9	42,9	37,3	35,1	34,5	34,6	34,0

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Sustentabilidade e Potencial de Exploração do Aquífero Aluvial no PIMN

O decréscimo no volume de águas provenientes da bacia hidrográfica do Rio Banabuiú provocou significativo impacto nas atividades agrícolas desenvolvidas na região do Vale do Jaguaribe, sobretudo no PIMN (Silveira *et al.*, 2011). Isso evidenciou a vulnerabilidade dessas atividades diante de condições climáticas extremas em região semiárida, trazendo, por consequência, uma pressão constante sobre o aquífero aluvionar presente na região (Nunes *et al.* 2022).

Além disso, o uso contínuo desse recurso é intensificado em virtude de períodos de estiagem prolongados, o que pode ser agravado, ainda, pelo crescimento de atividades que demandam um grande volume de água para o seu desenvolvimento, tais como a carcinicultura. Tal atividade depende exclusivamente da água proveniente do aquífero aluvionar, sendo, atualmente, a atividade mais abrangente no PIMN e responsável pelo maior consumo de água. Estima-se, segundo Lins *et al.* (2023), que para cada ciclo de criação seja utilizado um volume de cerca de 2.129 mm.

Verificou-se que, embora no período chuvoso o aquífero aluvial tenha recebido uma recarga considerável, apresentando uma carga hidráulica de 1,76 m proveniente da precipitação pluviométrica, foi observado, com base nos cálculos realizados, que a partir do mês de agosto ocorre uma redução acentuada nos níveis estáticos, de modo que a recarga anual não consegue compensar as descargas mensais.

De modo semelhante, Silveira *et al.* (2016), ao realizarem o monitoramento de 16 poços localizados em aquífero aluvial em região semiárida no ano de 2014, verificaram que, após a quadra chuvosa, ocorre a depleção dos níveis potenciométricos, e esse decréscimo nos níveis estáticos manteve-se contínuo até meados de março do ano seguinte, quando o aquífero recebe recarga em virtude do início da quadra chuvosa. A natureza do fato se dá, segundo os autores supracitados, em decorrência de alguns aspectos a serem elucidados, tais como a lentidão com que se dá a recarga em virtude do elevado escoamento superficial, as perdas por

evapotranspiração e a exploração contínua, para o uso na agricultura.

Tais informações são complementadas por Magalhães *et al.* (2023), que apresentaram relevantes resultados a respeito do levantamento de dados ocorrido entre os anos de 2014 a 2019 sobre o aquífero aluvial localizado no PIMN. Nesse caso, ao observarem o comportamento do NE do lençol freático no período seco e chuvoso, os autores destacam a ocorrência de uma ascensão lenta do lençol freático, contrapondo-se a uma rápida depleção do aquífero no decorrer do ano. É válido frisar que tais fatores são também um reflexo da crise hídrica enfrentada no Estado do Ceará no período. A recuperação dos poços só ocorreu nos anos subsequentes, sendo que a precipitação pluviométrica no ano 2018 foi de 829,6 mm (Cogerh, 2022), valor acima da média histórica, o que justifica a recuperação do aquífero.

Embora o ciclo hidrológico apresente forte influência, sendo que historicamente o maior nível de depleção ocorre em anos de índices pluviométricos abaixo da média, a depleção do aquífero é multifatorial, tal como afirmam Brito *et al.* (2020). Para os autores, o padrão de uso do solo também é um fator importante a ser avaliado. Nesse sentido, um manejo inadequado do solo pode afetar sua estrutura, contribuindo para uma redução na taxa de infiltração, conforme afirmam Klein e Klein (2014), que reforçam essa hipótese ao afirmarem que a recarga dos aquíferos depende diretamente da preservação ambiental, ou seja, não apenas a correta gestão do recurso poderá evitar sua superexploração, bem como a adoção de práticas conservacionistas.

4.3 Indicadores de Rentabilidade da Análise de Investimento

Na Tabela 3 são apresentados para 1,0 hectare os valores nominais e atualizados relativos ao investimento, aos custos de produção e as receitas para um fluxo de caixa de dez anos da atividade carcinicultura no Projeto de Irrigação Morada Nova.

Tabela 3 – Fluxo monetário referentes aos valores nominais e aos valores atualizados, 2025.

Ano	Valores Nominais (\$)			F.D* (r=12%)	Valores Atualizados (\$)	
	Custos	Investimentos	Receitas		Custos Totais	Receitas
0		R\$ 131.686,00		1	131.686,00	
1	121.950,00		181.000,00	0,89	108.883,93	161.607,14
2	121.950,00		181.000,00	0,80	97.217,79	144.292,09
3	121.950,00		181.000,00	0,71	86.801,60	128.832,22
4	121.950,00		181.000,00	0,64	77.501,43	115.028,77
5	121.950,00		181.000,00	0,57	69.197,71	102.704,26
6	121.950,00		181.000,00	0,51	61.783,67	91.700,23
7	121.950,00		181.000,00	0,45	55.163,99	81.875,21
8	121.950,00		181.000,00	0,40	49.253,56	73.102,86
9	121.950,00		181.000,00	0,36	43.976,39	65.270,41
10	121.950,00		181.000,00	0,32	39.264,64	58.277,16
Total	1.219.500,00		1.810.000,00		689.044,70	1.022.690,37

Fator de Desconto

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 03 os indicadores de rentabilidade da análise de investimento apresentaram uma relação B/C igual a 1,5; valor obtido pela divisão da receita atualizada pelo custo total atualizado. Um VPL de R\$ 333.645,7, obtido pela diferença da receita atualizada pelo custo atualizado, uma TIR de 22%, e um período *Payback* de três anos obtidos através do fluxo de caixa. Em consonância com os critérios de decisão recomendados para a análise, tais resultados evidenciam que a atividade se apresenta como viável economicamente.

A relação B/C igual a 1,5 indica que para cada R\$ 1,00 investido na atividade ela proporcionará um lucro de R\$ 1,50, em valores atualizados. O VPL positivo indica que a atividade gera lucro, sendo considerado que, quanto maior o VPL, mais atrativa será a atividade. Quanto à TIR, considerada o principal indicador na análise econômica, tendo em vista o valor de 22%, bem superior à taxa de desconto (12%), também apresenta um aspecto favorável, pois a relação entre a taxa de desconto real e as receitas é inversamente proporcional, haja vista que quanto maior a taxa de juros, menor será o lucro. Nesse caso, a atividade somente se tornaria

inviável se a taxa de juros atingisse 22%. A propósito do *Payback*, obtido por meio do fluxo de caixa, a atividade apresenta fluxo de caixa positivo a partir do terceiro ano (R\$ 10.142,14).

A viabilidade da carcinicultura na região nordeste também é corroborada por Mendes Filho *et al.* (2024). Nesse caso, a análise foi realizada em duas situações com produção semi-intensiva, a primeira com criatório em águas interiores de baixa salinidade (2 g L^{-1}) e a segunda em região costeira com águas de média salinidade (15 g L^{-1}). Os resultados da análise econômica da atividade em situação semelhante à do PIMN (baixa salinidade) forneceram dados de VPL de R\$ 3.107.929,74; TIR de 49,45%, superior à taxa de juros de 10,5% ao ano, com *Payback* no segundo ano. Enquanto que na situação de média salinidade os resultados foram inferiores, VPL de R\$ 92.744,31, TIR de 11,89% e *Payback* no quinto ano, o que mostra que a carcinicultura não somente é viável do ponto de vista econômico, como a carcinicultura de águas interiores é ainda mais rentável do que a realizada em regiões costeiras.

Matias *et al.* (2020) também reforçaram o potencial econômico da carcinicultura na região Nordeste. Por meio do uso dos indicadores econômicos destacados, os autores obtiveram valores expressivamente elevados se comparado aos resultados do PIMN. Nesse caso, foram utilizados diferentes parâmetros de análise: viabilidade econômica em sistema superintensivo em área de 1,0 ha e com investimento inicial de R\$ 700.000,00, e viabilidade econômica em sistema semi-intensivo em área de 50 hectares e com investimento inicial de R\$ 1.350.000,00, com taxa de juros de 12% ao ano. No sistema superintensivo, os autores obtiveram um VPL de R\$ 6.992.521,01 e TIR de 153,37%, com *Payback* no 1º ano, enquanto que o sistema semi-intensivo obtiveram um VPL de R\$ 13.847.343,60 e TIR de 153,24% com *Payback* no 1º ano.

É válido frisar que a disparidade no VPL mesmo com a TIR e período *Payback* tão próximos pode ser atribuída a dois fatores: a diferença de investimento e a produtividade, sendo que no sistema superintensivo obtiveram uma produtividade de $96.821 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto no semi-intensivo a produtividade foi de $6.843 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Importante notar também que o sistema superintensivo, semelhante ao que é realizado no PIMN, apresenta maior eficiência por metro quadrado se comparado ao sistema semi-intensivo. Contudo, mesmo com essa diferença, o VPL ainda é superior no sistema semi-intensivo, isso ocorre porque a escala de produção do sistema semi-intensivo é maior (50 ha), o que gera um retorno financeiro total superior, apesar de sua menor eficiência por unidade de área.

De forma semelhante, Cozer *et al.* (2023) também apresentaram resultados que validam a viabilidade da carcinicultura. Nesse caso, foram avaliados dois sistemas de

produção, sendo um sistema de produção convencional (PC) e um sistema de produção integrado (PI), com criação semi-intensiva. No trabalho, os autores fizeram uma análise comparativa entre dois sistemas objetivando identificar aquele que fosse mais atrativo economicamente. É válido mencionar que nesse trabalho foi utilizado a taxa mínima de atratividade de 3,5% ao ano, e que a moeda utilizada foi o dólar americano (US\$). No sistema de produção convencional o VPL foi de US\$ 758.147,70, a relação B/C de 1,66, e a TIR de 35%, enquanto que no sistema de produção integrada o VPL foi de US\$ 97.452,54, a relação B/C de 1,23 e a TIR de 7%. Para ambos os sistemas o capital investido é recuperado no primeiro ano.

O estudo concluiu, portanto, que embora os indicadores financeiros tenham apontado o sistema PC como mais atrativo, com valores superiores aos encontrados no sistema de PI, ambos se mostram viáveis e lucrativos; adicionalmente, os valores ajudam a consolidar a atividade como uma alternativa economicamente promissora.

Com efeito, tais resultados explicam porque a carcinicultura tem se destacado, levando muitos produtores rurais, que antes desenvolviam atividades predominantemente voltadas para o cultivo de espécies agrícolas de interesse econômico, e para a bovinocultura leiteira, a adotarem a carcinicultura como principal atividade econômica. Um fator que pode ter contribuído para isso é a adaptabilidade da espécie *Litopenaeus vannamei* em águas oligohalinas (com baixa salinidade), além da comercialização com ampla aceitabilidade e com certo e rápido retorno financeiro.

