



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL**

FRANCISCO DAS CHAGAS SOARES

**ADEQUAÇÃO DA SUPERFÍCIE FREÁTICA À TOPOGRAFIA
EM FORMAÇÕES DUNAS
ESTUDO DE CASO PECÉM - CEARÁ**

**FORTALEZA
DEZEMBRO 2021**

FRANCISCO DAS CHAGAS SOARES

**ADEQUAÇÃO DA SUPERFÍCIE FREÁTICA À TOPOGRAFIA
EM FORMAÇÕES DUNAS
ESTUDO DE CASO PECÉM - CEARÁ**

Exame de qualificação da Dissertação de Mestrado apresentado ao curso de Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Hidrologia.

Orientador: Prof. Dr. Mariano da Franca de Alencar Neto.

**FORTALEZA
DEZEMBRO 2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S676a Soares, Francisco das Chagas.
ADEQUAÇÃO DA SUPERFÍCIE FREÁTICA À TOPOGRAFIA EM FORMAÇÃO DUNAS : ESTUDO DE CASO PECÉM - CEARÁ / Francisco das Chagas Soares. - 2022.
83 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Mariano da Franca Alencar Neto.
1. Água Subterrânea. 2. Superfície Freática. 3. Formações Dunas. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.011115/2021-66

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

FRANCISCO DAS CHAGAS SOARES

ADEQUAÇÃO DA SUPERFÍCIE FREÁTICA À TOPOGRAFIA EM FORMAÇÕES DUNASESTUDO DE CASO PECÉM - CEARÁ

*Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.
Área de concentração: Hidrologia.*

Aprovada em: 23/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Mariano da Franca Alencar Neto, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 27/12/2021, às 11:42, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Sergio dos Santos, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 29/12/2021, às 07:45, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Erick Rodrigues da Silva, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/12/2021, às 10:52, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3291655** e o código CRC **4833A31A**.

A Deus e Nossa Senhora.
A São Francisco de Assis – Canindé

AGRADECIMENTOS

*Agradeço a minha companheira **Maria Nilce da Cruz Soares** pela incondicional dedicação.*

Agradeço a todos colegas professores, servidores e colaboradores da antiga Escola Industrial, Escola Técnica, CEFET e atual Instituto Federal, sobretudo aos do Departamento de Construção Civil, pelo incentivo e apoio.

Dedico esse trabalho a meus filhos Soares Junior e Thiago, e em especial, ao meu neto Lucas.

RESUMO

Comumente, no meio de profissionais e estudiosos de águas subterrâneas, adota-se que no âmbito de aquíferos livres regionais que a superfície freática acompanha moderadamente o relevo topográfico. Entretanto, o estudo e aprofundamento desse fenômeno ainda é incipiente determinando um campo aberto a teorias e teses. A compreensão da dinâmica do escoamento em meios porosos em aquíferos sedimentares possui importância estratégica para o estado do Ceará pois determina importantes mananciais hídricos de apoio ao abastecimento doméstico, comercial e industrial, sobretudo nas bacias sedimentares do estado e em seu litoral, possibilitando a determinação precisa das reservas existentes para uso e preservação, bem como a compreensão dos ciclos de renovação destas. Neste sentido, este trabalho aborda o impacto da topografia na formação da superfície freática em regiões de Dunas de grande ocorrência no litoral cearense, tomando como estudo de caso campo de dunas no Pécem-Ceará. Foi aplicado índice de influência da topografia sugerido por Haitjema e Michell (2005) a modelos conceituais já existentes da área, os respectivos parâmetros hidrogeológicos, em especial a Recarga que foi aplicada na média anual e também para a média histórica de cada mês do ano. Os resultados apontam para uma variação de status da influência do relevo na formação da superfície freática sobretudo devido a sazonalidade do regime de chuvas, apresentando que apenas nos meses de maior pluviometria (março e abril) há indicadores da influência da topografia no formato da superfície freática.

Palavras-chave: Água subterrânea. Superfície freática. Formação Dunas.

ABSTRACT

Groundwater professionals and scholars have adopted regional aquifers that the water table moderately follows the topographic relief. However, the study and deepening of this phenomenon is still incipient, determining a field open to theories and theses. Understanding the dynamics of the flow in porous media in sedimentary aquifers is of strategic importance for the state of Ceará, as it determines important water sources to support domestic, commercial and industrial supply. In this sense, this work addresses the impact of topography on the formation of the water table in dune regions of great occurrence on the coast of Ceará, taking as study the field of dunes in Pécem-Ceará. The topography influence index suggested by Haitjema and Michell (2005) was applied to existing conceptual models of the area, the respective hydrogeological parameters, in particular the recharge which was applied to the annual average and also to the historical average of each month of the year. The results indicates the change in the status of the influence of the relief on the formation of the water table, mainly due to the seasonality of the rainfall regime, showing that only in the months of higher rainfall (March and April) are there indicators of the influence of topography on the shape of the water table.

Keywords: Subterranean water. Water table. Dune formation.

LISTA DE SÍMBOLOS

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ESRI – Environmental Systems Research Institute, Empresa americana programas e soluções geoespaciais.

FUNCEME –Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDACE – Instituto do Desenvolvimento Agrário do Ceará

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

MDT – Modelo Digital de Terreno

MNE – Modelo Numérico de Elevação

MODFLOW – Software para modelos de simulação do fluxo da água subterrânea

RMF – Região Metropolitana da Fortaleza

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (Missão Topográfica de Radar Embarcado)

USGS – United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do experimento de Darcy, adaptado de Bear (1979).....	21
Figura 2 – Volume de controle, adaptado de Bear (1979).....	25
Figura 3 – Perfil lençol freático e relevo King (1899) apud Fetter Jr. (2004b).	29
Figura 4 – Linhas de fluxo a partir disso linhas de carga hidráulica King (1899) apud Fetter Jr. (2004b).	29
Figura 5 – Rede de fluxo por Pennink (1905) apud De VRIES (2004).....	30
Figura 6 – Modelo analítico de recarga baseado em Dupuit-Forcheimer.	31
Figura 7 – Simulação de fluxo usando condições de contorno especificadas para recarga.	36
Figura 8 – Simulação de fluxo usando condições de contorno especificadas pela carga.	36
Figura 9 – Acúmulo de água subterrânea devido à recarga.	38
Figura 10 – Alteração da recarga e a influência da Topografia na superfície freática.	41
Figura 11 – Fontes de águas subterrâneas no Ceará.....	47
Figura 12 - Localização da área de estudo Fonte: Azevedo (2020).	48
Figura 13 - Contexto litológico da área de estudo (Azevedo 2020)	50
Figura 14 - Modelo digital de elevação extraído de carta ortofoto retificada.	51
Figura 15 – Mapa planialtimétrico da região do Pecém.....	52
Figura 16 –Destaque Pluviometria Quadra Chuvosa (médias de 1977 a 2018)	54
Figura 17 - Distribuição espacial dos poços monitorados	55
Figura 18 – Modelo da superfície freática calibrada	56
Figura 19 – Mapa de fluxo.....	57
Figura 20 – Campos de dunas estudados.....	59
Figura 21 – Modelo do Relevo e da Superfície Freática – delimitação dos campos dunares.....	62

Figura 22 – Vista tridimensional modelos sobrepostos do cristalino, relevo e superfície freática – vista nordeste e norte.	63
<i>Figura 23 – Superfície Freática com Perfis Centrais</i>	64
Figura 24 – Mapas Sobrepostos da superfície freática, topografia e perfis traçados.....	65
Figura 25 – Perfil AA', Topografia e superfície freática.....	67
Figura 26 – Perfil BB', Topografia e superfície freática.....	67
Figura 27 – Perfil BB', Topografia e superfície freática.....	67
Figura 28 – Espelhos d'água intermitentes.....	71
Figura 29 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga anual.	72
Figura 30 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga mensal (abril).	72
Figura 31 – Perfil DD', Topografia e superfície freática	73
Figura 32 – Perfil EE', Topografia e superfície freática.....	73
Figura 33 – Perfil FF', Topografia e superfície freática	73
Figura 34 – Perfil EE', superfície teórica devido a recarga anual.	76
Figura 35 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga mensal (abril).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precipitações médias (1977-2018).....	53
Tabela 2 - Síntese dos poços monitorados pela COGERH (Azevedo 2020) ..	54
Tabela 3 – Médias histórica pluviometria postos e fator de correção mensal.	66
Tabela 4 – índice de influência da Topografia Campo de Dunas Noroeste....	68
Tabela 5 – Valores Perfil A do índice de influência topográfica mensal	68
Tabela 6 – Valores Perfil B do índice de influência topográfica mensal	69
Tabela 7 – Valores Perfil C do índice de influência topográfica mensal	69
Tabela 8 – índice de influência da Topografia Campo de Dunas Sudeste.	74
Tabela 9 – Valores Perfil D do índice de influência topográfica mensal	75
Tabela 10 – Valores Perfil E do índice de influência topográfica mensal	75
Tabela 11 – Valores Perfil F do índice de influência topográfica mensal.....	76
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros calculados para os índices de influência da topografia.....	78

Sumário

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1. Introdução e Justificativa	15
1.1. Objetivos	19
2. Referencial Teórico	20
2.1. Hidrogeologia e escoamento em meio poroso	20
2.1.1. Condutividade Hidráulica	20
2.1.2. Transmissividade	23
2.1.3. Porosidade Total e Efetiva	23
2.1.4. Equação governante em meio poroso	24
2.1.5. Condições de contorno	27
2.2. Superfície Topográfica e Superfície Freática	28
2.2.1. Rede de fluxo (cargas e fluxo) e superfície freática	28
2.2.2. Modelo de Recarga - Hipóteses de Dupuit-Forchheimer	30
2.2.3. Topografia, Recarga, Condutividade Hidráulica Superfície Freática	33
2.3. Software ModFlow	43
3. Área de Estudo	46
4. Metodologia	58

5.	Resultados e discussão	62
5.1.	Sobreposição do relevo e da Superfície freática.	62
5.2.	Locação dos Perfis.....	63
5.3.	Pluviometrias anual e mensal, fatores de correção	65
5.4.	Primeiro campo de Dunas (Campo Noroeste)	66
5.5.	Segundo campo de Dunas (Campo Sudeste).....	72
5.6.	Parâmetros para os Índices de HAITJEMA, H.M., MITCHELL.....	78
6.	Conclusão	79
	Referências Bibliográficas	81

“Muitas vezes acredita-se que o lençol freático em aquíferos livres seja uma réplica moderada da topografia superficial ou do solo subsuperficial. No entanto, essa suposição não foi amplamente testada e, em alguns casos, se mostrou errônea.”

(HAITJEMA e MITCHELL, 2005)

1. Introdução e Justificativa

Aquíferos costeiros desempenham importante papel para o abastecimento de zonas litorâneas, seja como reserva estratégica para períodos de estiagem ou mesmo como principal manancial de abastecimento para a comunidade local. Destaca-se ainda sua importância na viabilização de empreendimentos turísticos como hotéis e resorts, normalmente distantes dos aglomerados urbanos com infraestrutura de água disponível.

Entender a dinâmica dos aquíferos costeiros permite indicar com sucesso os pontos de extração levando-se em conta critérios de preservação ambiental. Desta forma, a locação de um ponto de extração de água é determinada pelo equilíbrio entre preservação ambiental e otimização do volume retirado, exigindo da escolha do local a ser perfurado métodos de levantamento prévios que potencializem a sustentabilidade ambiental do ponto de extração.

Índices, sobretudo topográficos, formulados a partir de dados computacionais e Modelos Numéricos de Elevação e Modelos Digitais de Terreno (MNE - MDT) têm adquirido importância estratégica na simulação de processos hidrológicos, erosivos e de transporte de poluentes. Zonas

superficiais de grande umidade em uma dada bacia hidrográfica podem ser previstas espacialmente por meio desses índices, uma vez que estes levam em consideração efeitos de orientação de drenagem superficial e declividade do terreno. Outra aplicação é a identificação da formação de canais preferenciais de escoamento e comportamento de possíveis frentes de inundação (MINELLA E MERTEN, 2012).

Nesse contexto, a topografia se firma como importante elemento a ser estudado já que as características do relevo condicionam os fluxos superficiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes) (MOORE et al., 1991). O estudo da influência do relevo em vários fenômenos hidrológicos pode ser direcionado a partir de várias correlações entre parâmetros na forma de índices baseados, sobretudo, na geomorfometria da região estudada.

Entretanto, o impacto da topografia e do consequente processo de escoamento e acúmulo superficial das águas pluviais assumem caráter relativo no estudo das águas subterrâneas – em destaque no estudo dos aquíferos livres. O estudo da topografia e sua influência na hidrodinâmica dos aquíferos livres tende a ser importante elemento síntese de fatores e parâmetros comumente estudados como condutividade hidráulica, infiltração inicial, transmissividade, homogeneidade, isotropia e, sobretudo, Recarga na determinação da superfície freática na região – estabelecendo uma abordagem estratégica para identificação de características do fluxo subterrâneo (subsolo) a partir de elementos visíveis diretamente (superfície).

De modo geral, costuma-se adotar que os aquíferos livres em meio sedimentar têm por característica o acompanhamento da topografia de maneira atenuada, assim morros apresentam aumento da carga hidráulica enquanto vales rebaixamento desta. Para evidenciar essa influência, muitas vezes assumida de forma subjetiva, Haitjema e Mitchell, 2005 propõe um índice quantitativo e geométrico conceitual embasado em teorias e simplificações largamente aceitas e aplicadas no estudo e caracterização do fluxo subterrâneo em aquíferos livres.

Entretanto, fortemente influenciado pela ação da gravidade e pela consequente movimentação da água subterrânea, recarga e pelo meio poroso esse fenômeno é de difícil caracterização quantitativa e pouco estudado. A taxa de elevação ou rebaixamento da carga hidráulica da superfície freática é função de inúmeros fatores, que vai desde a geomorfologia da camada de sedimentos que acolhe o aquífero, passando pela porosidade efetiva e condutividade hidráulica do mesmo e pelas características topográficas da região.

O litoral do Nordeste, em especial o Estado do Ceará, possui uma grande extensão de sedimentos dunas em toda sua orla.

Essas formações se caracterizam por fácil determinação de sua granulometria e porosidade além de estarem dispostas em base cristalina – característica da interação continente / oceano na região.

Pelas características descritas, as formações dunas no litoral cearense pode ter a topografia como elemento determinante para a variação da carga hidráulica na região, considerando inclusive a tendência natural (gravitacional) da água subterrânea em se movimentar em direção ao oceano – estabelecendo aí, uma zona de transição envolvendo intrusões salinas ao longo da costa.

A zona costeira caracterizada por depósitos dunas constitui, portanto, um importante ambiente para aplicação e/ou desenvolvimento de índices ligados a topografia que apontem para a variação do nível da carga hidráulica na região, favorecendo com isso a exploração e identificação de áreas estratégicas para captação de água doce e preservação ambiental.

Uma vez desenvolvido e aplicado corretamente, um índice de inter-relação entre a água subterrânea e topografia, portanto, relativo às cargas hidráulicas do aquífero costeiro, servirá de balizador para identificação de interações das águas subterrâneas com águas superficiais (sobretudo estuários, lagoas e lagunas), identificação de zonas de captação de água considerando as taxas de bombeamento consumo energético envolvido, bem como a identificação de zonas promissoras de recargas essenciais para

preservação do aquífero. Estabelecendo uma importante contribuição quantitativa para a caracterização hidrológica da área em estudo.

Em um cenário de escassez intenso e prolongado, essa ferramenta pode representar importante avanço na direção do convívio sustentável com os períodos de estiagem e na otimização consequente dos recursos hídricos disponíveis – tendo, portanto, grande impacto econômico e social.

A região costeira escolhida, próxima ao Pecém, se coloca como um importante recorte do litoral cearense, estabelecendo um bom exemplo das feições existentes envolvendo os campos de dunas móveis, paleodunas e formação barreiras, com características hidrogeológicas relativamente conhecidas, limites bem definidos por riachos permanentes e baterias de poços (localizados na região de dunas) que possuem série histórica do acompanhamento do nível estático.

Importante ressaltar a existência de um modelo de calibrado a partir da recarga, condutividade hidráulica e nível potenciométrico observado em poços na região, gerando-se as superfícies freáticas calculadas a partir de estudo de balanço hidrológico na região. (AZEVEDO, 2020)

Para a identificação da influência da topografia na superfície freática será usado um modelo calibrado da área na região do Pecém que será submetido à geometria da superfície topográfica, variando em especial a Recarga na região para identificação do impacto da topografia na superfície freática, no formato do índice proposto por Haitjema e Mitchell em 2005 para explicitar quantitativamente a influência da topografia na superfície freática na região.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Correlacionar Índice de Influência Topográfico a parâmetros hidrogeológicos com à variação da carga hidráulica em aquíferos dunas na zona costeira do Pecém – Ceará para identificar a influência da topografia no nível freático na região.

Objetivos Específicos

- Reunir o modelo topográfico e de fluxo subterrâneo da área
- Definir Índice de Influência Topográfico
- Verificar a influência sazonal dentro do ciclo hidrológico anual na interação topografia e superfície freática.

2. Referencial Teórico

Aquífero é um meio geológico saturado, capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos naturais (FREEZE e CHERRY, 1979).

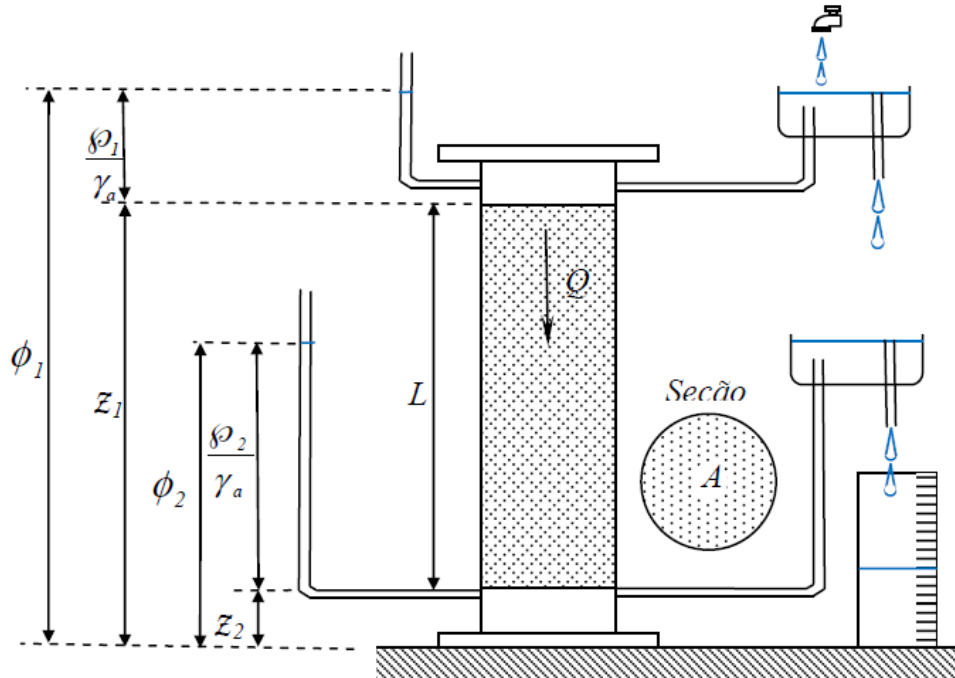
2.1. Hidrogeologia e escoamento em meio poroso

2.1.1. Condutividade Hidráulica

Uma das grandezas mais importantes para caracterização de um aquífero poroso é a condutividade hidráulica do meio e esta pode ser determinada a partir da equação de Darcy, estabelecida em 1856. Darcy, ao avaliar as condições do sistema de abastecimento de água da cidade de Dijon na França, fez vários experimentos de fluxo em colunas de areia que serviam de filtros para purificação da água. O objetivo era identificar o volume e vazões ideais de abastecimento.

Assim o experimento de Darcy pode ser ilustrado como na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração do experimento de Darcy, adaptado de Bear (1979).



Darcy observou que a vazão que percola a coluna de material poroso é proporcional à área de da seção da coluna, à diferença da carga hidráulica e inversamente proporcional ao comprimento L da coluna.

$$Q \propto A \frac{\Delta\phi}{L}$$

Introduzindo uma constante K e considerando que o valor da variação $\Delta\phi$ é negativo devido ao fluxo de dá da maior carga para menor, temos:

$$Q = -KA \frac{\Delta\phi}{L}$$

Onde K é considerando uma constante que diz respeito a interação do fluido que percola e o meio poroso percolado – um dos mais importantes parâmetros do fluxo subterrâneo.

Considerando o limite da equação anterior quando o valor de L tende a zero e ainda considerando a normalização da vazão pela área (Q/A) definida como sendo a velocidade de Darcy q , teremos:

$$q = -K \frac{d\phi}{dx}$$

Observe que q é dado $[LT^{-1}]$.

Considerando ainda como sendo o gradiente hidráulico igual ao negativo do gradiente matemático da função de carga hidráulica pelo espaço $i = -\frac{d\phi}{dx}$; teremos:

$$q = Ki$$

Que representa uma outra forma de escrever a equação de Darcy apresentada anteriormente.

Observa-se que a equação de Darcy foi definida em termos unidimensionais, caso se considere o meio tridimensional a equação anterior pode ser expandida para:

$$\vec{q} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

$$\vec{q} = -\bar{K} \nabla \phi$$

Onde $\bar{K}$ representa um tensor de condutividades hidráulicas, avaliado nas direções preferenciais de escoamento.

Quando o meio é isotrópico (mesmas características em todas as direções) e homogêneo (quando em todos os pontos do meio as características são as mesmas – não varia com a posição analisada), considerando $K = K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$ a equação pode ser escrita:

$$\vec{q} = -K\nabla\phi$$

2.1.2. Transmissividade

A transmissividade pode ser definida como sendo a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada em aquíferos confinados. (FEITOSA; FILHO, 1997):

$$T = Kh$$

Onde h é a espessura saturada do aquífero, observe que T é dado em termos dimensionais em $[L^2T^{-1}]$.

A transmissividade é uma importante característica do aquífero pois determina sua capacidade de transmitir volumes de água uma vez que correlaciona duas grandezas que impactam o volume transmitido – a condutividade hidráulica e a espessura de escoamento. Observa-se que, em termos matemáticos, a transmissividade aparece com frequência nas diversas fórmulas e equações referentes a dinâmica de escoamento em poços tubulares – sendo elemento comum nos modelos de avaliação de características de poços e do próprio aquífero nos diversos testes de bombeamento.

2.1.3. Porosidade Total e Efetiva

Porosidade total é descrita como sendo a razão entre volume de vazios e o volume total de uma dada amostra de solo.

$$\eta = \frac{V_v}{V_T}$$

Já a porosidade efetiva diz respeito a capacidade do meio de transmitir a água. Desta maneira se refere ao volume de vazios interconectado (portanto que favorece o transporte de água) e o volume total da amostra:

$$\eta_e = \frac{V_i}{V_T}$$

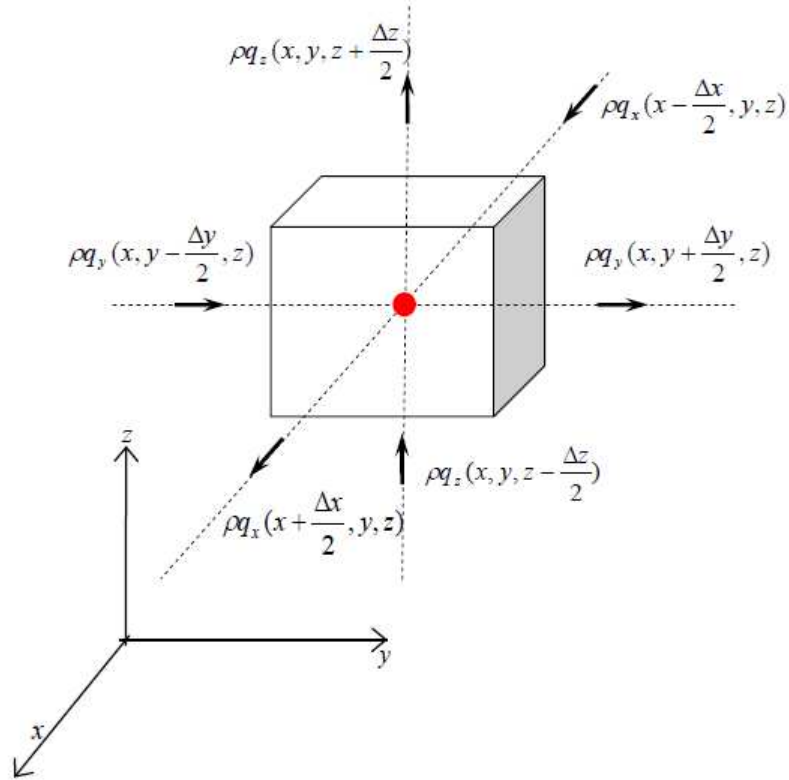
Observa-se que $\eta > \eta_e$.

Apesar de fácil conceito a determinação da porosidade efetiva exige alguns condicionamentos. O ensaio de porosidade efetiva consiste basicamente de após saturar uma amostra de solo, mede-se o volume de água que escoar da amostra sob ação da gravidade, caracterizando a água livre em transporte – a normalização do ensaio, sua montagem e medição estabelecem cuidados redobrados para aquisição de dados consistentes com as amostras colhidas.

2.1.4. Equação governante em meio poroso

Considerando um volume de controle infinitesimal no meio poroso saturado (Figura 2) :

Figura 2 – Volume de controle, adaptado de Bear (1979).



Segundo Pontes (2010), como convenção temos que o fluxo de massa que entra no volume de controle como positivo e o que sai negativo tem-se que o balanço de massa será representado pela equação: Quantidade que entra – quantidade que sai + quantidade gerada = quantidade acumulada.

$$\begin{aligned}
 & \rho[q_x(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z) - q_x(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z)]\Delta y\Delta z\Delta t + \\
 & + \rho[q_y(x, y - \frac{\Delta y}{2}, z) - q_y(x, y + \frac{\Delta y}{2}, z)]\Delta x\Delta z\Delta t + \\
 & + \rho[q_z(x, y, z - \frac{\Delta z}{2}) - q_z(x, y, z + \frac{\Delta z}{2})]\Delta x\Delta y\Delta t + G\Delta x\Delta y\Delta z\Delta t = \\
 & = [\varpi(x, y, z, t + \Delta t) - \varpi(x, y, z, t)]\Delta x\Delta y\Delta z
 \end{aligned}$$

Onde $G [ML^{-3}T^{-1}]$ representa certa grandeza gerada dentro do volume de controle por unidade de volume por unidade de tempo, enquanto $\varpi [ML^{-3}]$ representa a quantidade da grandeza que acumulou dentro do volume de

controle por unidade de volume. Dividindo a equação anterior por $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$, tendendo os deltas a zero e considerando que q e ϖ são funções contínuas então:

$$-\left(\frac{\partial \rho q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho q_z}{\partial z}\right) + G = \frac{\partial \varpi}{\partial t}$$

Considerando o fluido incompressível, ou seja, com densidade constante, e considerando a Lei de Darcy:

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)\right] + G = \frac{\partial \varpi}{\partial t}$$

Considerando ainda:

$$w = \rho n \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \rho \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

para

n – Porosidade efetiva (Volume de vazios / volume da amostra de solo)

S_s – Armazenamento específico.

Admitindo $W = G/\rho$:

Tem-se

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)\right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Equação geral que rege o escoamento em meio poroso para fluido incompressível e segundo as direções preferenciais de escoamento.

2.1.5. Condições de contorno

Ainda segundo Pontes (2010) a resolução numérica da equação geral do fluxo exige a determinação de condições de contorno da área estudada tendo em vista que a região de estudada.

As condições de contorno podem ainda ser do tipo físico ou hidráulico. O contorno físico caracteriza-se por fatores que influenciam o escoamento como: rochas impermeáveis, falhas geológicas e corpos d'água superficiais (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2008) no contorno hidráulico, consideram-se as condições de escoamento. Os mais usuais são divisores de água e linhas de corrente (ou linha de fluxo). Matematicamente, o contorno hidráulico pode ser classificado nas seguintes condições:

- Condição de Dirichlet – Caracteriza-se pela especificação da carga hidráulica, pode ser interpretado como a carga de um rio ou oceano que permanece constante ao longo da simulação em determinados pontos.
- Condição de Neumann – Nesse caso o fluxo q é conhecido podendo ser nulo ou não. Pode ser interpretado como um contorno impermeável como rocha aflorante.
- Condição de Robin – Representa uma condição de contorno que é uma combinação linear entre a condição de Dirichlet e a condição de Neumann, ocorrendo em situações semipermeáveis. Pode ser interpretado como uma camada semipermeável das margens de uma lagoa ou mesmo camada semi-cofinante/semi-drenante.

2.2. Superfície Topográfica e Superfície Freática

A influência da topografia na superfície freática de aquíferos livres tem sido pouco estudada e carece de critérios e índices que comprovem ou que permitam identificar em que condições há essa influência. Notadamente temos que a superfície freática é influenciada pelos parâmetros hidrológicos, recarga e condições de contorno. A relação entre esses parâmetros e condições determinam indicadores a serem explorados.

Para melhor caracterizar o fenômeno é importante os conceitos de rede de fluxo (carga e fluxo) como principal condicionador da superfície freática em aquíferos livres, além dos fatores e índices que relacionam a teoria do escoamento em meio poroso com a influência da topografia.

2.2.1. Rede de fluxo (cargas e fluxo) e superfície freática

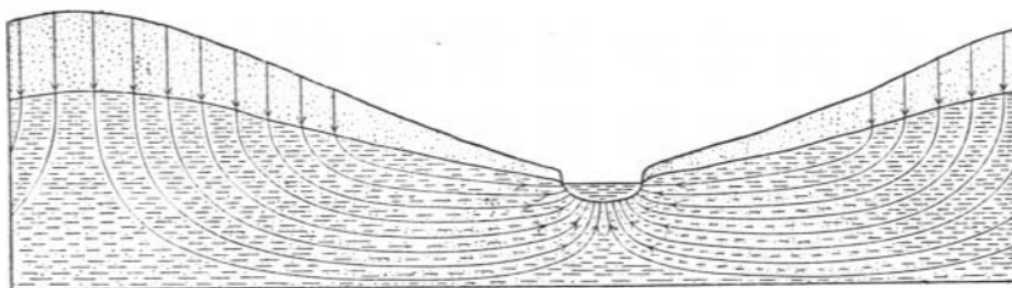
King (1899) foi o primeiro a observar que a superfície freática em áreas úmidas tende a acompanhar a superfície topográfica da região.