Todavia, embora a carcinicultura seja uma atividade economicamente sustentável como mencionado anteriormente, é válido frisar que o produtor de pequeno e médio porte ainda enfrentam muitas dificuldades para o seu desenvolvimento, não conseguindo financiamento, principalmente os disponibilizados pelo governo federal por meio do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf), que oferece condições especiais como juros mais baixos e prazos mais longos.

Isso ocorre devido, principalmente, a fatores como a vulnerabilidade que a atividade apresenta, tais como suscetibilidade a doenças da espécie, impactos ambientais que a atividade gera e instabilidade no mercado, o que a torna inapta para obtenção de linhas de crédito. Outro fator que contribui é a dificuldade de licenciamento ambiental dos empreendimentos, o que constitui o principal entrave para o acesso ao crédito (Vidal; Ximenes, 2016).

4.4 Resolução do Modelo de Programação Linear

Na Tabela 4 consta o plano ótimo de exploração das atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), sendo que a solução apresentada maximiza a receita líquida e atende as restrições de terra, água e mercado. De acordo com o modelo, a máxima renda líquida obtida foi de R\$ 43.302.592,17.

Tabela 4 – Solução ótima do modelo de programação linear para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Atividades	Lâmina de água (mm)	Coef. Técnico da função objetivo (R\$ ha ⁻¹)	Área (ha)	Receita líquida otimizada (R\$)
Arroz I	109	2.376,00	200	475.200,00
Arroz II	955	2.376,00	150	356.400,00
Milho	36	1.683,00	27	45.441,00
Pastagem Nativa	1.333	495,00	420	207.900,00
Capim Paulistinha	1.600	1.584,00	80	126.720,00
Sorgo	0	7.920,00	64	506.880,00
Banana	1.663	1.980,00	4	7.920,00
Coco	1.236	2.475,00	7	17.325,00
Camarão	4632	56.186,00	740	41.558.806,17
Total				43.302.592,17

Fonte: Elaborada pela autora.

O modelo indica que todas as atividades são contempladas no plano de ocupação, fazendo parte da base. Apenas a pastagem nativa e o capim paulistinha não participam das atividades em seu nível mais elevado. A carcinicultura se destaca apresentando a maior receita líquida (R\$ 41.558.806,17), o que representa individualmente 95,97% da receita total das atividades desenvolvidas no PIMN. Não obstante, a carcinicultura também é a atividade que demanda a maior quantidade de água para o seu desenvolvimento, consumindo cerca de 40,05% da lâmina total requerida para o desenvolvimento de todas as demais atividades.

No que tange às outras variáveis contempladas no modelo, os valores referentes à máxima receita líquida obtida levantam questões sobre a viabilidade de manter atividades de baixo retorno e alto consumo de água, a exemplo das frutíferas como a bananeira e o coqueiro, cujo consumo anual representa 10,69 e 14,33%, respectivamente, do requerimento de água total das atividades. Enquanto que a receita líquida obtida é inferior, se comparado às culturas forrageiras, por exemplo, que com um consumo próximo ou apenas com o suporte

pluviométrico, no caso do sorgo, trazem uma receita expressiva, sendo que o sorgo é a segunda atividade mais rentável economicamente. Infere-se, portanto, a necessidade de um plano mais estratégico no sentido de se implantar culturas com menor consumo de água e maior valor agregado

Nesse sentido, é válido salientar que o aumento da área ocupada por cada atividade será diretamente proporcional ao incremento na disponibilidade de água para o desenvolvimento dessa mesma atividade. Sendo assim, a alocação de um recurso limitado, como a água, deve levar em conta a rentabilidade da cultura.

Infere-se, portanto, que as restrições de áreas são variáveis que definem o plano ótimo e as restrições que apresentam preço-sombra são as que mais prejudicam a maximização da receita ao forçarem o uso de recursos escassos em atividades menos rentáveis. Na Tabela 5 é apresentada a ocupação em hectares de cada atividade desenvolvida no PIMN.

Tabela 5 – Ocupação mensal para cada atividade desenvolvida no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Cultura	Ocupação mensal (ha)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		200	200	200	200							
Arroz II								150	150	150	150	
Milho		27	27	27	27							
Pastagem Nativa	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Capim Paulistinha	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Sorgo		64	64	64								
Banana	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Coco	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Camarão	739	739	739	739	739	739	739	739	739	739	739	739
Total	1250	1541	1541	1541	1477	1250	1250	1400	1400	1400	1400	1250

Fonte: Elaborada pela autora.

A carcinicultura, embora por convenção geral seja realizada em três ciclos anuais, com intervalos de um mês entre cada ciclo não há consenso quanto ao período de produção, pois os produtores dependem de fatores externos, como mão de obra e mercado, que influenciam tanto na demanda requerida como também na oscilação dos preços. Dessa forma, conforme é apresentado na Tabela 04, a atividade é desenvolvida de forma contínua.

4.5 Análise de sensibilidade da receita líquida

Após a obtenção da solução ótima do modelo de programação linear, é necessário realizar a análise de sensibilidade, visto que os coeficientes técnicos obtidos para a formulação do modelo são muitas vezes estimados e estão sujeitos à possíveis variações. Dessa forma, a análise de sensibilidade é uma ferramenta importante através da qual é possível simular diferentes cenários ocasionados por mudanças nos níveis das restrições e os seus efeitos na solução ótima do modelo. Na Tabela 6 são representados os intervalos em que a solução continua ótima, apresentando os respectivos acréscimos e decréscimos dentro do limite permitido.

Tabela 6 – Análise de sensibilidade da receita líquida gerada para cada atividade desenvolvida no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Atividades	Área (ha)	Acréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)	Valor atual (R\$ ha ⁻¹)	Decréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)
Arroz I	200	Infinito	2.376,00	161.579,00
Arroz II	150	Infinito	2.376,00	161.579,00
Milho	27	Infinito	1.683,00	1.248,00
Pastagem Nativa	420	15.669,00	495,00	Infinito
Capim Paulistinha	80	17.823,00	1.584,00	Infinito
Sorgo	64	Infinito	7.920,00	7.918,00
Banana	4	Infinito	1.980,00	Infinito
Coco	7	Infinito	2.475,00	Infinito
Camarão	739	161.579,00	56.186,00	51.600,00

Fonte: Elaborada pela autora

Ao considerar, por exemplo, a cultura do sorgo forrageiro, verifica-se que a receita líquida gerada pela atividade pode ter um incremento infinito. No entanto, um decréscimo superior a R\$ 7.918,00 poderia reduzir a área destinada para a cultura ou forçar sua saída. Dessa forma, a análise de sensibilidade, permite que se possa projetar cenários futuros orientado os produtores na tomada de decisão.

4.6 Análise de sensibilidade do recurso terra.

A análise de sensibilidade para o recurso terra indica que este não apresenta limitação, visto que, mesmo nos meses de maior ocupação da área, apenas 34,74% do total disponível foi utilizado, de modo que o recurso apresentou margem ou superavit em todos os meses, pois não existe preço-sombra associado. Além disso, a análise mostra os intervalos admitidos para que

não ocorra alterações na otimização, mantendo as variáveis na base do modelo, conforme indica a Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de sensibilidade do recurso terra para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Mês	Área ocupada pelas atividades (ha)	folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	1.250	3.186	0,00	Infinito	3.185
Fev	1.541	2.895	0,00	Infinito	2.894
Mar	1.541	2.895	0,00	Infinito	2.894
Abr	1.541	2.895	0,00	Infinito	2.894
Mai	1.477	2.959	0,00	Infinito	2.985
Jun	1.250	3.186	0,00	Infinito	3.185
Jul	1.250	3.186	0,00	Infinito	3.185
Ago	1.400	3.036	0,00	Infinito	3.035
Set	1.400	3.036	0,00	Infinito	3.035
Out	1.400	3.036	0,00	Infinito	3.035
Nov	1.400	3.036	0,00	Infinito	3.035
Dez	1.250	3.186	0,00	Infinito	3.185

Fonte: Elaborada pela autora.

Esses resultados podem ser corroborados pelo trabalho de Rodrigues *et al.* (2018), que realizaram estudo no PIMN, onde os autores também concluíram que o recurso terra apresentou preço sombra igual a zero, o que indica que o recurso não é limitante.

4.7 Análise de sensibilidade do recurso da água.

Os requerimentos de água para cada atividade desenvolvida no PIMN estão disponíveis na Tabela 8 e as planilhas complementares que apresentam os respectivos cálculos estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 8 – Requerimento de água (m³ ha⁻¹) para as atividades desenvolvidas em cada mês no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Atividade	Requerimento de água (m ³ ha ⁻¹)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		721,9			373							
Arroz II								2041	2437	2821	2253	
Milho		100			257							
Pastagem Nativa	372				414	854	1488	2051	2342	2604	1737	1463

Capim												
Paulistinha	372					1010	1670	2268	2586	2869	2759	2465
Sorgo												
Banana	1531	627			414	854	1488	2051	2342	2601	2503	2214
Coco	1068	276			100	542	1123	1618	1855	2075	1993	1714
Camarão	2077	1498	877	901	1124	1287	1796	2438	2467	2793	2569	2495
Total	5420	3223	877	901	2682	4547	7565	12467	14029	15762,8	13814	10351

Fonte: Elaborada pela autora.

A análise de sensibilidade para o recurso água revela que sua disponibilidade mensal é superior a demanda requerida para o desenvolvimento das atividades; consequentemente, o recurso apresentou folga em todos os meses, não indicando preço sombra associado. A análise evidencia também que o mês de julho é o período de máxima recarga do aquífero, quando se tem a maior reserva explotável. Infere-se, portanto, que o recurso água mensal não se constitui em um fator de produção limitante ao desenvolvimento das atividades naquele mês, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Análise de sensibilidade do recurso água para cada mês no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Mês	Disponibilidade de água (m ³)	Folga (m ³)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	33.695.955	31.960.072	0,00	Infinito	31960072
Fev	31.069.475	29.809.918	0,00	Infinito	29809918
Mar	30.293.965	29.645.278	0,00	Infinito	29645278
Abr	32.238.967	31.572.530	0,00	Infinito	31572530
Mai	36.480.056	35.390.896	0,00	Infinito	35390896
Jun	36.993.322	35.594.680	0,00	Infinito	35390896
Jul	42.954.675	40.853.864	0,00	Infinito	40853864
Ago	37.345.330	34.173.484	0,00	Infinito	34173484
Set	35.147.315	31.744.140	0,00	Infinito	31744140
Out	34.507.743	30.670.570	0,00	Infinito	30670570
Nov	34.675.325	31.462.952	0,00	Infinito	31462952
Dez	34.016.082	31.338.102	0,00	Infinito	31338102

Fonte: Elaborada pela autora

Os dados sugerem a possibilidade de maximização da receita líquida, e para isso uma alternativa seria a expansão de áreas cultivadas. Entretanto, embora os dados levem à suposição de que o PIMN possui uma elevada margem de segurança hídrica, evidenciada pelo elevado decréscimo máximo permitido, é preciso ter cautela.