“ [...] as linhas de contorno do nível da água subterrânea mostra que essa superfície apresenta características de montes e vales e acompanha aproximadamente as formas do relevo acima. A água é baixa onde a superfície do solo é baixa e alta onde a superfície do solo é alta.”

King (1899) apud Fetter Jr. (2004b).

As isopotenciais mostram que a superfície freática apresenta elevações e vales aproximadamente compatível com as formas da superfície acima desta, a água baixa onde a superfície topográfica é baixa e sobe onde a superfície topográfica sobe (KING, 1899 apud Fetter Jr, 2004b), Figura 3.

Figura 3 – Perfil lençol freático e relevo King (1899) apud Fetter Jr. (2004b).



Com a interpretação de King (1899), foi possível desenhar mapas de fluxo com base no relevo topográfico, indicando grande potencialidade da descoberta no sentido de identificação de zonas de captura e recarga mais promissoras.

Outra importante contribuição de King foi sugerir um campo de fluxo a partir das isolinhas de carga hidráulica (Figura 4).

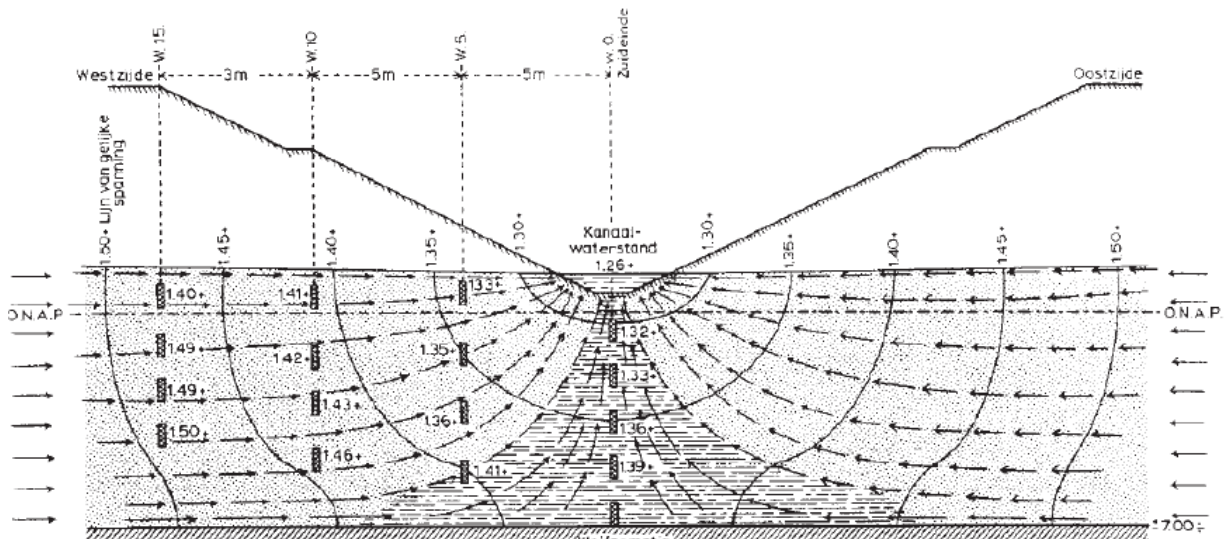
Figura 4 – Linhas de fluxo a partir disso linhas de carga hidráulica King (1899) apud Fetter Jr. (2004b).



O holandês Johan Pennink (1905), seguindo o sugerido por King propõe uma rede de fluxo com base nas cargas observadas. (De VRIES, 2004).
(

Figura 5).

Figura 5 – Rede de fluxo por Pennink (1905) apud De VRIES (2004).



2.2.2. Modelo de Recarga - Hipóteses de Dupuit-Forchheimer

Assumindo as hipóteses de Dupuit-Forchheimer e adotando o conceito de potencial de descarga (Strack, 1989).

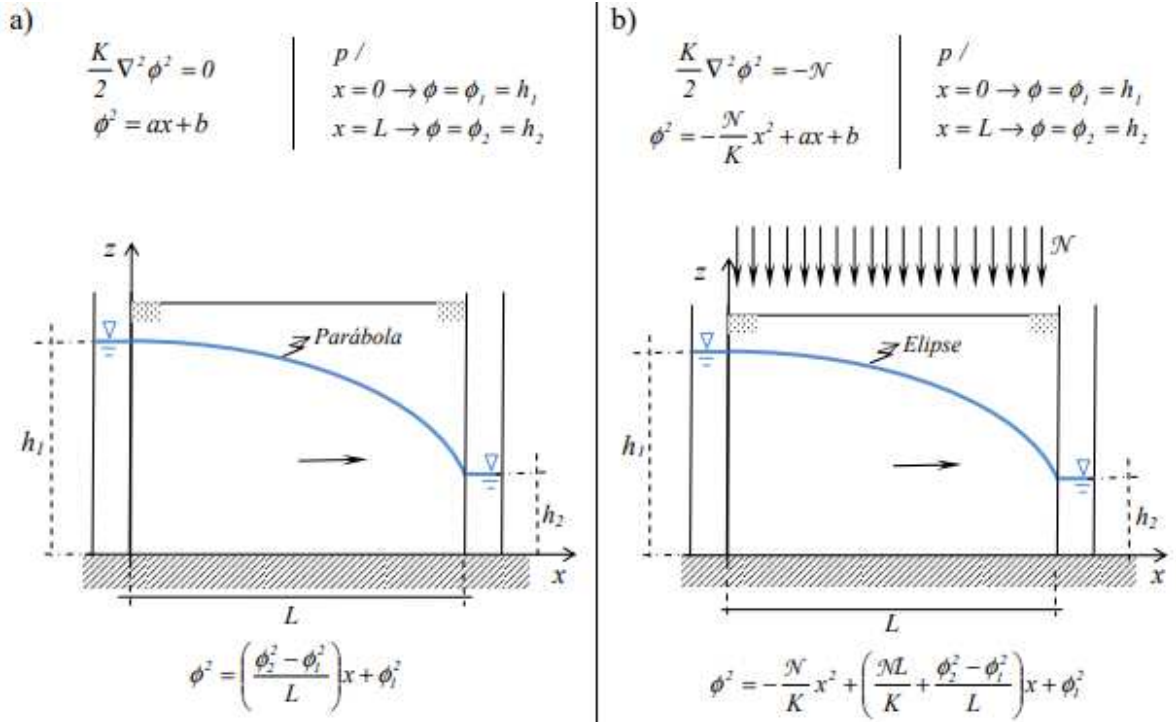
No caso unidimensional

$$\Phi = \frac{K\phi^2}{2} + c$$

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\mathcal{N}$$

Leva-se às equações estabelecidas na Figura para o caso de escoamento com recarga entre dois córregos paralelos com carga constante como condições de contorno.

Figura 6 – Modelo analítico de recarga baseado em Dupuit-Forcheimer.



Fonte: Adaptado de Bear, 1979.

Destaca-se a equação referente ao escamento entre duas cargas paralelas e constantes (Figura 6):

$$\phi^2 = \frac{-\mathcal{N}}{K} x^2 + \left(\frac{\mathcal{N}L}{K} + \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L} \right) x + \phi_1^2$$

Desenvolvendo,

$$\phi^2 - \phi_1^2 = \frac{-\mathcal{N}}{K} x^2 + \left(\frac{\mathcal{N}L}{K} + \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L} \right) x$$

Aplicando as simplificações:

$$\frac{(\phi + \phi_1)}{2} = \bar{H}$$

$$\frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L} \rightarrow 0; L \gg$$

$$\phi^2 - \phi_1^2 = (\phi - \phi_1)(\phi + \phi_1) = 2\Delta\phi\bar{H}$$

$$2\Delta\phi\bar{H} = \frac{-\mathcal{N}}{K}x^2 + \frac{\mathcal{N}L}{K}x$$

Considerando o ponto de maior delta em L/2:

$$\Delta\phi = \frac{\mathcal{N}}{8K\bar{H}}L^2$$

2.2.3. Topografia, Recarga, Condutividade Hidráulica Superfície Freática

Baseado em Haitjema e Mitchell (2005), é possível extrair da teoria matemática que envolve o escoamento em aquíferos livre alguns indicadores da influência da topografia, recarga, drenos e condutividade hidráulica no formato da superfície freática do aquífero

Normalmente as soluções de fluxo em aquíferos freáticos são encontradas a partir da suposição de que a localização da superfície livre depende diretamente da própria solução, dando significativo grau de complexidade ao problema da determinação exata do fluxo subterrâneo. A identificação de índices que apontem para a correta localização da superfície freática surge como importante indicador das feições da superfície de carga nesses aquíferos e consequente disposição do fluxo na região.

Dupuit (1863) foi o primeiro a resolver problemas de fluxo de água subterrânea regional. Ignorando o fluxo vertical, reduziu a complexidade do problema para fluxo horizontal unidimensional ou bidimensional. Forchheimer (1886) apresentou uma equação diferencial para a elevação do lençol freático em aquíferos não confinados, usando a aproximação de Dupuit.

Hubbert (1940), usando um fluxo construção de rede, foi um dos primeiros a fornecer um conceito modelo de fluxo de água subterrânea para fluxo entre (paralelos) fluxos que incluíram resistência ao fluxo vertical.

Toth (1963) ofereceu uma solução de fluxo regional de água subterrânea incluindo a resistência ao fluxo vertical, mas ele assumiu *a priori* a posição do lençol freático: uma réplica subjugada da topografia.

Enquanto o lençol freático no exemplo de Toth foi observado para, pelo menos aproximadamente, seguir a topografia, em muitas outras configurações a superfície freática e a topografia da superfície parecem mal

correlacionadas (Desbarats et al. 2002; Moore e Thompson 1996; Blaskova et al. 2002; Shaman et al. 2002 **apud** Haitjema e Mitchell 2005).

As teorias de Dupuit-Forchheimer e Toth são modelos conceituais aparentemente conflitantes de fluxo de águas subterrâneas regionais (desprezar ou considerar a resistência vertical). Toth (1963) introduziu o conceito de células de fluxo regionais, intermediárias e locais, aninhadas, com componentes horizontais e verticais do fluxo sendo importante. Dupuit e Forchheimer propuseram ignorar fluxo vertical em escala regional (Dupuit 1863; Forchheimer 1886).

Modernamente o fluxo vertical da aproximação de Dupuit-Forchheimer é adotada, ou seja a resistência ao fluxo vertical é ignorada (Strack, 1989), prejudicando a formação de células de fluxo aninhadas previstas por Toth.

Ambos os modelos de fluxo regional podem ser esperados na natureza, mas se aplicam a muito diferentes condições hidrogeológicas. Além disso, a aproximação de Dupuit-Forchheimer é frequentemente válida em áreas com propriedades típicas de aquíferos explotáveis, ou seja, aquíferos dos quais quantidades adequadas de água podem ser bombeadas para uso.

Toth modelou aquíferos profundos em relação à distância entre os elementos de drenagem.

Uma abordagem comumente usada na modelagem de água subterrânea, é aplicar recarga ao topo do aquífero e apenas especificar a cabeceira onde os córregos interagem com o aquífero.

Perfis bidimensionais em estado estacionário comparam as duas abordagens distintas (Mitchell-Bruker 1993). Nestes modelos, as funções de linha de drenos lineares (*line sink*) (Strack 1989) são usadas para criar limites de recarga ou de carga especificada para o regime de fluxo.

A bacia é delineada por limites sem fluxo nas laterais e fundos. Na simulação de recarga especificada, a taxa de recarga é especificada e o lençol freático é obtido a partir da solução (

Figura 7Figura 7a).

Nas simulações especificadas (Figura 8), o lençol freático é especificado e a distribuição da recarga é obtida a partir da solução.

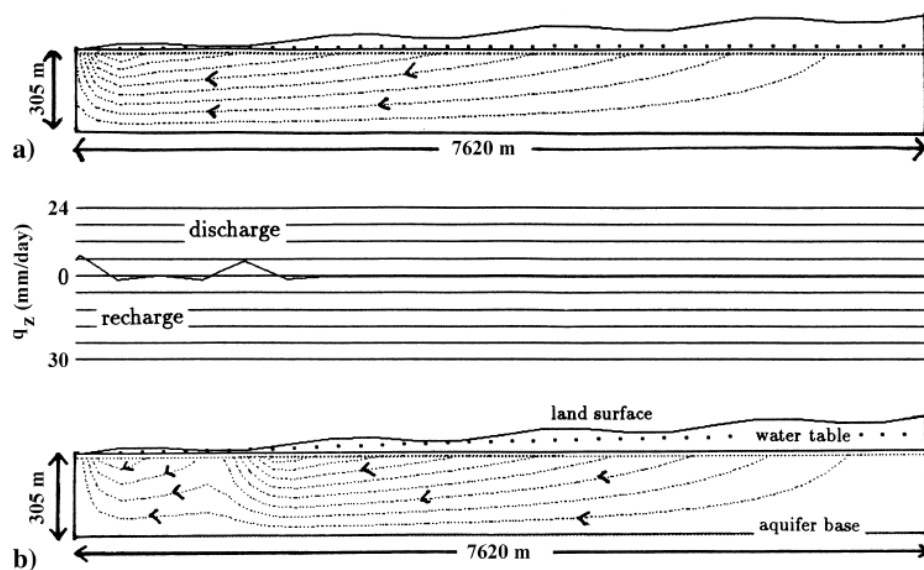
A Figura 7a representa o caso em que a razão de recarga sobre a condutividade hidráulica é relativamente baixa ($R/k = 1/12$). Nesta situação, a recarga é pequena e especificada em toda a bacia hidrográfica e o lençol freático não atinge a superfície do solo, exceto à esquerda onde é igual ao nível da água em um riacho de drenagem.

Nas regiões mais altas da bacia hidrográfica, o lençol freático está muito abaixo da superfície terrestre.

A Figura 7b representa o caso em que a razão de recarga para condutividade hidráulica é maior ($R/k = 5/12$). Nesta situação, o lençol freático sobe para cruzar a superfície antes de se conectar com o recurso de drenagem à esquerda, formando uma célula de fluxo local próxima ao fundo da bacia hidrográfica.

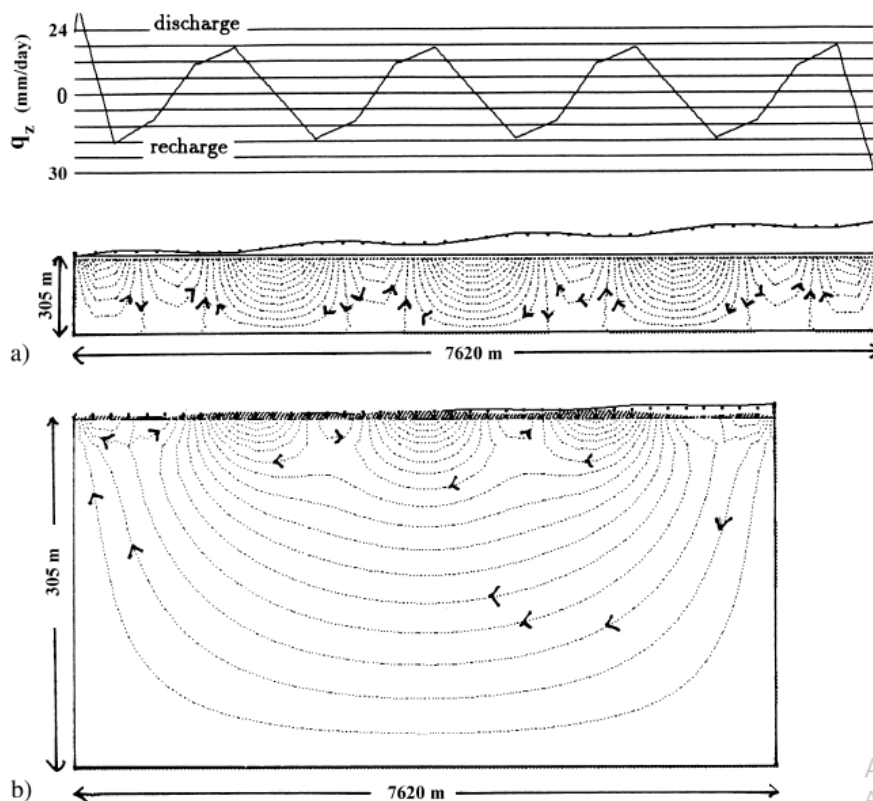
A superfície da terra próxima à parte inferior da bacia hidrográfica limita a elevação do lençol freático, que é modelada pela substituição dos sumidouros de linha de descarga especificados naquela área por outros especificados com carga igual à superfície da terra.

Figura 7 – Simulação de fluxo usando condições de contorno especificadas para recarga.



(a) Recarga = 25,4 mm/ano, condutividade hidráulica = 0,3 m/d; (b) Recarrega = 126 mm/ano, condutividade hidráulica = 0,3 m/d (Mitchell-Bruker 1993).

Figura 8 – Simulação de fluxo usando condições de contorno especificadas pela carga.



(a) profundidade do aquífero de 1000 pés, (b) profundidade do aquífero de 10.000 pés
(Mitchell-Bruker 1993).

Ao medir o lençol freático na Figura 7b em vários locais da bacia hidrográfica, parece que o lençol freático é uma réplica moderada da superfície da terra, pelo menos em um sentido geral.

No entanto, se um modelo for desenvolvido onde o lençol freático é em todos os lugares igual à superfície da terra, um sistema de fluxo muito diferente é obtido (Figura 8a). Nesta simulação, inúmeras células de fluxo locais são formadas com zonas de significativo fluxo vertical.

Se as mesmas condições de contorno superior especificadas pela carga (lençol freático igual à superfície da terra) são aplicadas a um aquífero mais profundo, como na Figura 8b, um sistema de fluxo local, intermediário e regional é obtido. A Figura 8b é semelhante às obtidas pelo modelo proposto por Toth (1963).

A análise é baseada em um modelo de escoamento transversal bidimensional que inclui a resistência ao escoamento vertical. Aquíferos regionais rasos, no entanto, foram modelados com sucesso pelo uso da aproximação de Dupuit-Forchheimer, que ignora resistência vertical ao fluxo.

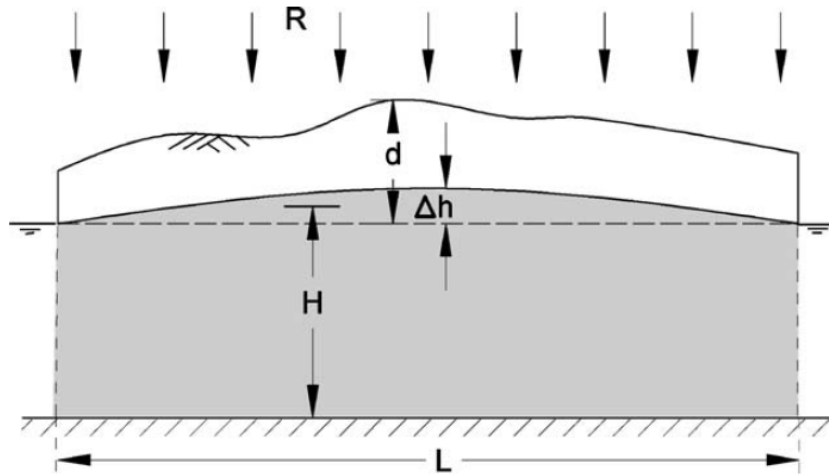
O aumento do lençol freático em um modelo de Dupuit-Forchheimer da bacia hidrográfica teórica na Figura 7 pode ser descrito com uma fórmula (fluxo unidimensional entre dois riachos os paralelos, acumulando Δh [m], a meio caminho entre os riachos) (Haitjema 1995):

$$\Delta h = \frac{RL^2}{8T}$$

Onde R [m/d] é a taxa de recarga de área, L [m] a distância entre os fluxos e T [m²/d] a Transmissividade média do aquífero.

Conforme a Figura 9, a recarga de área devido à precipitação e gera fluxo em direção aos limites especificados pela carga.

Figura 9 – Acúmulo de água subterrânea devido à recarga.



A Figura 7 pode ser vista como a metade esquerda da Figura 9.

A Figura 9 também pode ser interpretada como fluxo em uma ilha circular com o perfil ao longo de seu diâmetro \$L\$ [m], caso em que o acumulado no centro da ilha torna-se:

$$\Delta h = \frac{RL^2}{16T}$$

A transmissividade média \$T\$ pode ser escrita como a condutividade hidráulica do aquífero \$k\$ [m/d] vezes a espessura média do aquífero \$H\$ [m], portanto:

$$T = kH$$

Com a Equação anterior, teremos:

$$\Delta h = \frac{RL^2}{mkH}$$

Onde \$m\$ é 8 ou 16, dependendo do problema de fluxo ser unidimensional ou simétrico radial, respectivamente. A Equação acima ilustra que a elevação do lençol freático é muito sensível à distância \$L\$ entre os contornos hidrológicos (águas superficiais).

Dada a geometria de um aquífero particular e assumindo uma espessura H saturada constante, no entanto, a elevação do lençol freático depende apenas da relação entre recarga e condutividade hidráulica, R/k , que é adimensional. Sob condições de fluxo não confinado, a espessura saturada média H aumentará com o aumento do lençol freático e a resposta a R/k torna-se não linear.

O resultado para o acumulado no centro do aquífero Δh é obtido ignorando-se a resistência ao fluxo vertical no aquífero, que constitui a aproximação de Dupuit-Forchheimer. A validade desta aproximação depende da geometria do aquífero e, em menor medida, do grau de anisotropia vertical.

Como regra prática, a aproximação de Dupuit-Forchheimer é aceitável quando a distância entre os limites hidrológicos é grande (Bear 1972; Harr 1962) em comparação com a espessura do aquífero "efetiva":

$$L \gg \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} H$$

onde o termo da raiz quadrada escala a espessura do aquífero H ao levar em conta a diferença na condutividade horizontal k_h e na condutividade vertical k_v .

Na prática, muitas vezes é suficiente que L seja cinco vezes maior do que a espessura efetiva do aquífero (termo da raiz quadrada vezes H).

Na Figura 10, uma seção transversal sobre um aquífero regional é esboçada com um lençol freático em resposta à recarga do aquífero para dois casos diferentes.

Uma alta taxa de recarga em combinação com uma baixa condutividade hidráulica do aquífero levaria ao lençol freático ser interrompido se o aquífero se elevar muito

Figura 10a, enquanto na Figura 10b uma taxa de recarga relativamente baixa e alta condutividade hidráulica do aquífero resultam em um lençol freático que mal toca a superfície do terreno (independente do terreno).

Na verdade, o que importa não são os valores absolutos da recarga e da condutividade, mas a relação adimensional de R/k .

No primeiro caso (Figura 10a), o lençol freático pode ser caracterizado como “controlado pela topografia”, enquanto na Figura 10b essencialmente não há correlação entre a topografia e o lençol freático.

A magnitude da influência da topografia na da superfície freática topografia depende, portanto, da recarga direta na região, da transmissividade do aquífero, da geometria do aquífero e da própria topografia. Pode-se colocar essa influência como conjunção de três taxas adimensionais para caracterizar o regime de fluxo de água subterrânea:

- I. Recarga pela condutividade hidráulica, R/k ;
- II. Distância entre os limites hidrológicos sobre a espessura do aquífero saturado, L/H ; e
- III. Distância entre limites hidrológicos sobre a elevação máxima do terreno, L/d .

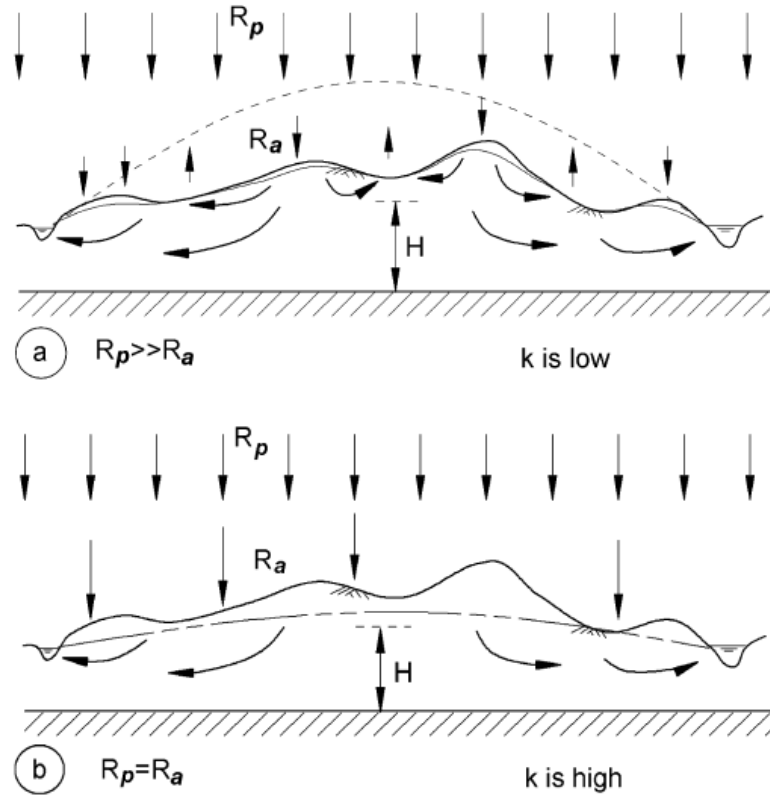
O aumento máximo do terreno d é definido aqui como a maior distância entre a elevação (média) da superfície da água e a superfície do terreno, medida na elevação mais alta do terreno (Figura 9).

A acumulação máxima de água subterrânea h em um aquífero pode ser estimada pela seguinte relação adimensional em termos das razões definidas anteriormente:

$$\frac{\Delta h}{d} = \frac{1}{m} \frac{R}{k} \frac{L}{H} \frac{L}{d}; \text{ para } L \gg \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} H; \quad L > 5H$$

Figura 10 – Alteração da recarga e a influência da Topografia na superfície freática.

(a) Aquífero de baixa permeável com lençol freático controlado por topografia; (b) aquífero altamente permeável com um lençol freático não controlado pela topografia (Haitjema 1995).



O termo $\Delta h/d$ é a razão entre o acúmulo máximo e a elevação máxima do terreno, ambos medidos em relação às cotas das águas superficiais dos limites hidrológicos circundantes.

A constante inteira m depende do tipo de fluxo. Para fluxo unidimensional entre dois limites de água superficiais paralelos $m=8$, enquanto para fluxo radial em um aquífero de diâmetro L , $m=16$. Na prática, portanto, espera-se que m esteja em algum lugar entre esses valores:

$$8 \leq m \leq 16$$

A anterior é obtida pelo uso da aproximação de Dupuit-Forchheimer, portanto, a condição de que a distância entre as condições de contorno deve ser grande em comparação com a espessura do aquífero.

Se a proporção $\Delta h/d$ for maior que 1, o lençol freático provavelmente interceptará a superfície do terreno em um ou mais locais. Para valores de $\Delta h/d \gg 1$; a situação representada na ocorre que a topografia controla essencialmente a localização do lençol freático.

Para este caso, a taxa de recarga R deve ser interpretada como a taxa de recarga potencial já que a taxa real de recarga irá variar ao longo do terreno, sendo positiva ao longo das encostas e negativa nas baixas topográficas locais.

Por outro lado, quando $\Delta h/d \ll 1$, a situação na Figura 10b ocorre onde o lençol freático é controlado por outros parâmetros do aquífero essencialmente não relacionado à topografia.

Se o acúmulo máximo do lençol freático for quase o mesmo que o aumento máximo do terreno, $\Delta h/d \approx 1$, o regime de fluxo de água subterrânea não é totalmente controlado pela topografia. No entanto, como regra geral, o seguinte pode ser declarado (Haitejema e Mitchel, 2005):

$$\frac{1}{m} \frac{R}{k} \frac{L}{H} \frac{L}{d} > 1 \rightarrow \text{Superfície freática controlada pela topografia}$$

$$\frac{1}{m} \frac{R}{k} \frac{L}{H} \frac{L}{d} < 1 \rightarrow \text{Superfície freática não controlada topografia}$$

Os lençóis freáticos controlados por topografia são mais prováveis de ocorrer em sedimentos pouco permeáveis, que muitas vezes não são considerados como “ aquíferos ”, pelo menos não aquíferos de onde podem ser bombeadas quantidades utilizáveis de água.

Eles podem ser esperados em sistemas onde, devido às circunstâncias, taxas de recarga relativamente altas ocorrem. Essas altas taxas de recarga podem ser devido às condições das terras úmidas, onde a água do lago pode aumentar a recarga do aquífero além daquela derivada da chuva normal.

Deve-se ressaltar que, mesmo que o lençol freático seja controlado por topografia, isso não significa automaticamente que o lençol freático deva estar localmente paralelo à superfície do terreno.

Em outras palavras, embora o lençol freático seja uma "réplica moderada da topografia", o gradiente hidráulico local pode ser bastante diferente da inclinação da superfície do terreno local.

Consistente com a análise original de Toth, a topografia pode restringir significativamente o acúmulo de água subterrânea.

Recarga e a condutividade, entretanto, não são os únicos parâmetros que determinam a diferença entre lençóis freáticos controlados por topografia ou não. A espessura do aquífero e a distância entre a disposição das águas superficiais também são importantes.

Na verdade, em um sentido muito geral, o lençol freático e a topografia estão sempre relacionados. Afinal, as baixas do lençol freático ocorrem nas águas superficiais, que por sua vez ocorrem topograficamente áreas baixas. (Haitjema e Mitchel, 2005)

2.3. Software ModFlow

O Software MODFLOW, desenvolvido por McDonald e Harbaugh (1988) para a United States Geological Survey (USGS) e resolve computacionalmente e tridimensionalmente a equação do movimento da água subterrânea apresentada anteriormente, a partir das cargas obtidas o fluxo é calculado em cada célula seguindo restrições numéricas da simulação.

Segundo Souza (2008) apud Pontes (2010):

“O esquema numérico de resolução do MODFLOW é baseado no Método das Diferenças Finitas (MD) (ANDERSON e WOESSER, 1992), segundo o qual a área estudada é dividida numa malha de células em que cada uma delas contém um ponto designado por nó onde em cada nó as equações diferenciais parciais que governam o fluxo são transformadas em equações algébricas”.

O software MODFLOW é de acesso livre e, desde seu surgimento na década 80, possui várias versões com novas funcionalidades, opções de cálculo e atualmente é um programa de grande confiabilidade. Permite a simulação do comportamento do fluxo subterrâneo em aquíferos quando submetidos a uma grande variedade de elementos como: efeitos de poços, rios ou drenos, recarga, evaporação e barramentos, etc (MCDONALD e HAUBARGH, 1988).