Lins *et al.* (2025), ao realizarem a análise de sensibilidade do recurso água para as

atividades desenvolvidas no PIMN, verificaram que o recurso água não apresentou margem de folga, indicando preço sombra associado de R\$ 0,99; o que provocaria um aumento de R\$ 0,99 na receita líquida a cada incremento de 10 m³ do recurso. Nesse caso, o inverso é verdadeiro, pois a cada decréscimo de 10 m³, haveria uma redução na receita de R\$ 0,90.

4.8 Otimização do modelo de programação linear considerando quatro níveis de disponibilidade hídrica e diferentes volumes de disponibilidade de água mensal.

Especialmente, no semiárido, o recurso água é aquele que mostra maior fragilidade em sistemas agrícolas, sendo na grande maioria das vezes o recurso mais limitante. Isso acaba influenciando de forma expressiva na capacidade produtiva das áreas. Dessa forma, o aumento gradual no consumo de água, sobretudo nos projetos públicos de irrigação gera a necessidade de se levar em conta períodos prolongados de estiagem que refletem na redução da disponibilidade dos recursos hídricos (Carvalho *et al.*, 2000). Tais fatores levam à iminente necessidade de se realizar um planejamento eficaz do uso do recurso, sendo de suma relevância projetar cenários em que ocorram diferentes níveis de disponibilidade do recurso e avaliar seu impacto na receita líquida do produtor.

4.8.1 Solução do modelo para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da otimização do modelo de programação linear, para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica. Os resultados evidenciam que todas as atividades foram recomendadas, contudo, a única que apresentou sensibilidade à redução do recurso água foi a carcinicultura, sendo que as receitas líquidas atribuídas às demais atividades permaneceram inalteradas. Observa-se, também que, conforme o nível de redução da disponibilidade hídrica foi se intensificando houve um impacto progressivo na rentabilidade, pois a receita líquida anual apresentou declínios de 24,1; 48,1 e 72,2%, respectivamente.

Tabela 10 – Solução ótima do modelo de programação linear para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na oferta hídrica no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Redução de 20% na oferta hídrica				
Atividades	Lâmina (mm)	Coef. Técnico da função objetivo (R\$ ha⁻¹)	Área (ha)	Receita líquida otimizada (R\$)
Arroz I	110	2.376,00	200	475.200,00
Arroz II	955	2.376,00	150	356.400,00
Milho	36	1.683,00	27	45.441,00
Pastagem Nativa	1.333	495,00	420	207.900,00
Capim Paulistinha	1.600	1.584,00	80	126.720,00
Sorgo	0	7.920,00	64	506.880,00
Banana	1.663	1.980,00	4	7.920,00
Coco	1.236	2.475,00	7	17.325,00
Camarão	4.632	56.186,00	554	31.138.480,77
Total				32.882.266,77
Redução de 40% na oferta hídrica				
Atividades	Lâmina (mm)	Coef. Técnico da função objetivo (R\$ ha⁻¹)	Área (ha)	Receita líquida otimizada (R\$)
Arroz I	110	2.376,00	200	475.200,00
Arroz II	955	2.376,00	150	356.400,00
Milho	36	1.683,00	27	45.441,00
Pastagem Nativa	1.333	495,00	420	207.900,00
Capim Paulistinha	1.600	1.584,00	80	126.720,00
Sorgo	0	7.920,00	64	506.880,00
Banana	1.663	1.980,00	4	7.920,00
Coco	1.236	2.475,00	7	17.325,00
Camarão	4.632	56.186,00	369	20.718.153,69
Total				22.461.939,69
Redução de 60% oferta hídrica				
Atividades	Lâmina (mm)	Coef. Técnico da função objetivo (R\$ ha⁻¹)	Área Ótima (ha)	Receita líquida otimizada (R\$)
Arroz I	110	2.376,00	200	475.200,00
Arroz II	955	2.376,00	150	356.400,00
Milho	36	1.683,00	27	45.441,00
Pastagem Nativa	1.333	495,00	420	207.900,00
Capim Paulistinha	1.600	1.584,00	80	126.720,00
Sorgo	0	7.920,00	64	506.880,00
Banana	1.663	1.980,00	4	7.920,00
Coco	1.236	2.475,00	7	17.325,00
Camarão	4.632	56.186,00	183	10.297.830,87
Total				12.041.616,87

Fonte: Elaborada pela autora.

Tais resultados evidenciam que a sustentabilidade econômica do PIMN está intrinsecamente condicionada à segurança hídrica, conforme corroboram Santos *et al.* (2005) que ao realizarem estudo semelhante no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú-CE, utilizando equivalentes cenários de escassez hídrica, constataram um decréscimo na receita líquida anual da ordem de 7,0; 22,9 e 43,4% para os níveis de 20, 40 e 60%, respectivamente, se comparada à receita obtida em um cenário não restritivo.

4.8.2 Análise de sensibilidade da receita líquida para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.

Na Tabela 11 são apresentados os valores atuais atribuídos a cada atividade desenvolvida e os intervalos de máximo acréscimo e decréscimo permitido para os níveis de redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica. Os dados demonstram, portanto, que o camarão e o sorgo possuem decréscimos permitidos muito altos o que indica que, mesmo que o lucro dessas atividades decrescesse significativamente, elas ainda estariam contempladas no plano ótimo.

Tabela 11 – Análise de sensibilidade da receita líquida para os níveis de 20, 40 e 60% de redução na disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Redução de 20% da oferta hídrica				
Atividades	Área (ha)	Acréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)	Valor Atual (R\$ ha ⁻¹)	Decréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)
Arroz I	200	Infinito	2.376,00	Infinito
Arroz II	150	Infinito	2.376,00	Infinito
Milho	27	Infinito	1.683,00	1.248,00
Pastagem Nativa	420	15.669,00	495,00	Infinito
Capim Paulistinha	80	17.823,00	1.584,00	Infinito
Sorgo	64	Infinito	7.920,00	7.918,00
Banana	4	Infinito	1.980,00	Infinito
Coco	7	Infinito	2.475,00	Infinito
Camarão	554	161.579,00	56.186,00	51.600,00
Redução de 40% na oferta hídrica				
Atividades	Área (ha)	Acréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)	Valor Atual (R\$ ha ⁻¹)	Decréscimo permitido (R\$ ha ⁻¹)
Arroz I	200	Infinito	2.376,00	Infinito

Arroz II	150	Infinito	2.376,00	Infinito
Milho	27	Infinito	1.683,00	1.248,76
Pastagem Nativa	420	15.669,90	495,00	Infinito
Capim Paulistinha	80	17.823,10	1.584,00	Infinito
Sorgo	64	Infinito	7.920,00	7.918,78
Banana	4	Infinito	1.980,00	Infinito
Coco	7	Infinito	2.475,00	Infinito
Camarão	369	161.579,15	56.186,00	51.600,12
Redução de 60% na oferta hídrica				
Atividades	Área (ha)	Acréscimo permitido (R\$ ha⁻¹)	Valor Atual (R\$ ha⁻¹)	Decréscimo permitido (R\$ ha⁻¹)
Arroz I	200	Infinito	2.376,00	Infinito
Arroz II	150	Infinito	2.376,00	Infinito
Milho	27	Infinito	1.683,00	1248.76
Pastagem Nativa	420	15669.90	495,00	Infinito
Capim Paulistinha	80	17823.10	1.584,00	Infinito
Sorgo	64	Infinito	7.920,00	7918.78
Banana	4	Infinito	1.980,00	Infinito
Coco	7	Infinito	2.475,00	Infinito
Camarão	183	161579.15	56.186,00	51.600,12

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que a ocupação da área com as culturas de menor valor agregado permaneceu inalterado, e apenas a carcinicultura apresentou reduções de 25, 50 e 75%, respectivamente, para cada nível de restrição de disponibilidade hídrica, se comparado ao plano de ocupação originalmente proposto na otimização.

4.8.3 Análise de sensibilidade do recurso terra para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados referentes à análise de sensibilidade do recurso terra, para os níveis de redução de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica. O plano de ocupação atualizado para os três níveis de redução encontra-se no Apêndice C.

A partir de tais resultados entende-se que o recurso terra não será restritivo, mesmo em um cenário de redução de disponibilidade hídrica, pois ele apresenta preço sombra igual a zero. Além disso, os intervalos de máximo acréscimo e decréscimo permitem um amplo horizonte de variação na disponibilidade do recurso terra sem causar alterações na solução ótima do modelo.

A ocupação da área é uma restrição estática, sendo a terra um recurso finito, ou seja, não pode produzir além do que o espaço disponível permite. Contudo, mesmo com folga, o que demonstra que o recurso não é restritivo no cenário atual, a realização do monitoramento constante permite verificar quanto é possível expandir ou reduzir a produção dentro de uma limitação específica.

Tabela 12 – Análise de sensibilidade do recurso água com reduções de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Redução da oferta hídrica em 20%					
Mês	Área ocupada pelas atividades (ha)	folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	1065	3.371	0,00	Infinito	3.371
Fev	1.356	3.080	0,00	Infinito	3.080
Mar	1.356	3.080	0,00	Infinito	3.080
Abr	1.356	3.080	0,00	Infinito	3.080
Mai	1.292	3.144	0,00	Infinito	3.171
Jun	1.065	3.371	0,00	Infinito	3.171
Jul	1.065	3.371	0,00	Infinito	3.371
Ago	1.215	3.221	0,00	Infinito	3.221
Set	1.215	3.221	0,00	Infinito	3.221
Out	1.215	3.221	0,00	Infinito	3.221
Nov	1.215	3.221	0,00	Infinito	3.221
Dez	1.065	3.371	0,00	Infinito	3.371
Redução da oferta hídrica em 40%					
Mês	Área ocupada pelas atividades (ha)	folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	880	3.556	0,00	Infinito	3.556
Fev	1.171	3.265	0,00	Infinito	3.265
Mar	1.171	3.265	0,00	Infinito	3.265
Abr	1.171	3.265	0,00	Infinito	3.265
Mai	1.107	3.329	0,00	Infinito	3.356
Jun	880	3.556	0,00	Infinito	3.556
Jul	880	3.556	0,00	Infinito	3.556
Ago	1.030	3.406	0,00	Infinito	3.406
Set	103	4.333	0,00	Infinito	3.406
Out	1.030	3.406	0,00	Infinito	3.406
Nov	1.030	3.406	0,00	Infinito	3.406
Dez	880	3.556	0,00	Infinito	3.556
Redução da oferta hídrica em 60%					
Mês	Área ocupada pelas atividades (ha)	folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)

Jan	669	3.767	0,00	Infinito	3.741
Fev	985	3.451	0,00	Infinito	3.450
Mar	985	3.451	0,00	Infinito	3.450
Abr	985	3.451	0,00	Infinito	3.450
Mai	921	3.515	0,00	Infinito	3.541
Jun	694	3.742	0,00	Infinito	3.741
Jul	694	3.742	0,00	Infinito	3.741
Ago	844	3.592	0,00	Infinito	3.591
Set	844	3.592	0,00	Infinito	3.591
Out	844	3.592	0,00	Infinito	3.591
Nov	844	3.592	0,00	Infinito	3.591
Dez	694	3.742	0,00	Infinito	3.741

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados obtidos podem ser corroborados pelo estudo de Carvalho *et al.* (2000), em que os autores, desenvolveram estudo utilizando programação linear no sentido de maximizar a receita líquida em função da área ocupada. Os autores concluíram que, quando o modelo de PL é aplicado sem restrições de área por cultura, a receita líquida será maior, pois o modelo seleciona apenas as culturas de maior valor agregado. Entretanto, quando se impõe restrições de área, a receita apresenta um declínio acentuado.