Segundo Kresic (1997), O MODFLOW tem se tornado padrão por sua versatilidade, apresentando módulos independentes que são agrupadas em pacotes que tratam das características hidrogeológicas específicas estudadas, permitindo a adição de novos módulos sem modificar os já existentes.

Como interface gráfica foi utilizado o ModelMuse, software de uso livre e gratuito oferecida pela USGS (United States Geological Survey). O ModelMuse se propõe a integrar vários pacotes que facilitam a entrada de dados e pre e pós processamentos do MODFLOW, aqui sendo usado como um motor de cálculo (WINSTON, 2019).

Para o modelo numérico foram usados os seguintes pacotes do software ModelMuse: Recarga (Recharge - RCH), Cargas e Fluxo FHB, (Heads in FHB, Flow in FHB), Drenos (DRAIN); Bem como os pacotes de pós processamento HOB e Zone Budget.

O uso de cada pacote é função das condições de contorno específicas utilizadas. Todas os modelos de simulação usaram a mesma discretização da área (discretização do espaço) analisada, considerando as condições de simulação para estado permanente.

Primeiro, o pacote Recarga foi usado para simular um fluxo especificado distribuído na parte superior do modelo. No MODFLOW, essas taxas são multiplicadas pela área horizontal das células às quais são aplicadas para calcular as taxas de fluxo volumétricas. Sua entrada se deu como objeto/polígono recobrimdo toda superfície da área.

O pacote FHB permite ao usuário definir cargas e fluxos especificados de forma independente dos períodos e etapas de tempo no modelo.

Cargas especificadas no pacote FCH, foram aplicadas para as maiores drenagens que tendem a permanecer constantes ao longo do tempo.

O módulo DRAIN foi utilizado para a condição de drenança que equivale à uma condição do tipo 3, atribuindo uma drenança à toda carga acima do limite especificado.

Os pacotes de pós processamento foram importantes para a obtenção das taxas de transferência hídrica entre as camadas. Essa última funcionalidade foi alcançada através da aplicação do pacote Zone Budget, criando zonas de balanço nas camadas

3. Área de Estudo

As feições geomorfológicas do relevo e sua integração com modelos ambientais resultando em grandes benefícios para a descrição dos processos naturais (ARONOFF, 1995).

Os Modelos Numéricos de Elevação (MNE), dentre muitas fontes, a partir de imagens orbitais pela missão topográfica por radar interferométrico (SRTM- *Shuttle Radar Topography Mission*).

Como o foco deste trabalho está na aplicação dos índices apontados por Haitjema e Mitchell (2005) para a determinação da influência da topografia em aquíferos costeiros, ressaltamos que estes constituem em importante reserva hídrica sedimentar em todo o Litoral Nordeste, em particular na região próxima à cidade do Pecém – Ceará , como pode ser visto no mapa da Figura 11. Sendo uma reserva hídrica sedimentar de relevância para o Estado.

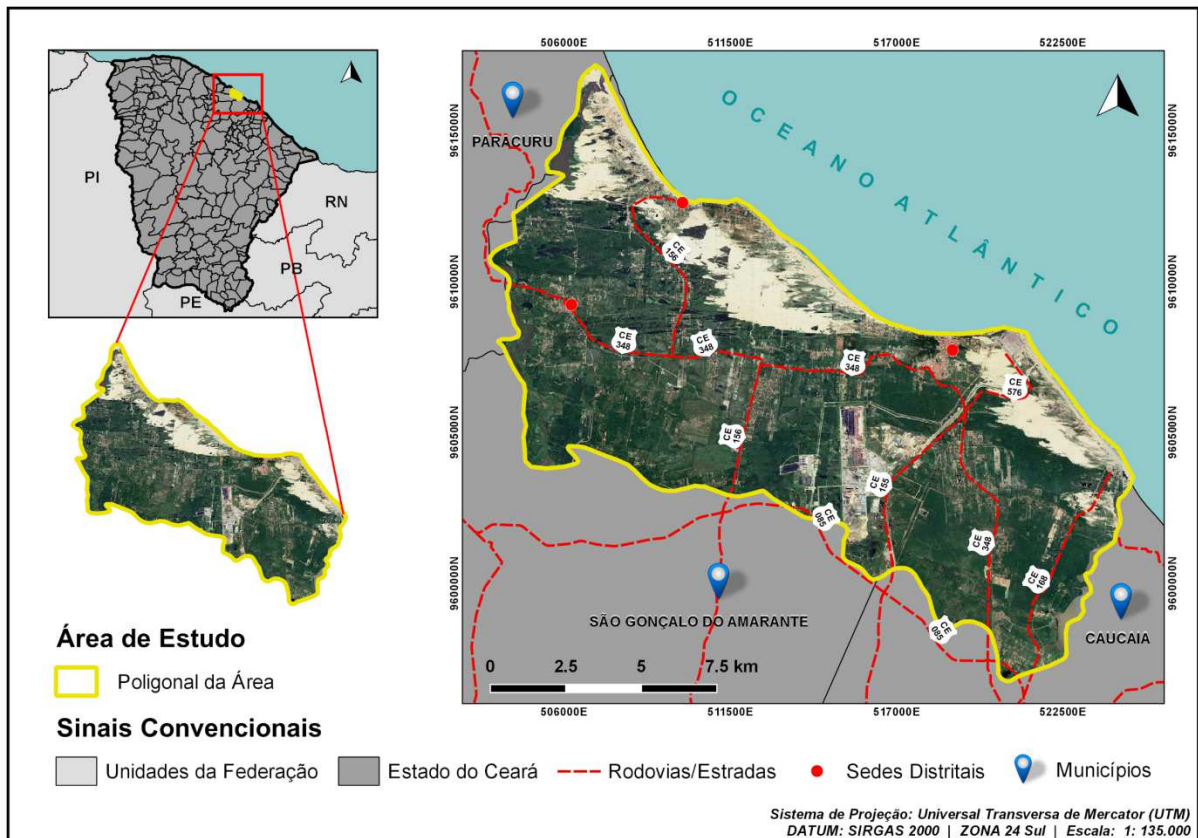
Figura 11 – Fontes de águas subterrâneas no Ceará

Fonte: Jornal OPOVO 05/10/2015



Conforme Azevedo (2020), a área de estudo (Figura 12) situa-se na região oeste da RMF, centralizada grande parte no Município de São Gonçalo do Amarante, próximo ao Centro Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), limitando-se ao Norte com o Oceano Atlântico, à Oeste com o riacho Siupé ou Anil (Município de Paracuru), ao Leste com o Lagamar do Cauípe (Município de Caucaia), e ao Sul limita-se com rochas do embasamento cristalino afloradas ou semiafloradas.

Figura 12 - Localização da área de estudo Fonte: Azevedo (2020).
De imagens orbitais ESRI (2019) e dados vetoriais: IBGE (2010); DNIT (2012); IPECE (2019).



Ainda, segundo Azevedo (2020), a geologia da região é composta basicamente por três (03) unidades litológicas, na base o embasamento cristalino constituído por rochas gnáissicas e migmatíticas do Proterozóico Inferior; seguidos por as unidades sedimentares:

- i. Sedimentos Cenozóicos e Plio-pleistocênicos da Formação Barreiras;
- ii. Sedimentos eólicos, Aluviais, Flúvio-marinhos, Marinhos e Holocênicos, dos quais se definirá como: Dunas, Paleodunas e aluviões

A Formação Barreiras, predominantemente areno-argilosa e silto-arenosa, distribui-se de forma variável acompanhando a linha de costa,

sotoposta às paleodunas e das dunas atuais. Por vezes, estes sedimentos ocorrem próximos ao mar, chegando a aflorar na forma de falésias.

O aquífero predominante no setor setentrional é a formação barreiras, que se caracteriza por sua média potencialidade, baixa profundidade e qualidade da água variável.

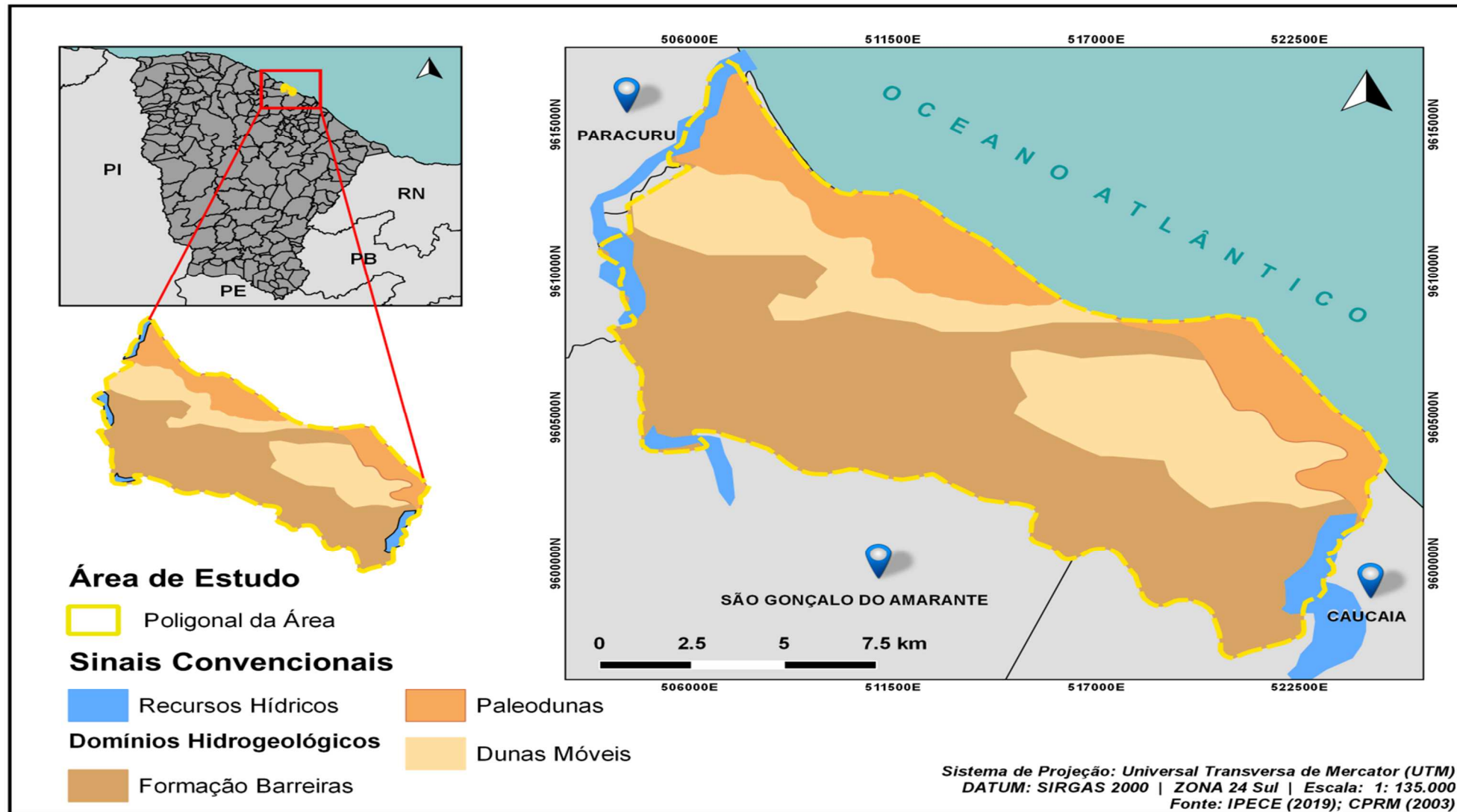
O setor norte, onde afloram e predominam a ocorrência das dunas, ocorrem as maiores potencialidades em termos de facilidade de captação e reserva explorável de água. As características básicas do setor favorecem o acúmulo de águas subterrâneas a poucos metros de profundidade e, também, dos recursos hídricos superficiais nas áreas mais rebaixadas.

O consenso geral, segue as premissas de Bianchi (1984), em que, justifica-se ao dizer que as diferenças litológicas as dunas e as paleodunas não constituem razões suficientes para que se caracterize uma separação hidráulica entre essas duas unidades, o que leva a serem consideradas como um só sistema aquífero (dunas/paleodunas).

No setor sul, em decorrência da predominância de terrenos “cristalinos”, a captação de águas subterrâneas apresenta como características básicas a baixa potencialidade e a ocorrência frequente de poços com águas salobras ou salinas.

A base impermeável do aquífero sedimentar (Dunas/Paleodunas) fica sobre o Cristalino a uma cota em relação ao nível do mar de -17m, como média na região próxima à linha de costa.

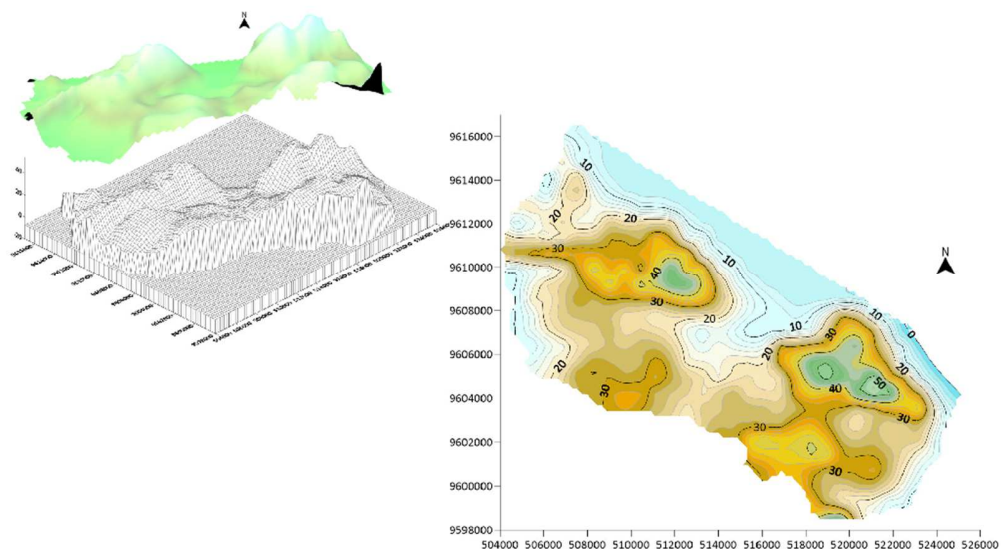
Figura 13 - Contexto litológico da área de estudo (Azevedo 2020)



O Sistema Dunas tem um destaque especial na consideração dos ambientes costeiros pela sua magnitude espacial e pelo seu destaque altimétrico, além das alternativas ecológicas correlatas a estes ambientes (BIANCHI, MORAIS & GURGEL JR, 1985 **apud** Azevedo, 2020). Estas dunas, podem ainda ser classificadas como: Dunas frontais, lençóis de areia, dunas lineares ou longitudinais, parabólicas, transversais, barcanas e eolionitos.

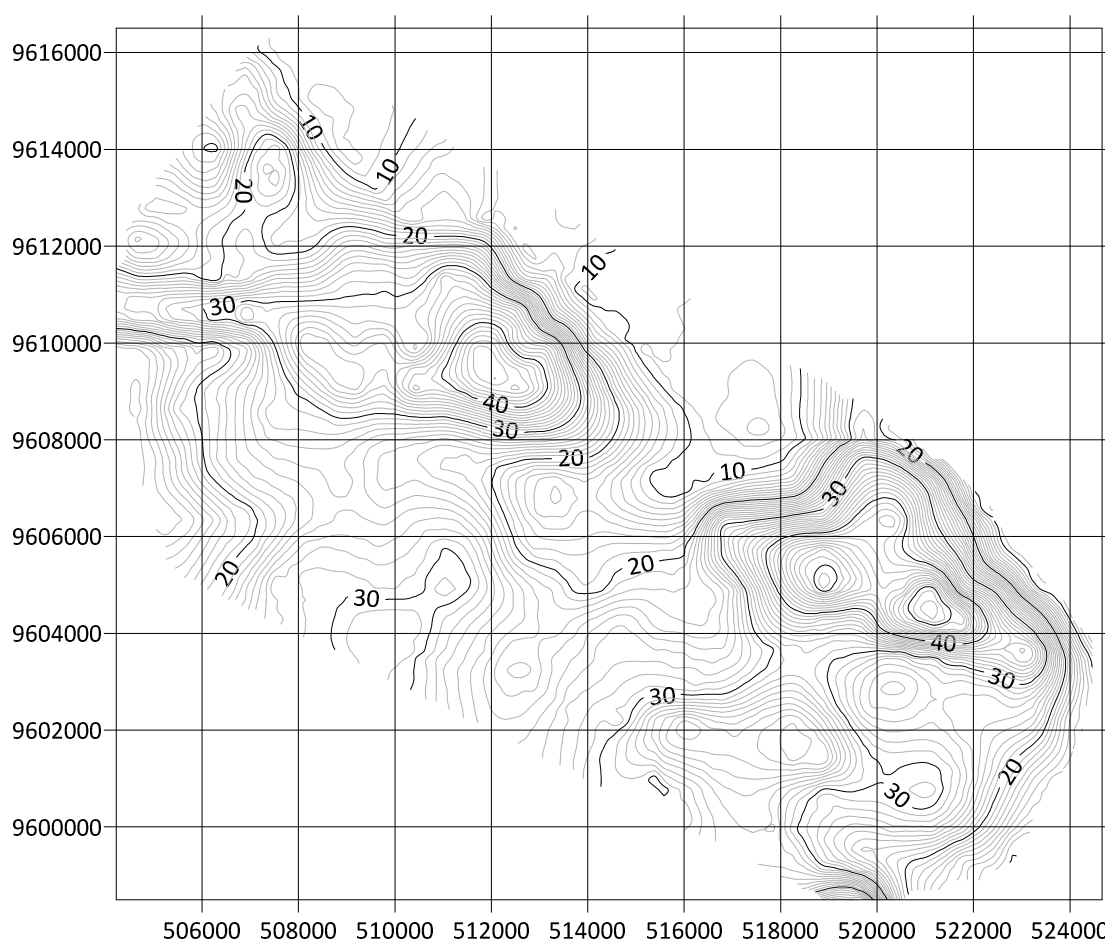
O relevo das dunas contrasta com as feições morfológicas dos tabuleiros pré-litorâneos. A Figura 14 demonstra as altitudes variam entre 0 e 85 metros em relação ao nível do mar. As máximas altitudes, ocorrem pontualmente, mais a dentro do continente existem pontos aflorantes de rochas cristalinas, como na porção sudoeste, a qual afloram com relevo protuberante em relação ao entorno.

Figura 14 - Modelo digital de elevação extraído de carta ortofoto retificada.
Fonte: Azevedo (2020) com base em dados aerolevantados do IDACE.



O mapa planialtimétrico pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Mapa planialtimétrico da região do Pecém.
A partir de imagens SRTM.



A região possui Clima Tropical Subúmido (Aw) com pluviometrias que variam entre 1.000mm e 1.600mm. Possuindo período seco de até 8 meses consecutivos e duas estações distintas bem marcadas: uma seca e outra chuvosa.

Em geral, na região as temperaturas variam, durante o dia, de mínimas de 25 °C até máximas de 28 °C.

A média pluviométrica da região é de 1020 mm/ano e a temperatura anual média de 27°C O regime de chuvas é controlado por uma estação seca,

de junho a dezembro, e outra chuvosa, com aproximadamente 75% das precipitações entre fevereiro e maio (FUNCEME, 2013).

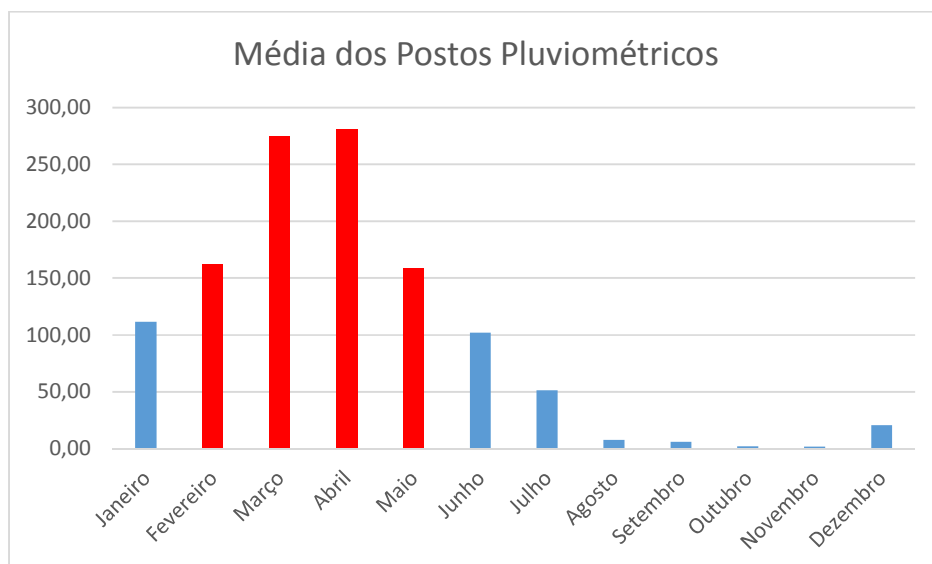
As médias pluviométricas históricas podem ser caracterizadas pelos postos Funceme descritas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Precipitações médias (1977-2018)

Mês	Paracuru (mm)	São Gonçalo (mm)	Caucaia (mm)
Janeiro	112,80	93,80	128,90
Fevereiro	149,40	149,10	187,50
Março	280,50	226237,00	315,90
Abril	305,70	,70	298,70
Maio	197,50	116,40	161,40
Junho	118,90	74,80	112,60
Julho	61,30	39,50	53,40
Agosto	6,80	4,30	12,40
Setembro	5,30	3,70	8,90
Outubro	1,10	2,20	3,40
Novembro	1,20	1,50	2,60
Dezembro	18,30	18,10	25,70
Total	1258,80	967,80	1311,40

Fonte: Funceme (2018)

Figura 16 –Destaque Pluviometria Quadra Chuvosa (médias de 1977 a 2018)



Fonte: adaptado de Funceme (2018)

Foram usados poços monitorados pela COGERH de propriedade de particulares e comunidade local, além de poços operados pela própria companhia na área (Tabela 2).

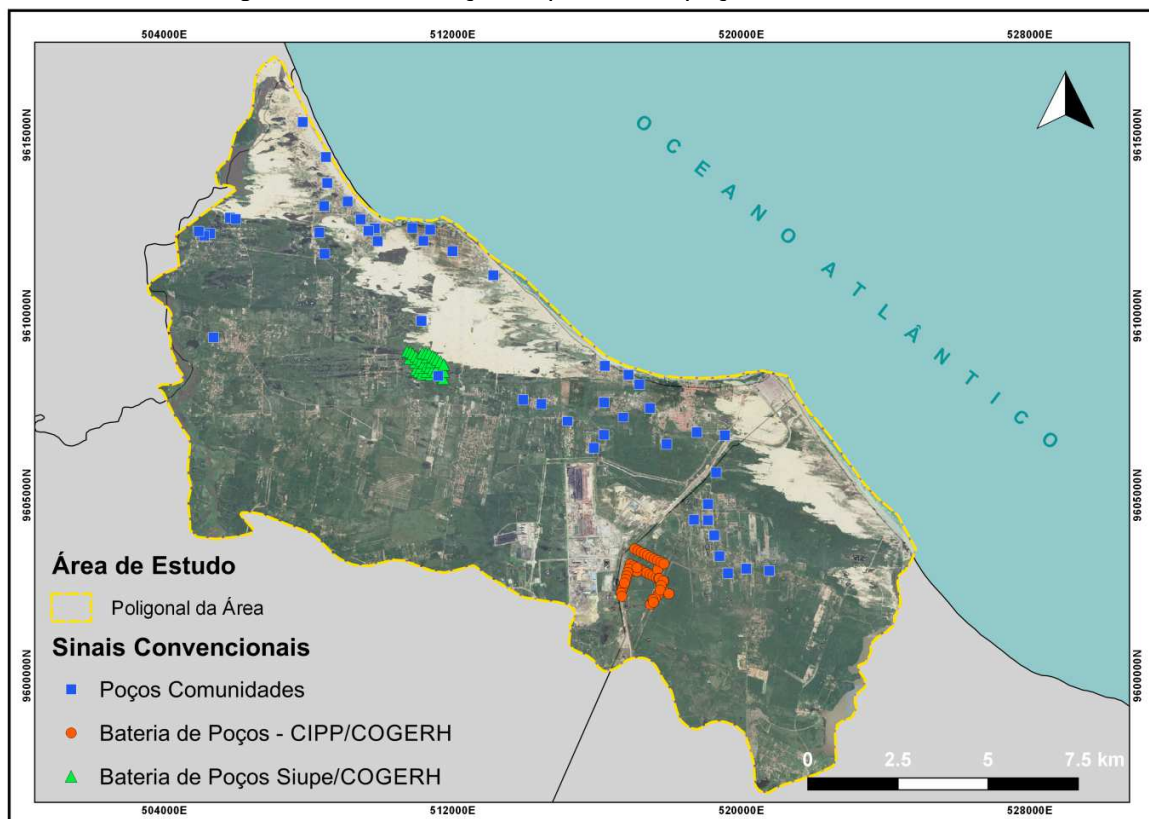
Tabela 2 - Síntese dos poços monitorados pela COGERH (Azevedo 2020)

Local	Início	Último	Número de dados
Comunidades locais	Abril 2017	Agosto 2019	50 poços
Bateria de abastecimento CIPP	Janeiro 2017	Agosto 2019	38 poços
Bateria de abastecimento Taíba	Outubro 2018	Agosto 2019	35 poços

Fonte: Azevedo (2020), com base em dados da COGERH (2019).

A distribuição espacial destes poços contempla parte da área de estudo, tendo uma orientação com tendência para o centro-norte da área, sobretudo em função da maior ocorrência de poços distribuídos nestas localidades e sua representatividade do aquífero Dunas (Figura 17).

Figura 17 - Distribuição espacial dos poços monitorados



Fonte: Azevedo (2020) , com base nos dados da COGERH e imagem do satélite Landsat.

O modelo de fluxo subterrâneo foi construído a partir do Modflow 2005, com interface em software livre ModelMuse (USGS). Cada célula: 10.000 m² com duas camadas genéricas, representando dunas e barreiras. Foram inseridos objetos fixos para as condições de drenos, na Lagoa do Gereraú, nos rios Aníl, Cauípe e no Oceano. Para representar as inhomogeneidades, foram aplicados objetos representando a camada do aquífero Paleodunas, aquífero Aluvionar, e Paleocanal na Barra do Guaribas. Quanto às dimensões tem-se: 23,5 km ao norte; 8,7 leste km; 14,5 km oeste; 22,4 km sul. Área discretizada total foi de 247,609 km² (22.878 km x 10.870 km) A área ativa ficou vinculada às formações sedimentares, contemplando condições de contorno ao longo de toda área delimitada.

O limite norte no contorno com oceano embora possível de simular com carga conhecida igual à zero e, este cenário foi experimentado, estimou-se um melhor cenário com a utilização do módulo Drain, que equivale à uma condição do tipo 3, atribuindo uma drenança à toda carga acima do limite especificado e assim

encontrando um fluxo que pode ser atribuído uma vazão, para o caso em tela, foi colocado um dreno com cota máxima igual à zero, assim, toda carga acima do nível do mar poderia ser drenado por este. Essa mesma lógica foi usada para os dois rios, usando cota de dreno igual à -2 m abaixo da superfície do terreno, Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 – Modelo da superfície freática calibrada