4.8.4 Análise de sensibilidade do recurso água para uma redução de 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.

Na Tabela 13 são apresentados os dados referentes à análise de sensibilidade do recurso água para os níveis de redução 20, 40 e 60% na disponibilidade hídrica.

Tabela 13 – Análise de sensibilidade do recurso água com reduções de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica para as atividades desenvolvidas no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025.

Redução de 20% da oferta hídrica					
Mês	Disponibilidade de água (m ³)	Folga (m ³)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	26.956.764	25.606.084	0,00	Infinito	25606084
Fev	24.855.580	23.873.844	0,00	Infinito	23873844
Mar	24.235.172	23.749.136	0,00	Infinito	23749136
Abr	25.791.174	25.291.836	0,00	Infinito	25291836
Mai	29.184.045	28.303.344	0,00	Infinito	28303344
Jun	29.594.658	28.434.708	0,00	Infinito	28434708
Jul	34.363.740	32.596.018	0,00	Infinito	32596018
Ago	29.876.264	27.156.576	0,00	Infinito	27156576

Set	28.117.852	25.172.208	0,00	Infinito	25172208
Out	27.606.194	24.287.012	0,00	Infinito	24287012
Nov	27.740.260	25.004.338	0,00	Infinito	25004338
Dez	27.212.866	24.997.614	0,00	Infinito	24997614

Redução de 40% da oferta hídrica

Mês	Disponibilidade de água (m ³)	Folga (m ³)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	20.217.573	19.252.094	0,00	Infinito	19252094
Fev	18.641.685	17.937.768	0,00	Infinito	17937768
Mar	18.176.379	17.852.994	0,00	Infinito	17852994
Abr	19.343.380	19.011.144	0,00	Infinito	19011144
Mai	21.888.034	21.215.792	0,00	Infinito	21215792
Jun	22.195.993	21.274.730	0,00	Infinito	21274730
Jul	25.772.805	24.338.170	0,00	Infinito	24338170
Ago	22.407.198	20.139.664	0,00	Infinito	20139664
Set	21.088.389	18.600.278	0,00	Infinito	18600278
Out	20.704.646	17.903.458	0,00	Infinito	17903458
Nov	20.805.195	18.545.724	0,00	Infinito	18545724
Dez	20.409.649	18.657.122	0,00	Infinito	18657122

Redução de 60% da oferta hídrica

Mês	Disponibilidade de água (m ³)	Folga (m ³)	Preço sombra (R\$ ha ⁻¹)	Acréscimo Máximo (ha)	Decréscimo Máximo (ha)
Jan	13.478.382	12.898.107	0,00	Infinito	12.898.107
Fev	12.427.790	12.001.695	0,00	Infinito	12.001.695
Mar	12.117.586	11.956.848	0,00	Infinito	11.956.848
Abr	12.895.587	12.730.451	0,00	Infinito	12.730.451
Mai	14.592.022	14.128.239	0,00	Infinito	14.128.239
Jun	14.797.329	14.114.756	0,00	Infinito	14.114.756
Jul	17.181.870	16.080.324	0,00	Infinito	16.080.324
Ago	14.938.132	13.122.753	0,00	Infinito	13.122.753
Set	14.058.926	12.028.349	0,00	Infinito	12.028.349
Out	13.803.097	11.519.902	0,00	Infinito	11.519.902
Nov	13.870.130	12.087.108	0,00	Infinito	12.087.108
Dez	13.606.433	12.316.633	0,00	Infinito	12.316.633

Fonte: Elaborada pela autora.

A análise desses resultados revela um cenário de elevada folga dos recursos hídricos para todos os meses do ano, ainda que em situação de máxima restrição hídrica, contrapondo-se aos resultados obtidos na solução ótima do modelo, que indicam redução da receita líquida obtida a partir de cenários de redução da disponibilidade hídrica. Isso acontece por que o modelo, ao verificar cenários de menor oferta hídrica, ajusta as atividades para um patamar de

menor risco ou menor área, sacrificando a receita para manter a segurança operacional.

5 CONCLUSÃO

A quantificação das reservas hídricas subterrâneas permitiu estimar o volume explotável do aquífero aluvial em $42,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o ano de 2025. Contudo, embora esse volume indique uma disponibilidade hídrica significativa para o PIMN, a definição de um plano ótimo de exploração revela que o aquífero já opera em regime de superexploração. Esse cenário se justifica pelo crescimento exponencial da carcinicultura, atividade que apresenta elevada demanda hídrica, mas que se consolidou como o principal vetor econômico da região.

Do ponto de vista financeiro, a carcinicultura demonstrou alta viabilidade econômica, apresentando uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 22% e recuperação do capital investido (Payback) no terceiro ano de atividade, correspondendo a 96% da receita líquida total anual do perímetro irrigado. Entretanto, essa rentabilidade impõe pressões espaciais e ambientais: em 2024, a área ocupada por viveiros de camarão já excedia em 13,3% o limite recomendado pelo modelo de otimização para a manutenção da sustentabilidade do aquífero.

A análise de sensibilidade evidencia a vulnerabilidade do sistema frente às crises hídricas. A sustentabilidade econômica do PIMN está intrinsecamente ligada à segurança do aquífero, visto que reduções simuladas de 40% na disponibilidade de água resultam em perdas drásticas na receita líquida, com declínios que se aproximam de 50%. Tais dados reforçam a urgência de uma gestão estratégica que harmonize a lucratividade da carcinicultura com os limites físicos de renovação do recurso hídrico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Disponibilidade hídrica subterrânea pela UCGH – Recarga Potencial Explotável (m³/s). Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/maps/70a6d80861844df69e48f60d507d1ea2_1/about. Acesso em: 08 abr. 2024.

ALVES, E.J.C.; RÊGO, J.C.; GALVÃO, C.O.; VIEIRA, J.B.A. Limits and conditions for the exploitation of alluvial aquifers in the Brazilian semi-arid region. **Brazilian Journal of Water Resources**, v.23, n.34, p.8, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318160049>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/PHKtRdLn5f4zNLJjZS99zpm/?format=html&lang=en>. Acesso em 22 maio 2025.

ARAÚJO, A.P.B.; COSTA, R.N.T.; LACERDA, C.F.; GHEYI, H.R. Análise econômica do processo de recuperação de um solo sódico no Perímetro Irrigado Curu-Pentecoste, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 3, p. xxx-xxx, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/586yxDYnRQvk3j3nVSVtrrv/?lang=pt>. Acesso em 20 ago. 2025.

BARTOLINI, F.; BAZZANI, G.M.; GALLERANI, V.; RAGGI, M.; VIAGGI, D. The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models. **Agricultural Systems**, v. 93, p. 90–114, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X06000783?via%3Dihub>. Acesso em 20 ago. 2025.

BOUDERBALA, A. The impact of climate change on groundwater resources in coastal aquifers: case of the alluvial aquifer of Mitidja in Algeria. **Environmental Earth Sciences**, v.697, p.1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8702-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8702-5>. Acesso em: 20 abr. 2025.

BRITO, A. P.; TOMASELLA, J.; WAHNFRIED, I. D.; CANDIDO, L. A.; Monteiro, M. T.; FIGUEIRAS, S. J. F. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29616>. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29616>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CARVALHO, D.F; SOARES, A. A.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado do Gorutuba, utilizando-se a técnica da programação linear. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 203-209, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/NNrhczDKc5fxk69PnrLK9MS/?lang=pt>. Acesso em 03 nov. 2025.

CASTRO, C.N. Sobre a agricultura irrigada no semiárido: uma análise histórica e atual de diferentes opções de política. **Texto para Discussão**, 2018. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/177585>. Acesso em 15 maio 2024.

CASTRO, L.T.; NEVES, M.F.; NAKATANI, J.K. Modelos organizacionais para parcerias público-privadas na irrigação pública no Brasil. **Revista Administração**, v.48, n.02, p.268-280, 2013. <https://doi.org/10.5700/rausp1087> . Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rausp/a/xJgzkzRth7Y9htsDJmH3rd/abstract/?lang=pt>. Acesso 10 nov. 2025.

CAVALCANTE JÚNIOR, R.G.; FREITAS, M.A.V.; SILVA, N.F.; AZEVEDO FILHO, F.R. Sustainable Groundwater Exploitation Aiming at the Reduction of Water Vulnerability in the Brazilian Semi-Arid Region. **Energies**, v. 12, n. 904, p.1-20, 2019.

<https://doi.org/10.3390/en12050904>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/5/904>. Acesso em 20 ago. 2025.

COCK, J.; JIMÉNES, D.; DORADO, H.; OBERTHUR, T. Operations research and machine learning to manage risk and optimize production practices in agriculture: good and bad experience. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.62, p.1-10, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101278>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343523000258?via%3Dihub>. Acesso 14 ago. 2024.

COSTA, R. N. T.; LACERDA, C.F.; SILVA, L.A.C.; ARAÚJO, A.P.B.; ARAÚJO, J.C.; SOUSA, C.H.C. **Indicadores de rentabilidade da recuperação de solos degradados por sais**. In: GHEYI, H.R.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F.; GOMES FILHO, E. 2 ed. Fortaleza, 2016. p. 479 -488.

COZER, Nathieli.; DAL PONT, G.; GUIMARÃES, V. A.; STICA, P. V.; HORODESKY, A.; BIERNASKI, V.; OSTRENSKY, A. Análise comparativa da viabilidade econômica entre a produção integrada e a convencional na criação semi intensiva de camarões *Litopenaeus vannamei* no Brasil. **Revista Internacional de Oceanografia e Aquicultura**, v. 7, n. 4, p. 1-18, 2023. DOI: 10.23880/ijoac-16000287. Disponível em:

<https://medwinpublishers.com/IJOAC/comparative-analysis-of-the-economic-viability-between-integrated-and-conventional-production-in-semi-intensive-shrimp-farming-of-litopenaeus-vannamei-in-brazil.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

DAGHIGHI, A.; NAHVI, A.; KIM, U. Optimal Cultivation Pattern to Increase Revenue and Reduce Water Use: Application of Linear Programming to Arjan Plain in Fars Province.