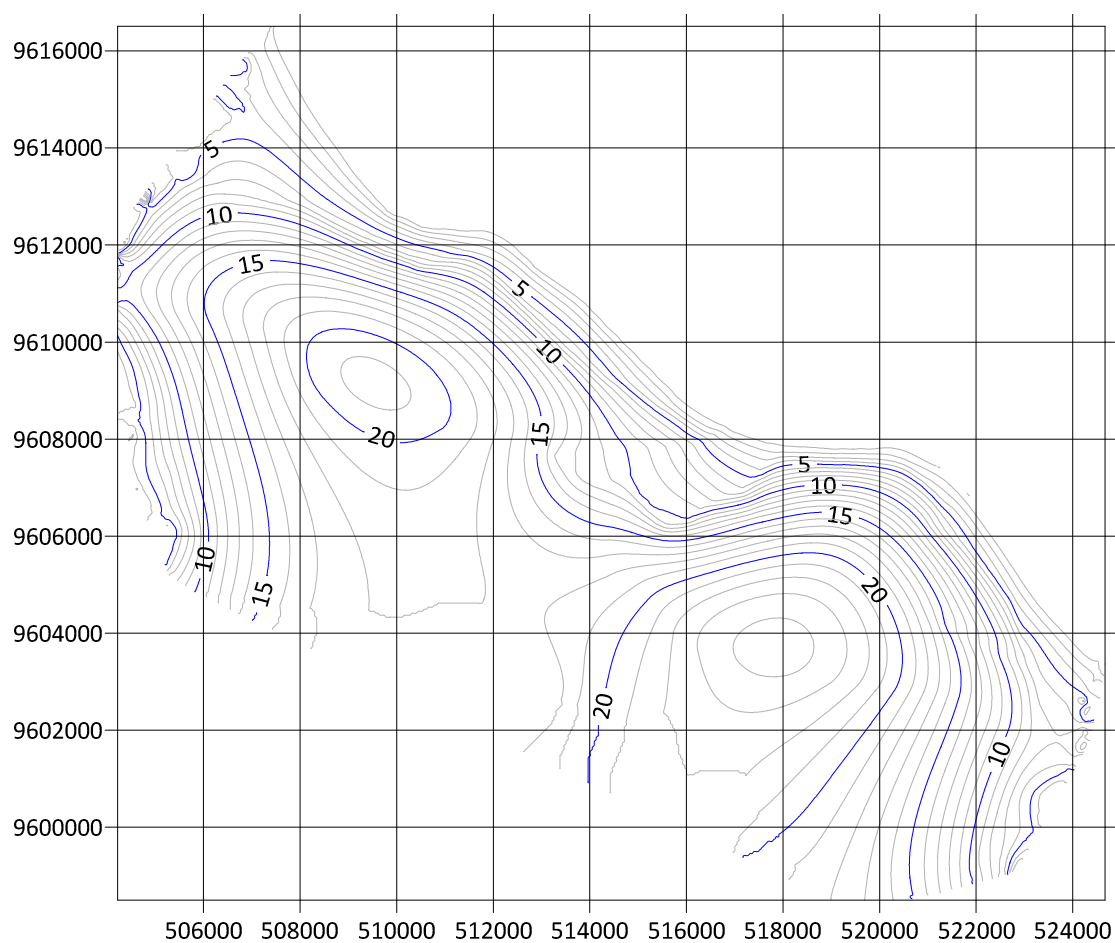
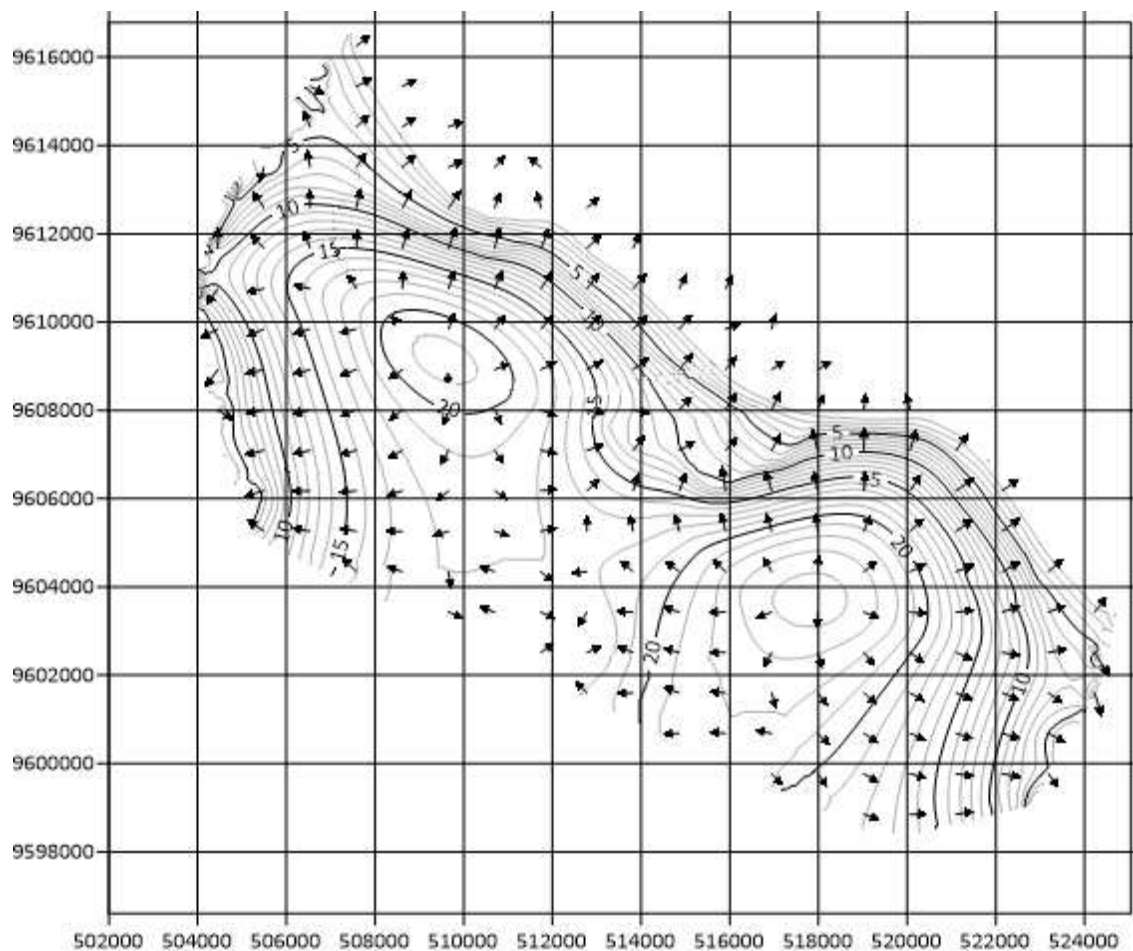


Figura 19 – Mapa de fluxo



Após calibração o modelo apresentou para área de interesse a condutividade igual a $1,25E-4$ m/s para Dunas e $1,50E-4$ para paleodunas, com recarga direta na ordem de 36% de um total de 1172 mm /ano. Ou seja, recarga direta de 422 mm/ano.

4. Metodologia

A metodologia foi formulada para ser executada a partir de dados preexistentes. Não exigindo, portanto, idas a campo e exposição desnecessária à atual pandemia de Covid19 pelo o qual o País passou em 2020/2021.

A metodologia adotada consiste em primeiramente delimitar a área a foco ser estudada cuja principais critérios de seleção foram a homogeneidade dos sedimentos e exposição do solo— recaindo nas zonas denominadas por Dunas e Paloduras, de forma a minimizar interferências por mudanças de material sedimentar do aquífero e impermeabilizações que dificultem a recarga direta.

A área selecionada conta com homogeneidade de geologia dunar para o aquífero freático; poços particulares e públicos preexistentes; variação expressiva de relevo apresentando zonas altas e vales; lençol freático alto e facilidade de acesso.

Assim, foram selecionados dois campos de dunas presente em uma faixa de aproximadamente 5,5 km ao longo da linha da costa.

Para cada campo de duas foram feitos três perfis (cortes transversais) perpendiculares a linha de costa.

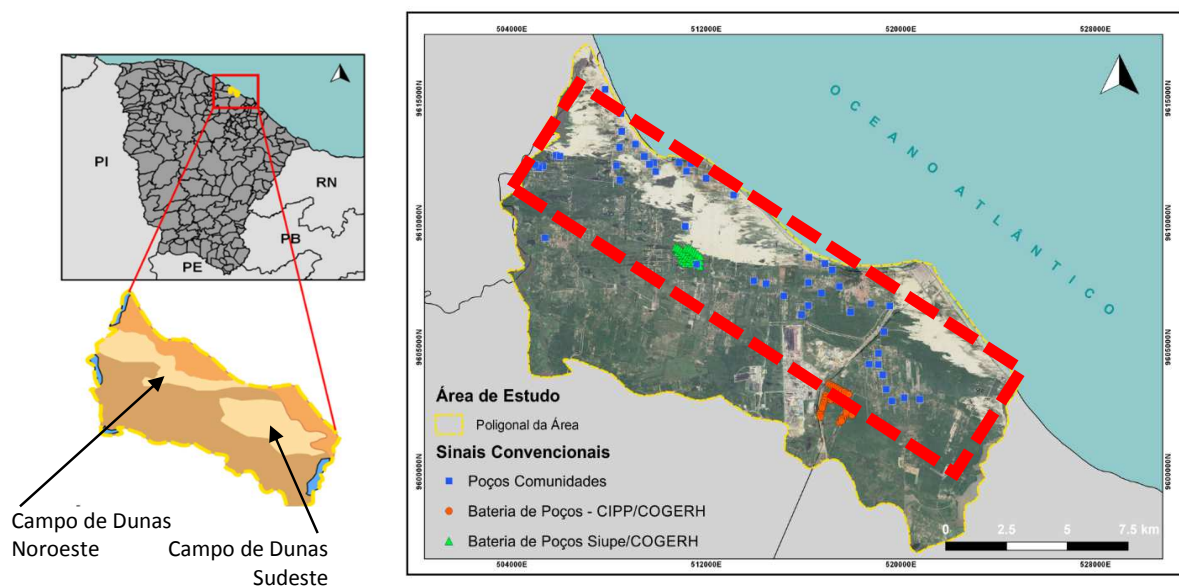
Adotou-se o valor de recarga para região de $1,34\text{E-}08$ m/s, bem como o valor da condutividade predominante Dunas $1,25\text{E-}04$ m/s.

A espessura do aquífero foi estimada a partir da topografia (altitude) e o plano -17m conforme a profundidade com o cristalino. A Superfície freática adotada foi a simulada na calibração pelo Modflow (Figura 18)

O modelo da superfície topográfica foi criado a partir de imagens SRTM conforme Figura 15.

Dois campos de dunas foram identificados a partir da topografia, um noroeste da área selecionada e outro a sudeste (Figura 20). Essa faixa é composta predominantemente por Dunas e Paleodunas com condutividade hidráulica semelhante, adota-se aqui o valor da condutividade hidráulica para Dunas uma vez que este compõe a formação hegemônica nessa região analisada.

Figura 20 – Campos de dunas estudados.



Efetua-se o cálculo dos índices previstos na caracterização de Haitjama e Mitchel (2005).

Primeiramente se verifica a validade para as simplificações de Dupuit-Forchheimer.

$$L \gg \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} H; \quad L > 5H$$

Observa-se o destaque para a relação entre a condutividade hidráulica horizontal e vertical K_h/K_v

Depois calcula-se o índice $\frac{\Delta h}{d}$:

$$\frac{\Delta h}{d} = \frac{1}{m} \frac{R}{k} \frac{L}{H} \frac{L}{d};$$

Destacam-se as relações:

- I. Recara por condutividade hidráulica R/K
- II. Comprimento do perfil pela espessura média do aquífero L/H
- III. Comprimento pela pelo maior delta de elevação L/d

Temos ainda em destaque o valor de geometria $1/m$ que irá variar de 1/16 a 1/8 (0,0625 a 0,125)

Como o índice $\frac{\Delta h}{d}$ varia devido ao fator m de geometria da região e considerando este fator entre 8 e 16, considera-se o valor médio obtido como referência, sempre considerando o valor de 1 como limítrofe para a condição de influência e não influência da topografia na composição da superfície freática.

A partir dos valores obtidos para $\frac{\Delta h}{d}$, conforme descrito no parágrafo anterior, convencionou-se para este trabalho que para valores obtidos entre zero e 0,75 caracterizaria que o relevo não influencia na forma da superfície freática, para valores entre 0,75 e 1,25 há certa indefinição podendo ser caracterizada como zona de transição entre a influência e a não da topografia, já para valores acima de 1,25 adota-se que o perfil (a área referente) sofre influência da topografia.

Em síntese, os índices topográficos principais serão colhidos e evidenciados no formato de mapas, perfis e tabelas. A verificação do condicionamento matemático conforme a teoria dos elementos de contorno e das hipóteses de Dupuit – Forchheimer, nos moldes do proposto por Haitjama e Mitchill (2005) serão calculadas. Ambos aplicados a região como um todo e suas partes objetivando identificar regiões como maior impacto da topografia na feição da superfície freática abaixo dela.

Observa-se a sazonalidade da pluviometria na região cuja concentração se dá nos meses de fevereiro, março, abril e maio (quadra chuvosa) com média (para os três postos pluviométricos reunidos) é de 218,88 mm/mês, enquanto para os demais meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro a média é de 38,00 mm/mês apenas – com os meses

Após a caracterização dos perfis para o caso da simulação permanente com dados anuais e considerando a sazonalidade existente analisou-se o impacto no índice topográfico ao se alterar a recarga mês a mês de conforme as médias apresentadas na Tabela 1, para isso recorreu-se a um fator de correção pelo qual a recarga daquele mês deveria ser multiplicada – neste caso, parte-se do princípio que a recarga é proporcional à pluviometria. Observa-se que as demais condições foram preservadas, sendo alterado apenas o perfil de recarga para efeito do índice proposto. Com isso pretende-se ter um indicador da influência da topografia mês a mês na região.

5. Resultados e discussão

5.1. Sobreposição do relevo e da Superfície freática.

O relevo obtido pelas imagens SRTM e a superfície freática obtida por Azevedo (2020) foram sobrepostos, obtendo Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 – Modelo do Relevo e da Superfície Freática – delimitação dos campos dunares

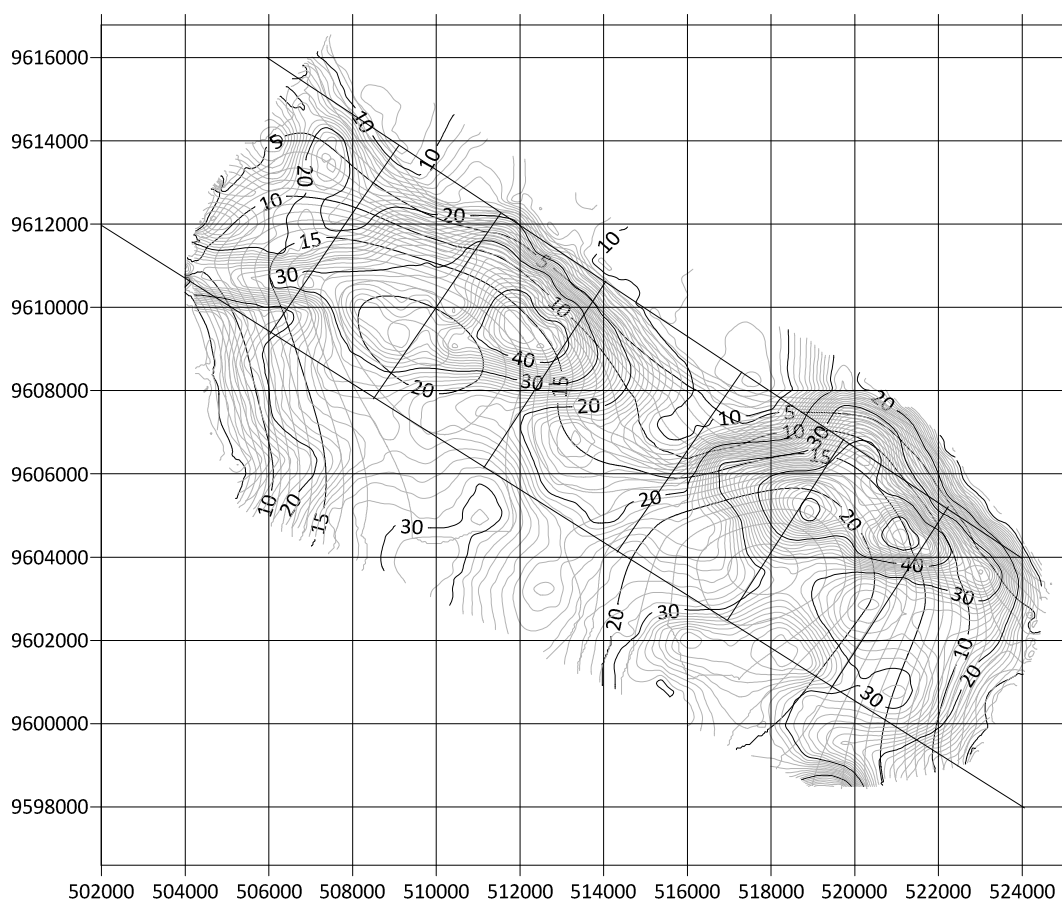
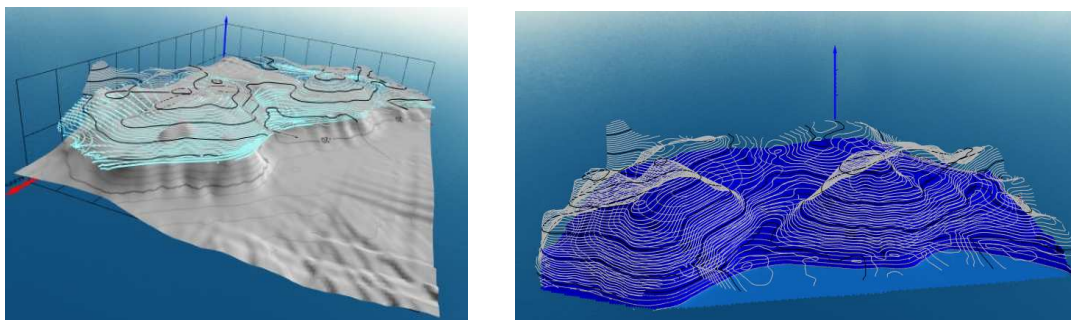


Figura 22 – Vista tridimensional modelos sobrepostos do cristalino, relevo e superfície freática – vista nordeste e norte.