Agriculture, v. 07, n.73, p.1-11, 2017. <https://doi.org/10.3390/agriculture7090073>.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/7/9/73>. Acesso em 03 jun. 2025.

DANAPOUR, M; FIENEN, M.N; HØJBERG, A.L; JENSEN, K.H; STISEN, S. Multi-Constrained Catchment Scale Optimization of Groundwater Abstraction Using Linear Programming. **Groundwater**. v.59, n.4, p. 503-516. <https://doi.org/10.1111/gwat.13083>.

Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.13083>. Acesso em 25 nov. 2025.

DIFALLAH, W.; BENAHMED, K.; DRAOUI, B.; BOUNAAMA, F. Linear Optimization Model for Efficient Use of Irrigation Water. **International Journal of Agronomy**, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5353648>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2017/5353648>. Acesso em 20 dez. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. World Reference Base for soil resource in World Soil Resource - Report no. 103. Rome: FAO, 2006. 128 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2016. AQUASTAT website. FAO's global information system on water and agriculture.[Online]. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm. Acesso em: 12 dez. 2025.

FERREIRA, Zenaide Rodrigues; VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. Projetos públicos de irrigação: presença institucional, fruticultura e impactos produtivos. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/13010> Acesso em: 27/05/2024.

FILIPPI, C.; MANSINI, R.; STEVANATO, E. Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. **Computers and Operations Research**, v.81, p.26-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054816303033?via%3Dihub>. Acesso em 20 dez. 2025.

Fisher, Irving. The Theory of Interest. Nova York: Macmillan, 1930. Disponível em: https://oll-resources.s3.us-east-2.amazonaws.com/oll3/store/titles/1416/Fisher_0219_EBk_v6.0.pdf. Acesso em: 07 Ago. 2025

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no Semiárido. **Ciência e Cultura**, v.55, n.04, p.38-39,2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400021 Acesso em: 07 jun. 2024.

GHADIMI, S; KETABCHI, H. Possibility of cooperative management in groundwater resources using an evolutionary hydro-economic simulation-optimization model. **Journal of Hydrology**. v.578, p. 1-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124094>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419308297?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago. 2024.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. Introdução à Pesquisa Operacional. 8ª edição. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=-A88a0KxQ0C&oi=fnd&pg=PR1&dq=HILLIER,+F.S.%3B+LIEBERMAN,+G.J.+Introdu%C3%A7%C3%A3o+%C3%A0+Pesquisa+Operacional>. . Acesso em: 07/062024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). Perfil básico municipal: Morada Nova. Fortaleza: IPECE, 2012.

LALEHZARI, R; KERACHIAN, R; Developing a framework for daily common pool groundwater allocation to demands in agricultural regions. **Agricultural Water Management**. v.241, p.1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106278>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377419314805>. Acesso em: 20 abr. 2025.

LINS, G.R.; COSTA, R.N.T.; NUNES, K.G.; SOUSA, A.B.O.; SILVA, A.R.A.; CAMPOS, R.T. Optimization model for water allocation for agricultural activities in alluvial aquifer in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 29, n. 4, p. 1-9, 2025. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n4e278965>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/f35B9TNBRBdKMQYxtqdz8ry/abstract/?lang=pt>. Acesso em 28 de ago de 2025.

MAGALHÃES, J. W. de O.; COSTA, R. N. T.; NUNES, K. G.; SILVEIRA, R. N. C. M.; ALBUQUERQUE, J. A. de. Recursos hídricos subterrâneos em aluvião no semiárido nordestino: estudo de caso no Projeto de Irrigação Morada Nova, CE. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p.1-15, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40161>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/40161>. Acesso em 21 out. 2025.

MANOEL FILHO, J. [Ocorrência das Águas Subterrâneas]. In: FEITOSA, Fernando A. C. et al. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. P.53-74.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3/4, p. 1189-1200, 2017. 10.1007/s00704-016-1840-8 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303889899_Drought_in_Northeast_Brazil-Past_present_and_future/link/575de03808ae414b8e4f4fc7/download. Acesso em 20 dez. 2025.

MARQUES, P.A.A; COELHO, R.D. Estudo da viabilidade econômica da irrigação da pupunheira (*Bactris Gasipaes* H.B.K.) para Ilha Solteira - SP, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 291-297, mar./abr. 2003. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000200017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/x448Lh79w8gm3hQZ4z7gmsz/?lang=pt>. Acesso em 20 jun. 2025.

MATIAS, J. F. N.; ELOY, H. R. F.; CATTER, K. M.; VIDIGAL, R. C. A. B.; SOUZA, R. L. M.; LISBOA, V.; MATIAS, M. L. Análise comparativa da eficiência econômica e competitividade dos cultivos de camarão marinho no sistema semi-intensivo (tradicional) e superintensivo (com reúso de água e uso de bioflocos - BFT) utilizados no Brasil. **Revista S&G**, Niterói, v. 15, n. 2, p. 123-130, 2020. DOI: 10.20985/1980-5160.2020.v15n2.1643. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343985223_Analise_comparativa_da_eficiencia_economica_e_competitividade_dos_cultivos_de_camarao_marinho_no_sistema_semi-intensivo_tradicional_e_superintensivo_com_reuso_de_agua_e_uso_de_bioflocos_-_BFT_utilizad. Acesso em 06 abr. 2025.

MENDES FILHO, O. R.; PEDROZA FILHO, M. X.; FLORES, R. M. V.; BRITO, L. O. Viabilidade econômica na carcinicultura: avaliação de *Penaeus vannamei* em áreas costeiras e interiores sob diferentes níveis de salinidade no Nordeste do Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 22, n. 10, p. 01-22, 2024. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1168783>. Acesso em 14 abr. 2025.

MIRANDA, F. R. et al. Uso de efluentes da carcinicultura na irrigação de *Panicum maximum* cvs. Tanzânia e Mombaça. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 46-52, 2010. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/m3tNPcWn4xvZBJsSwbQqsVw/?lang=pt>. Acesso 13 maio 2024.

LINS, G.R.; COSTA, R.N.T.; NUNES, K.G.; SOUSA A.B.O.; SILVA, A.R.; CAMPOS, R.T. Optimization model for water allocation for agricultural activities in alluvial aquifer in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.29, n.4, p.1-9, 2025. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n4e278965>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/f35B9TNBRBdKMQYxtqdz8ry/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 20 out. 2025.

MONTEIRO, A.L.N.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G. Modelagem de Fluxo e Análise do Potencial Hídrico de Aquífero Aluvial no Semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.3, p.151-163, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p151-163> Disponível em: <https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=4790>. Acesso em 20 out 2024.

MOURA, Idembergue Barroso Macedo de. **Aspectos hidrogeológicos do Aluvião do rio Banabuiú no trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte-CE**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia) –Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MOURA, C.O.; CAMPOS, J.E.G.; SILVA, F.H.F.; JUNQUEIRA, T.P. Estimativa das reservas hídricas do aquífero termal da Falha São Joaquim, Chapada dos Veadeiros, Goiás. **Derbyana**, v.46, n.860, p.1-16, 2025. <https://doi.org/10.69469/derb.v46.860>. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/860>. Acesso em 20 dez. 2025.

NOURI, A; SAGHAFIAN, B; DELAVAR, M; BAZARGAN-LARI, M.R; Agent-Based Modeling for Evaluation of Crop Pattern and Water Management Policies. **Water Resources Management**. v.33 p.3707- 3720, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02327-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02327-3>. Acesso em 20 dez. 2025.

NUNES, K.G.; COSTA, R.N.T.; CAVALCANTE, I.N.; GONDIN, R.S.; LIMA, S.C.R.V.; MATEOS, L. Groundwater resources for agricultural purposes in the Brazilian semi-arid region. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v.26, n.12, p.915-923, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p915-923> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/FKmb6dx5HDs69WpdGgPShMQ/?lang=en>. Acesso em: 30 ago. 2025.

NUNES, L.F.C.V.; MEDEIROS, P.H.A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.17, n.18, p.1-14, 2020. <https://doi.org/10.21168/rega.v17e18> . Disponível em: <https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=5370>. Acesso em: 06 set. 2025.

OLIVEIRA JÚNIOR, M.A.C.; GOMES, E.R.; ROCHA, G.C. Impactos Ambientais (negativos e positivos) da Carcinicultura em Ambientes Costeiros: Avaliação a partir de Análise Bibliométrica. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.7, n.2, 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID23928>. Disponível em: [https://www.google.com/search?q=OLIVEIRA+J%C3%9ANIOR%2C+M.A.C.%3B+GOMES%2C+E.R.%3B+ROCHA%2C+G.C.+Impactos+Ambientais+\(negativos+e+positivos\)+da+Carcinicultura+em+Ambientes+Costeiros](https://www.google.com/search?q=OLIVEIRA+J%C3%9ANIOR%2C+M.A.C.%3B+GOMES%2C+E.R.%3B+ROCHA%2C+G.C.+Impactos+Ambientais+(negativos+e+positivos)+da+Carcinicultura+em+Ambientes+Costeiros). Acesso em 04 Ago.2025.

PAIVA, P. V. V. Análise econômico-social dos principais sistemas de produção no Perímetro Irrigado Morada Nova, Ceará. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PLOTNIKOV, N. A. Ressources en eaux souterraines: classification et méthodes d'évaluation. Paris: Gauthier Villars, 1962. 194 p. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122621/records/6473afb413d110e4e7a939a1>. Acesso em 13 maio 2024.

ROCHA, Itamar de Paiva; FERNANDES, Bruna Regina da Silva (Org.). **Censo da carcinicultura dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí**. Natal: Deza's Editech, 2022. 205 p.

SAEED, F.H.; AL-KHAFI, M.S.; AL-FARAJ, F.A.M. Sensitivity of Irrigation Water Requirement to Climate Change in Arid and Semi-Arid Regions towards Sustainable Management of Water Resources. **Sustainability**, v.13, n.13608, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132413608>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13608>. Acesso em 11 abr. 2025.

SANTOS, M.A.L.; COSTA, R.N.T.; FRIZZONE, J.A.; SANTOS, C.G.; SANTOS, V.R. Modelo de Programação Linear para otimização econômica do Projeto de Irrigação Baixo Acaraú – CE. **Revista Caatinga**, v.22, n.01, p.06-19, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/952>. Acesso em 20 abr. 2025.

SANTOS, M.A.L.; COSTA, R.N.T.; A, J.V.; TEIXEIRA, A.S.; GOMES FILHO, R.R. **Otimização econômica da exploração agrícola para o Distrito de Irrigação Baixo Acaraú - CE, utilizando modelo de programação linear**. Irriga, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 30-45, jan./abr. 2005. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2005v10n1p30-45>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3176>. Acesso em 14 abr. 2025.

SCHEIBER, L.; CENDÓN, D.I.; IVERACH, C.P.; HANKIN, S.I.; VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; KELLY, B.F.J. Hydrochemical apportioning of irrigation groundwater sources in an alluvial aquifer. **Science of the Total Environment**, v.744, p.16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140506>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720340286?via%3Dihub>. Acesso em 20 set. 2025.

SILVEIRA, R.N.C.M.; CAVALCANTE, I.N.; PEIXOTO, F.S. PINHEIRO, A.F.C. Caracterização hidroquímica de aquífero aluvial para uso agrícola. **Northeast Geosciences Journal**, v. 06, n. 02, p. 144-154, 2020. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19362>. Disponível em:

<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/19362>. Acesso em 20 jan. 2025.

SILVEIRA, R.N.C.M.; COSTA, R.N.T.; PEIXOTO, F. S.; SOUSA, H.G.; CAVALCANTE, I.N.; OLIVEIRA, R.M. Reservas hídricas subterrâneas e contribuição à gestão dos recursos hídricos em aluviões no Semiárido. **Geociências**, v. 35, n. 4, p.642-651, 2016. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19362>. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/19362>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SOUSA, J.W.F. Planos de assistência aos desvalidos das secas na região Nordeste do Brasil (1878-1915). *Projeto História*, v. 73. p. 329-356, 2023. <https://doi.org/10.23925/2176-2767.2022v73p329-356>. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/revph/article/view/56355>. Acesso em: 20 mar.2025.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1957. 311p. (Publications in Climatology, vol.X, n.3). Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19576602719>. Acesso em: 29 maio 2024.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2022: águas subterrâneas: tornar visível o invisível**. Paris: UNESCO, 2022. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_por. Acesso em: 26 nov. 2025

VIDAL, Maria de Fátima; XIMENES, Luciano J. F. **Carcinicultura no Nordeste: velhos desafios para geração de emprego e de renda sustentáveis, até quando?** Caderno Setorial ETENE, Banco do Nordeste, ano 1, n. 1, p. 41-45, set. 2016. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1137> Acesso em: 20 out. 2025.

YOUSIF, M.; HUSSEIN, H.M.; ABOTALIB, A.Z. The respective roles of modern and paleo recharge to alluvium aquifers in continental rift basins: A case study from El Qaa plain, Sinai, Egypt. **Science of The Total Environment**, v.739. p.1 -14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720334471>. Acesso em: 20 abr. 2025.

APÊNDICE A – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO INDICADORES DE RENTABILIDADE DA ANÁLISE DE INVESTIMENTO

Tabela 1 – Valores monetários associados aos custos fixos de produção para 1 ha.

Valores associados aos custos fixos (\$)			
Aquisição de Terra	1 ha ⁻¹		50.000
Construção de Viveiros	4 uni	Paredes	50.000
	1 uni	Comporta	10.000
	2 uni	Aeradores	9.000
	1 uni	Quadro de comando	2.000
	2 uni	Cabos de 100 m (3 mm)	900
Perfuração de Poços	1 m	Poço de 30 m	170
	5 uni	Vara de cano (200 mm)	700
	1 uni	Bomba (7 cv)	6.000
	30 m	Cabo (4 mm)	16
	7 uni	Cano	1.400
	1 uni	Chave	300
	1 uni	Caiaque	1.200
Total			131.686,00

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 2 – Valores monetários associados aos custos variáveis de produção para 1 ha.

Valores associados aos custos variáveis (\$)					
		Qtd para um ciclo	Uni	PU*	Valor total
Análise de água		1			120,00
Aquisição de larvas		500	milheiro	14,00	7.000,00
Ração	Tipo 01	4	sacos	200,00	800,00
	Tipo 02	20	sacos	200,00	4.000,00
	Juvenil	16	sacos	180,00	2.880,00
	Tipo 03	120	sacos	150,00	18.000,00
Mão-de-obra		2	pessoas	2.480,00	4.960,00
Energia					1.500,00
Insumos	Probiótico (BM PRÓ)	2	balde (3 kg)	300,00	600,00
	Cloreto de Potássio	2	saco (25 kg)	70,00	140,00
	Lotar	2	saco (25 kg)	65,00	130,00
	Silican	1	saco (25 kg)	260,00	260,00
	Melaço	2	balde (20 L)	80,00	160,00
	Cuin	2	saco (30 kg)	50,00	100,00
Total					40.650,00

*Preço unitário

Fonte: Elaborada pela autora.

APÊNDICE B – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO REQUERIMENTO DE ÁGUA

Tabela 3. Requerimento de água para a cultura do Arroz em dois ciclos de cultivo, no Projeto Irrigado Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet. ⁽¹⁾ (mm)	N.I ⁽²⁾ (mm)	E ⁽³⁾	Lb ⁽⁴⁾ (mm)	m ³ /ha
Fevereiro	157,9	1,1	173,69	101,5	72,19	1,0	72,2	721,9
Março	151,6	1,15	174,34	193		-	xxx	
Abril	137,1	1,2	164,52	168		-	xxx	
Maio	141,4	1,00	141,4	104,1	37,3	1,0	37,3	373
Total	588		653,95	566,6	109,49		109,5	1095
Agosto	195,0	1,1	214,5	10,4	204,1	1,0	204,1	2041
Setembro	219,3	1,15	252,195	8,5	243,695	1,0	243,7	2437
Outubro	238,4	1,2	286,08	4	282,08	1,0	282,1	2821
Novembro	229,8	1,00	229,8	4,5	225,3	1,0	225,3	2253
Total	882,5		982,575	27,4	955,175		955,2	9552

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 4. Requerimento de água para a cultura do Milho no Projeto Irrigado Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet. ⁽¹⁾ (mm)	N.I ⁽²⁾ (mm)	E ⁽³⁾	Lb ⁽⁴⁾ (mm)	m ³ /ha
Fevereiro	157,9	0,7	110,5	101,5	9,0	0,9	10	100
Março	151,6	1,1	166,8	193	xxx	0,9	xxx	
Abril	137,1	0,95	130,2	168		0,9	xxx	
Maio	141,4	0,9	127,3	104,1	23,2	0,9	25,7	257
Total	588		534,8	566,6	32,2		36	358

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5. Requerimento de água para a cultura do Sorgo forrageiro no Projeto Irrigado

Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet. (mm)	N.I (mm)	E	Lb (mm)	m ³ /ha
Fevereiro	157,9	0,2	31,58	101,5	xxx			
Março	151,6	1,0	151,6	193	xxx			
Abril	137,1	0,5	68,55	168	xxx			
Total	446,6		251,73	462,5				

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6. Requerimento de água para a cultura do Capim paulistinha no Projeto Irrigado

Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet (mm)	N.I (mm)	E	Lb (mm)	m ³ /ha
Janeiro	208,6	0,5	104,3	70,8	33,5	0,9	37,2	372
Fevereiro	157,9	0,5	78,95	101,5	xxx	0,9	xxx	xxx
Março	151,6	0,7	106,12	193	xxx	0,9	xxx	xxx
Abril	137,1	0,7	95,97	168	xxx	0,9	xxx	xxx
Maio	141,4	0,7	98,98	104,1	xxx	0,9	xxx	xxx
Junho	140,4	1,1	154,44	63,5	90,9	0,9	101,0	1010
Julho	164,3	1,1	180,73	30,4	150,3	0,9	167,0	1670
Agosto	195,0	1,1	214,5	10,4	204,1	0,9	226,8	2268
Setembro	219,3	1,1	241,23	8,5	232,7	0,9	258,6	2586
Outubro	238,4	1,1	262,24	4	258,2	0,9	286,9	2869
Novembro	229,8	1,1	252,78	4,5	248,3	0,9	275,9	2759
Dezembro	225,4	1,1	247,94	26,1	221,8	0,9	246,5	2465
Total	2209,2		2038	785	1440		1600	16000

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 7. Requerimento de água para a cultura da Pastagem nativa, no Projeto Irrigado Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet (mm)	N.I (mm)	E	Lb (mm)	m ³ /ha
Janeiro	208,6	0,5	104,3	70,8	33,5	0,9	37,2	372
Fevereiro	157,9	0,5	78,95	101,5	xxx	0,9	xxx	xxx
Março	151,6	0,5	75,8	193	xxx	0,9	xxx	xxx
Abril	137,1	1,0	137,1	168	xxx	0,9	xxx	xxx
Maio	141,4	1,0	141,4	104,1	37,3	0,9	41,4	414
Junho	140,4	1,0	140,4	63,5	76,9	0,9	85,4	854
Julho	164,3	1,0	164,3	30,4	133,9	0,9	148,8	1488
Agosto	195,0	1,0	195	10,4	184,6	0,9	205,1	2051
Setembro	219,3	1,0	219,3	8,5	210,8	0,9	234,2	2342
Outubro	238,4	1,0	238,4	4	234,4	0,9	260,4	2604
Novembro	229,8	0,7	160,86	4,5	156,4	0,9	173,7	1737
Dezembro	225,4	0,7	157,78	26,1	131,7	0,9	146,3	1463
Total	2209,2		1814	785	1199		1333	13327

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 8. Requerimento de água para a cultura da Bananeira, no Projeto Irrigado Morada Nova, (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet (mm)	N.I (mm)	E	Lb (mm)	m ³ /ha
Janeiro	208,6	1,0	208,6	70,8	137,8	0,9	153,1	1531
Fevereiro	157,9	1,0	157,9	101,5	56,4	0,9	62,7	627
Março	151,6	1,0	151,6	193	xxx	0,9	xxx	
Abril	137,1	1,0	137,1	168	xxx	0,9	xxx	
Maio	141,4	1,0	141,4	104,1	37,3	0,9	41,4	414
Junho	140,4	1,0	140,4	63,5	76,9	0,9	85,4	854
Julho	164,3	1,0	164,3	30,4	133,9	0,9	148,8	1488
Agosto	195,0	1,0	195	10,4	184,6	0,9	205,1	2051
Setembro	219,3	1,0	219,3	8,5	210,8	0,9	234,2	2342
Outubro	238,4	1,0	238,4	4	234,4	0,9	260,4	2604
Novembro	229,8	1,0	229,8	4,5	225,3	0,9	250,3	2503
Dezembro	225,4	1,0	225,4	26,1	199,3	0,9	221,4	2214
Total	2209,2		2209	785	1497		1663	16630

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 9. Requerimento de água para a cultura do Coqueiro, no Projeto Irrigado Morada Nova (PIMN), 2025.

Meses	ET _o (mm)	K _c	ET _m (mm)	P. efet. (mm)	N.I (mm)	E	L _b (mm)	m ³ /ha
Janeiro	208,6	0,8	166,9	70,8	96,1	0,9	106,8	1068
Fevereiro	157,9	0,8	126,3	101,5	24,8	0,9	27,6	276
Março	151,6	0,8	121,3	193				0
Abril	137,1	0,8	109,7	168				0
Maio	141,4	0,8	113,1	104,1	9,0	0,9	10,0	100
Junho	140,4	0,8	112,3	63,5	48,8	0,9	54,2	542
Julho	164,3	0,8	131,4	30,4	101,0	0,9	112,3	1123
Agosto	195,0	0,8	156,0	10,4	145,6	0,9	161,8	1618
Setembro	219,3	0,8	175,4	8,5	166,9	0,9	185,5	1855
Outubro	238,4	0,8	190,7	4	186,7	0,9	207,5	2075
Novembro	229,8	0,8	183,8	4,5	179,3	0,9	199,3	1993
Dezembro	225,4	0,8	180,3	26,1	154,2	0,9	171,4	1714
Total	2209,2		1767,36		1112,6		1236,2	12362,22

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10. Requerimento de água na Carcinicultura de águas interiores, no Projeto Irrigado Morada Nova (PIMN), 2025.

Mês	Evaporação média (mm)	m ³ /ha
Janeiro	207,7	2077
Fevereiro	149,8	1498
Março	87,7	877
Abril	90,1	901
Maio	112,4	1124
Junho	128,7	1287
Julho	179,6	1796
Agosto	243,8	2438
Setembro	246,7	2467
Outubro	279,3	2793
Novembro	256,9	2569
Dezembro	249,5	2495
Total anual	2232,2	22322

Fonte: Elaborada pela aut

**APÊNDICE C – TABELAS COMPLEMENTARES AO TÓPICO ANÁLISE DE
SESIBILIDADE PARA DIFERENTES NÍVEIS DE REDUÇÃO DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA.**

Tabela 11 - Redução na disponibilidade de água no Projeto de Irrigação Morada Nova (PIMN), 2025

Mês	Disponibilidade de água (m ³)	Reduções na disponibilidade da água (m ³)			
		20%	40%	60%	80%
JAN	33.695.955	26956764	20217573	13478382	6739191
FEV	31.069.475	24855580	18641685	12427790	6213895
MAR	30.293.965	24235172	18176379	12117586	6058793
ABR	32.238.967	25791174	19343380	12895587	6447793
MAI	36.480.056	29184045	21888034	14592022	7296011
JUN	36.993.322	29594658	22195993	14797329	7398664
JUL	42.954.675	34363740	25772805	17181870	8590935
AGO	37.345.330	29876264	22407198	14938132	7469066
SET	35.147.315	28117852	21088389	14058926	7029463
OUT	34.507.743	27606194	20704646	13803097	6901549
NOV	34.675.325	27740260	20805195	13870130	6935065
DEZ	34.016.082	27212866	20409649	13606433	6803216

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 12 – Ocupação das atividades desenvolvidas com redução de 20, 40 e 60% da disponibilidade hídrica

Redução de 20% da oferta hídrica												
Cultura	Ocupação mensal (ha)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		200	200	200	200							
Arroz II								150	150	150	150	
Milho		27	27	27	27							
Pastagem												
Nativa	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Capim												
Paulistinha	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Sorgo		64	64	64								
Banana	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Coco	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Camarão	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554
Total	1065	1356	1356	1356	1292	1065	1065	1215	1215	1215	1215	1065
Redução de 40% da oferta hídrica												
Cultura	Ocupação mensal (ha)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		200	200	200	200							

Arroz II								150	150	150	150	
Milho		27	27	27	27							
Pastagem												
Nativa	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Capim												
Paulistinha	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Sorgo		64	64	64								
Banana	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Coco	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Camarão	369	369	369	369	369	369	369	369	369	369	369	369
Total	880	1171	1171	1171	1107	880	880	1030	1030	1030	1030	880

Redução de 60% da oferta hídrica

Cultura	Ocupação mensal (ha)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arroz I		200	200	200	200							
Arroz II								150	150	150	150	
Milho		27	27	27	27							
Pastagem												
Nativa	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Capim												
Paulistinha	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Sorgo		64	64	64								
Banana	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Coco	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Camarão	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183
Total	694	985	985	985	921	694	694	844	844	844	844	694

Fonte: Elaborada pela autora.

APENDICE D - PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 5

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 0.4330259E+08

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
A2	200.000000	0.000000
A8	150.000000	0.000000
M	27.000000	0.000000
PN	420.000000	0.000000
P	80.000000	0.000000
S	64.000000	0.000000
B	4.000000	0.000000
C	7.000000	0.000000
CAN	739.664795	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
TJAN)	3185.335205	0.000000
TFEV)	2894.335205	0.000000
TMAR)	2894.335205	0.000000
TABR)	2894.335205	0.000000
TMAI)	2985.335205	0.000000
TJUN)	3185.335205	0.000000
TJUL)	3185.335205	0.000000
TAGO)	3035.335205	0.000000
TSET)	3035.335205	0.000000
TOUT)	3035.335205	0.000000
TNOV)	3035.335205	0.000000
TDEZ)	3185.335205	0.000000
AJAN)	31960072.000000	0.000000
AFEV)	29809918.000000	0.000000
AMAR)	29645278.000000	0.000000
AABR)	31572530.000000	0.000000
AMAI)	35390896.000000	0.000000
AJUN)	35594680.000000	0.000000
AJUL)	40853864.000000	0.000000
AAGO)	34173484.000000	0.000000
ASET)	31744140.000000	0.000000
AOUT)	30670570.000000	0.000000
ANOV)	31462952.000000	0.000000
ADEZ)	31338102.000000	0.000000
ATOT)	0.000000	1.212944
A2)	0.000000	1047.826172
A8)	0.000000	-9210.042969
MIL)	0.000000	1248.765991
PN)	0.000000	-15669.907227
P)	0.000000	-17823.107422
SORGO)	0.000000	7918.787109
BAN)	0.000000	-18191.261719
COCO)	0.000000	-12519.416016

NO. ITERATIONS= 5

APENDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O RECURSO TERRA E ÁGUA

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED:

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
A2	2376.000000	INFINITY	INFINITY
A8	2376.000000	INFINITY	INFINITY
M	1683.000000	INFINITY	1248.765991
PN	495.000000	15669.907227	INFINITY
P	1584.000000	17823.107422	INFINITY
S	7920.000000	INFINITY	7918.787109
B	1980.000000	INFINITY	INFINITY
C	2475.000000	INFINITY	INFINITY
CAM	56186.000000	161579.156250	51600.125000

ROW	CURRENT RHS	RIGHTHAND SIDE RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
TJAN	4436.000000	INFINITY	3185.335205
TFEV	4436.000000	INFINITY	2894.335205
THAR	4436.000000	INFINITY	2894.335205
TABR	4436.000000	INFINITY	2894.335205
THAI	4436.000000	INFINITY	2985.335205
TJUN	4436.000000	INFINITY	3185.335205
TJUL	4436.000000	INFINITY	3185.335205
TAGO	4436.000000	INFINITY	3035.335205
TSET	4436.000000	INFINITY	3035.335205
TOUT	4436.000000	INFINITY	3035.335205
TNOV	4436.000000	INFINITY	3035.335205
TDEZ	4436.000000	INFINITY	3185.335205
AJAN	33695956.000000	INFINITY	31960072.000000
AFEV	31069476.000000	INFINITY	29809918.000000
AMAR	30293964.000000	INFINITY	29645278.000000
AABR	32238968.000000	INFINITY	31572530.000000
AHAI	36480056.000000	INFINITY	35390896.000000
AJUN	36993320.000000	INFINITY	35594680.000000
AJUL	42954676.000000	INFINITY	40853864.000000
AAGO	37345328.000000	INFINITY	34173484.000000
ASET	35147316.000000	INFINITY	31744140.000000
AOUT	34507744.000000	INFINITY	30670570.000000
ANOV	34675324.000000	INFINITY	31462952.000000
ADEZ	34016080.000000	INFINITY	31338102.000000
ATOT	42954676.000000	134071400.000000	34262752.000000
A2	200.000000	2964.410645	200.000000
A8	150.000000	3586.971680	150.000000
MIL	27.000000	2916.878418	27.000000
PN	420.000000	2570.927734	420.000000
P	80.000000	2141.422119	80.000000
SORGO	64.000000	2894.397705	64.000000
BAN	4.000000	2060.297852	4.000000
COCO	7.000000	2771.618896	7.000000

**APENDICE F- PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO
LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 20% DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 5

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 0.3288227E+08

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
A2	200.000000	0.000000
A8	150.000000	0.000000
M	27.000000	0.000000
PN	420.000000	0.000000
P	80.000000	0.000000
S	64.000000	0.000000
B	4.000000	0.000000
C	7.000000	0.000000
CAM	554.203552	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
TJAN)	3370.796387	0.000000
TFEV)	3079.796387	0.000000
TMAR)	3079.796387	0.000000
TABR)	3079.796387	0.000000
TMAI)	3170.796387	0.000000
TJUN)	3370.796387	0.000000
TJUL)	3370.796387	0.000000
TAGO)	3220.796387	0.000000
TSET)	3220.796387	0.000000
TOUT)	3220.796387	0.000000
TNOV)	3220.796387	0.000000
TDEZ)	3370.796387	0.000000
AJAN)	25606084.000000	0.000000
AFEV)	23873844.000000	0.000000
AMAR)	23749136.000000	0.000000
AABR)	25291836.000000	0.000000
AMAI)	28303344.000000	0.000000
AJUN)	28434708.000000	0.000000
AJUL)	32596018.000000	0.000000
AAGO)	27156576.000000	0.000000
ASET)	25172208.000000	0.000000
AOUT)	24287012.000000	0.000000
ANOV)	25004338.000000	0.000000
ADEZ)	24997614.000000	0.000000
ATOT)	0.000000	1.212944
A2)	0.000000	1047.826172
A8)	0.000000	-9210.042969
MIL)	0.000000	1248.765991
PN)	0.000000	-15669.907227
P)	0.000000	-17823.107422
SORGO)	0.000000	7918.787109
BAN)	0.000000	-18191.261719
COCO)	0.000000	-12519.416016

NO. ITERATIONS= 5

**APENDICE G – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O
RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 20% DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED:

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
A2	2376.000000	INFINITY	INFINITY
A8	2376.000000	INFINITY	INFINITY
M	1683.000000	INFINITY	1248.765991
PN	495.000000	15669.907227	INFINITY
P	1584.000000	17823.107422	INFINITY
S	7920.000000	INFINITY	7918.787109
B	1980.000000	INFINITY	INFINITY
C	2475.000000	INFINITY	INFINITY
CAM	56186.000000	161579.156250	51600.125000

ROW	CURRENT RHS	RIGHTHAND SIDE RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
TJAN	4436.000000	INFINITY	3370.796387
TFEV	4436.000000	INFINITY	3079.796387
THAR	4436.000000	INFINITY	3079.796387
TABR	4436.000000	INFINITY	3079.796387
THAI	4436.000000	INFINITY	3170.796387
TJUN	4436.000000	INFINITY	3370.796387
TJUL	4436.000000	INFINITY	3370.796387
TAGO	4436.000000	INFINITY	3220.796387
TSET	4436.000000	INFINITY	3220.796387
TOUT	4436.000000	INFINITY	3220.796387
TNOV	4436.000000	INFINITY	3220.796387
TDEZ	4436.000000	INFINITY	3370.796387
AJAN	26956764.000000	INFINITY	25606084.000000
AFEV	24855580.000000	INFINITY	23873844.000000
AMAR	24235172.000000	INFINITY	23749136.000000
AABR	25791174.000000	INFINITY	25291836.000000
AMAI	29184044.000000	INFINITY	28303344.000000
AJUN	29594658.000000	INFINITY	28434708.000000
AJUL	34363740.000000	INFINITY	32596018.000000
AAGO	29876264.000000	INFINITY	27156576.000000
ASET	28117852.000000	INFINITY	25172208.000000
AOUT	27606194.000000	INFINITY	24287012.000000
ANOV	27740260.000000	INFINITY	25004338.000000
ADEZ	27212866.000000	INFINITY	24997614.000000
ATOT	34363740.000000	142662336.000000	25671818.000000
A2	200.000000	3154.362061	200.000000
A8	150.000000	2687.585693	150.000000
MIL	27.000000	3103.783936	27.000000
PH	420.000000	1926.301392	420.000000
P	80.000000	1604.488525	80.000000
SORGO	64.000000	3079.862793	64.000000
BAN	4.000000	1543.705200	4.000000
COCO	7.000000	2076.671875	7.000000

**APENDICE H- PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 40% DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 5

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 0.2246194E+08

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
A2	200.000000	0.000000
A8	150.000000	0.000000
H	27.000000	0.000000
PN	420.000000	0.000000
P	80.000000	0.000000
S	64.000000	0.000000
B	4.000000	0.000000
C	7.000000	0.000000
CAM	368.742279	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
TJAN)	3556.257812	0.000000
TFEV)	3265.257812	0.000000
TMAR)	3265.257812	0.000000
TABR)	3265.257812	0.000000
TMAI)	3356.257812	0.000000
TJUN)	3556.257812	0.000000
TJUL)	3556.257812	0.000000
TAGO)	3406.257812	0.000000
TSET)	3406.257812	0.000000
TOUT)	3406.257812	0.000000
TNOV)	3406.257812	0.000000
TDEZ)	3556.257812	0.000000
AJAN)	19252094.000000	0.000000
AFEV)	17937768.000000	0.000000
AMAR)	17852994.000000	0.000000
AABR)	19011144.000000	0.000000
AMAI)	21215792.000000	0.000000
AJUN)	21274730.000000	0.000000
AJUL)	24338170.000000	0.000000
AAGO)	20139664.000000	0.000000
ASET)	18600278.000000	0.000000
AOUT)	17903458.000000	0.000000
ANOV)	18545724.000000	0.000000
ADEZ)	18657122.000000	0.000000
ATOT)	0.000000	1.212944
A2)	0.000000	1047.826172
A8)	0.000000	-9210.042969
HIL)	0.000000	1248.765991
PN)	0.000000	-15669.907227
P)	0.000000	-17823.107422
SORGO)	0.000000	7918.787109
BAN)	0.000000	-18191.261719
COCO)	0.000000	-12519.416016

NO. ITERATIONS= 5

**APENDICE I- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O
RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 40% DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
A2	2376.000000	INFINITY	INFINITY
A8	2376.000000	INFINITY	INFINITY
M	1683.000000	INFINITY	1248.765991
PN	495.000000	15669.907227	INFINITY
P	1584.000000	17823.107422	INFINITY
S	7920.000000	INFINITY	7918.787109
B	1980.000000	INFINITY	INFINITY
C	2475.000000	INFINITY	INFINITY
CAM	56186.000000	161579.156250	51600.125000

RIGHTHAND SIDE RANGES

ROW	CURRENT RHS	ALLOWABLE RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
TJAN	4436.000000	INFINITY	3556.257812
TFEV	4436.000000	INFINITY	3265.257812
TMAR	4436.000000	INFINITY	3265.257812
TABR	4436.000000	INFINITY	3265.257812
TMAI	4436.000000	INFINITY	3356.257812
TJUN	4436.000000	INFINITY	3556.257812
TJUL	4436.000000	INFINITY	3556.257812
TAGO	4436.000000	INFINITY	3406.257812
TSET	4436.000000	INFINITY	3406.257812
TOUT	4436.000000	INFINITY	3406.257812
TNOV	4436.000000	INFINITY	3406.257812
TDEZ	4436.000000	INFINITY	3556.257812
AJAN	20217572.000000	INFINITY	19252094.000000
AFEV	18641684.000000	INFINITY	17937768.000000
AMAR	18176380.000000	INFINITY	17852994.000000
AABR	19343380.000000	INFINITY	19011144.000000
AMAI	21888034.000000	INFINITY	21215792.000000
AJUN	22195992.000000	INFINITY	21274730.000000
AJUL	25772804.000000	INFINITY	24338170.000000
AAGO	22407198.000000	INFINITY	20139664.000000
ASET	21088388.000000	INFINITY	18600278.000000
AOUT	20704646.000000	INFINITY	17903458.000000
ANOV	20805196.000000	INFINITY	18545724.000000
ADEZ	20409648.000000	INFINITY	18657122.000000
ATOT	25772804.000000	151253280.000000	17080880.000000
A2	200.000000	3344.313721	200.000000
A8	150.000000	1788.199341	150.000000
MIL	27.000000	3290.689941	27.000000
PN	420.000000	1281.674805	420.000000
P	80.000000	1067.554932	80.000000
SORGO	64.000000	3265.328369	64.000000
BAN	4.000000	1027.112427	4.000000
COCO	7.000000	1381.724609	7.000000

**APENDICE J- PLANO ÓTIMO DA SOLUÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO
LINEAR PARA O NÍVEL DE REDUÇÃO DE 60% DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 5

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 0.1204162E+08

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
A2	200.000000	0.000000
A8	150.000000	0.000000
M	27.000000	0.000000
PN	420.000000	0.000000
P	80.000000	0.000000
S	64.000000	0.000000
B	4.000000	0.000000
C	7.000000	0.000000
CAM	183.281082	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
TJAN)	3741.718994	0.000000
TFEV)	3450.718994	0.000000
TMAR)	3450.718994	0.000000
TABR)	3450.718994	0.000000
TMAI)	3541.718994	0.000000
TJUN)	3741.718994	0.000000
TJUL)	3741.718994	0.000000
TAGO)	3591.718994	0.000000
TSET)	3591.718994	0.000000
TOUT)	3591.718994	0.000000
TNOV)	3591.718994	0.000000
TDEZ)	3741.718994	0.000000
AJAN)	12898107.000000	0.000000
AFEV)	12001695.000000	0.000000
AMAR)	11956848.000000	0.000000
AABR)	12730451.000000	0.000000
AMAI)	14128239.000000	0.000000
AJUN)	14114756.000000	0.000000
AJUL)	16080324.000000	0.000000
AAGO)	13122753.000000	0.000000
ASET)	12028349.000000	0.000000
ACUT)	11519902.000000	0.000000
ANOV)	12087108.000000	0.000000
ADEZ)	12316633.000000	0.000000
ATOT)	0.000000	1.212944
A2)	0.000000	1047.826172
A8)	0.000000	-9210.042969
MIL)	0.000000	1248.765991
PN)	0.000000	-15669.907227
P)	0.000000	-17823.107422
SORGO)	0.000000	7918.787109
BAN)	0.000000	-18191.261719
COCO)	0.000000	-12519.416016

NO. ITERATIONS= 5

**APENDICE K- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O
RECURSO TERRA E ÁGUA AO NÍVEL DE REDUÇÃO DE 60% DA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED

VARIABLE	CURRENT COEF	OBJ COEFFICIENT RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
A2	2376.000000	INFINITY	INFINITY
A8	2376.000000	INFINITY	INFINITY
M	1683.000000	INFINITY	1248.765991
PN	495.000000	15669.907227	INFINITY
P	1584.000000	17823.107422	INFINITY
S	7920.000000	INFINITY	7918.787109
B	1980.000000	INFINITY	INFINITY
C	2475.000000	INFINITY	INFINITY
CAN	56186.000000	161579.156250	51600.125000

ROW	CURRENT RHS	RIGHTHAND SIDE RANGES	
		ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
TJAN	4436.000000	INFINITY	3741.718994
TFEV	4436.000000	INFINITY	3450.718994
TMAR	4436.000000	INFINITY	3450.718994
TABR	4436.000000	INFINITY	3450.718994
TMAI	4436.000000	INFINITY	3541.718994
TJUN	4436.000000	INFINITY	3741.718994
TJUL	4436.000000	INFINITY	3741.718994
TAGO	4436.000000	INFINITY	3591.718994
TSET	4436.000000	INFINITY	3591.718994
TOUT	4436.000000	INFINITY	3591.718994
TNOV	4436.000000	INFINITY	3591.718994
TDEZ	4436.000000	INFINITY	3741.718994
AJAN	13478382.000000	INFINITY	12898107.000000
AFEV	12427790.000000	INFINITY	12001695.000000
AMAR	12117586.000000	INFINITY	11956848.000000
AABR	12895587.000000	INFINITY	12730451.000000
AMAI	14592022.000000	INFINITY	14128239.000000
AJUN	14797329.000000	INFINITY	14114756.000000
AJUL	17181870.000000	INFINITY	16080324.000000
AAGO	14938132.000000	INFINITY	13122753.000000
ASET	14058926.000000	INFINITY	12028349.000000
AOUT	13803097.000000	INFINITY	11519902.000000
ANOV	13870130.000000	INFINITY	12087108.000000
ADEZ	13606433.000000	INFINITY	12316633.000000
ATOT	17181870.000000	159844208.000000	8489947.000000
A2	200.000000	3534.265137	200.000000
A8	150.000000	888.813477	150.000000

MIL	27.000000	3477.595703	27.000000
PN	420.000000	637.048584	420.000000
P	80.000000	530.621643	80.000000
SORGO	64.000000	3450.793457	64.000000
BAN	4.000000	510.519928	4.000000
COCO	7.000000	686.777710	7.000000