5.2. **Locação dos Perfis**

Inicialmente os perfis centrais foram locados no topo da superfície freática nos dois campos de dunas conforme a figura, depois a cada perfil central foram criados dois perfis simétricos ao central respectivamente. Cada perfil tem é um corte de aproximadamente 5,5 km no terreno, perpendicular à linha da costa. Os perfis laterais distam 3,20 km do perfil central para o campo noroeste e 3,00 km para o campo sudeste - Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 – Superfície Freática com Perfis Centrais

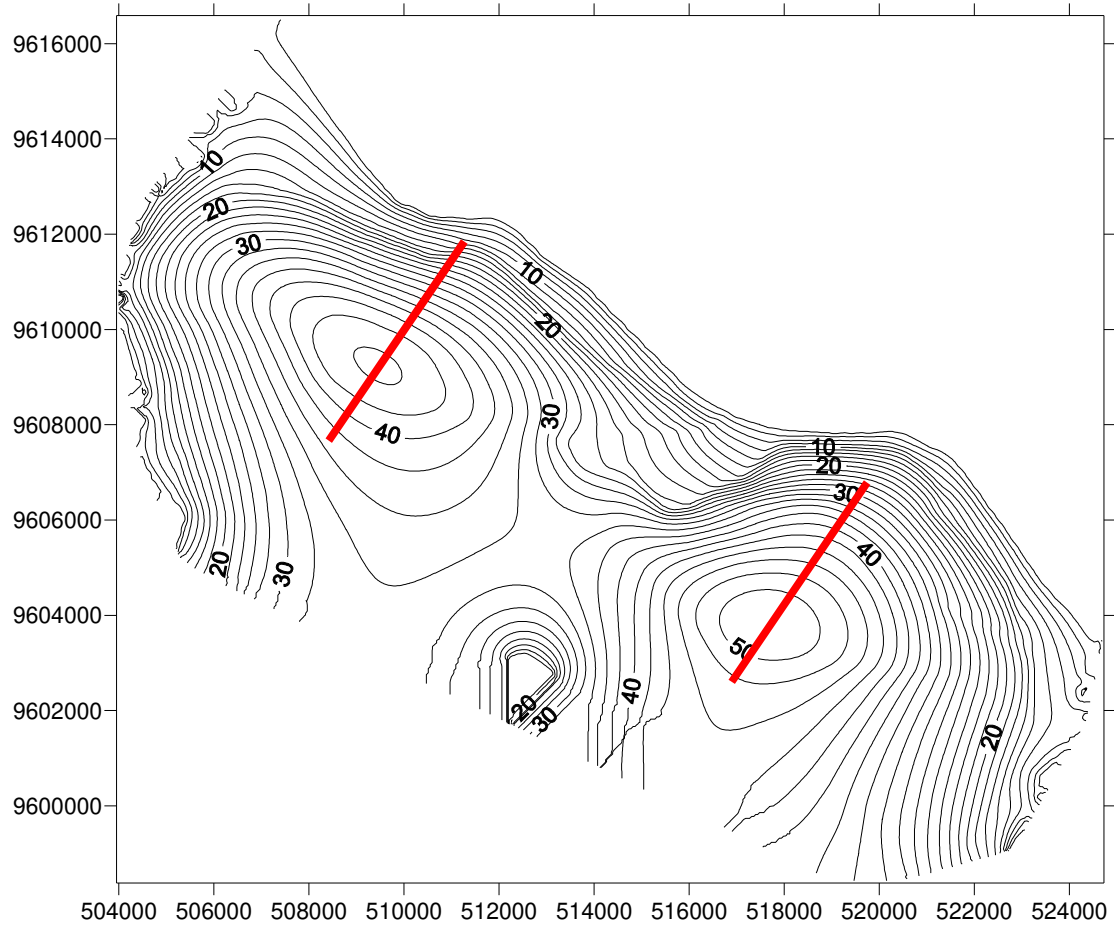
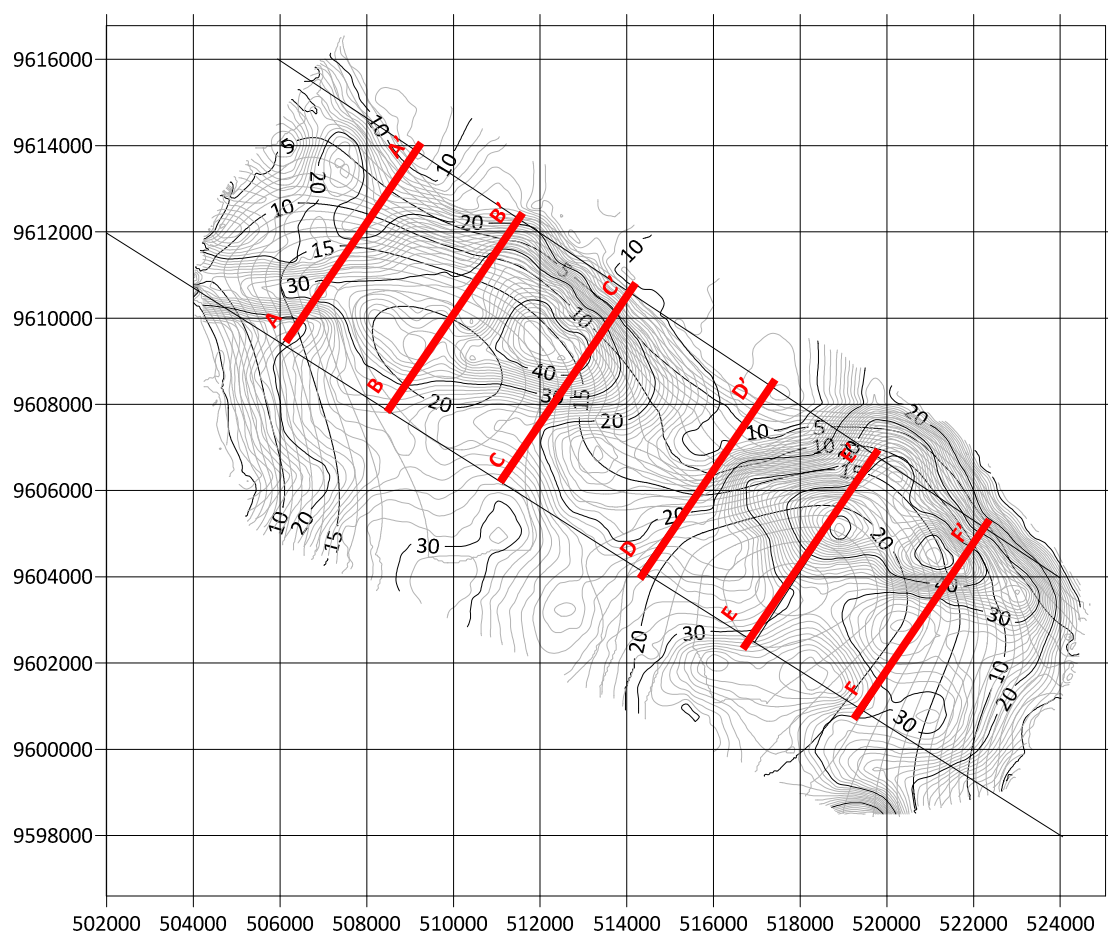


Figura 24 – Mapas Sobrepostos da superfície freática, topografia e perfis traçados.



5.3. Pluviometrias anual e mensal, fatores de correção

Para a análise do comportamento do índice alterando somente a recarga pelas médias mensais na região foram criados índices referente a razão do valor mensal dividido pela média anual para um período de um mês - Tabela 3.

Tabela 3 – Médias histórica pluviometria postos e fator de correção mensal.

Mês	Paracuru (mm)	São Gonçalo (mm)	Caucaia (mm)	Média	Fator de correção
Janeiro	112,8	93,8	128,9	111,83	1,14
Fevereiro	149,4	149,1	187,5	162,00	1,65
Março	280,5	226,7	315,9	274,37	2,79
Abril	305,7	237,7	298,7	280,70	2,86
Maio	197,5	116,4	161,4	158,43	1,61
Junho	118,9	74,8	112,6	102,10	1,04
Julho	61,3	39,5	53,4	51,40	0,52
Agosto	6,8	4,3	12,4	7,83	0,08
Setembro	5,3	3,7	8,9	5,97	0,06
Outubro	1,1	2,2	3,4	2,23	0,02
Novembro	1,2	1,5	2,6	1,77	0,02
Dezembro	18,3	18,1	25,7	20,70	0,21
Total anual	1258,8	967,8	1311,4	1179,3	
Média Mensal				98,3	

5.4. Primeiro campo de Dunas (Campo Noroeste)

Análise dos cortes AA', BB' e CC'.

Para o primeiro conjunto superior de Dunas temos os seguintes perfis topográfico e a superfície freática estimada para o caso médio anual, sobrepostos, conforme Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Figura 25 – Perfil AA', Topografia e superfície freática

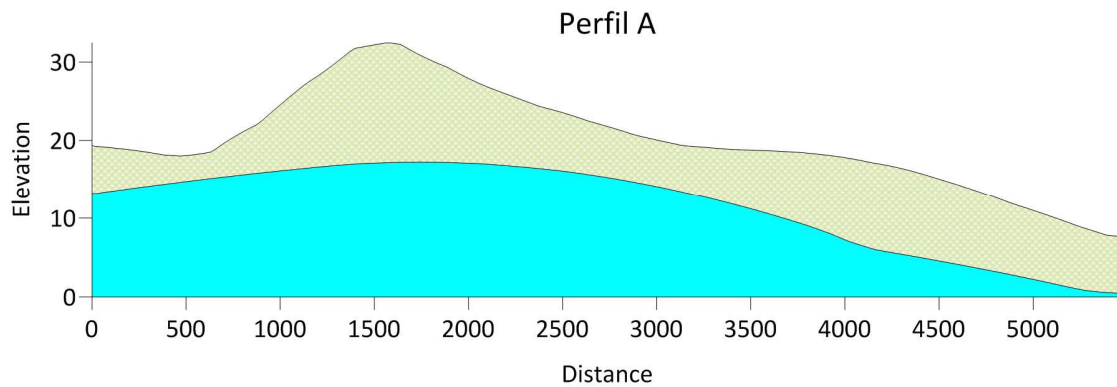


Figura 26 – Perfil BB', Topografia e superfície freática

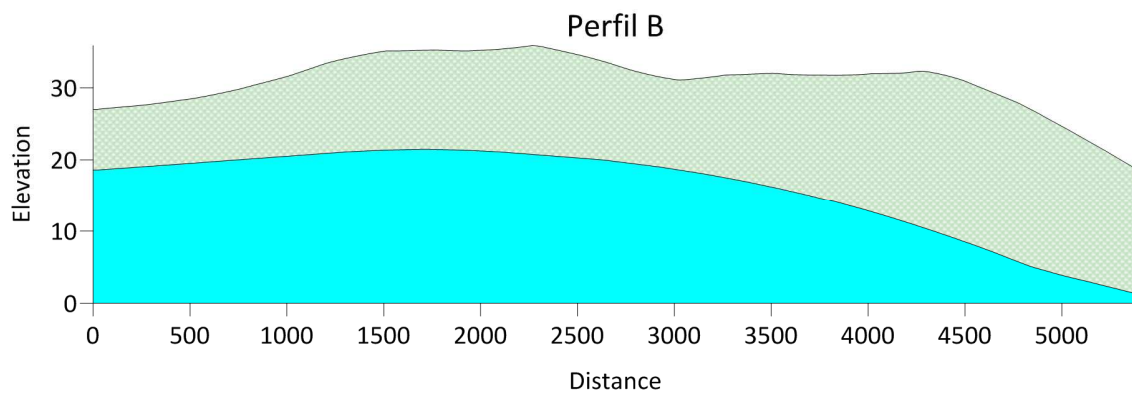
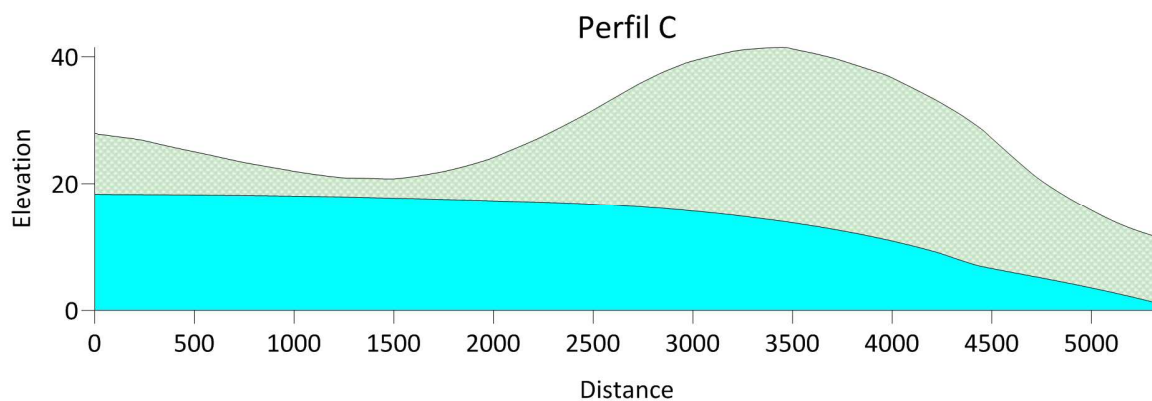


Figura 27 – Perfil BB', Topografia e superfície freática



Os índices de correlação topográfica observados para os três perfis são observados na Tabela 4.

Tabela 4 – índice de influência da Topografia Campo de Dunas Noroeste.

Perfil	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
	Circular	Paralelas		
AA'	0,64	0,32	0,48	Não
BB'	0,83	0,42	0,62	Não
CC'	0,49	0,25	0,37	Não
Média			0,49	Não

Observa-se que os três perfis, nessa análise com médias anuais de recarga, apontam para a não influência da topografia na constituição da superfície freática. Entretanto, quando estendemos o estudo para uma análise mensal, conforme exposto na metodologia, temos um novo quadro de influência da Topografia, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 5 – Valores Perfil A do índice de influência topográfica mensal

Perfil AA'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,73	0,36	0,55	Não
1,66	Fevereiro	1,06	0,53	0,80	Transição
2,79	Março	1,78	0,89	1,34	Topografia
2,86	Abril	1,83	0,92	1,37	Topografia
1,60	Maio	1,02	0,51	0,77	Transição
1,03	Junho	0,66	0,33	0,49	Não
0,52	Julho	0,33	0,33	0,33	Não
0,08	Agosto	0,05	0,02	0,04	Não
0,06	Setembro	0,04	0,02	0,03	Não
0,02	Outubro	0,01	0,01	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,01	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,14	0,07	0,10	Não
1,00	Anual	0,64	0,32	0,48	Não

Tabela 6 – Valores Perfil B do índice de influência topográfica mensal

Perfil BB'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,95	0,47	0,71	Não
1,66	Fevereiro	1,38	0,69	1,04	Transição
2,79	Março	2,32	1,16	1,74	Topografia
2,86	Abril	2,38	1,19	1,78	Topografia
1,60	Maio	1,33	0,66	1,00	Transição
1,03	Junho	0,86	0,43	0,64	Não
0,52	Julho	0,43	0,22	0,32	Não
0,08	Agosto	0,06	0,03	0,05	Não
0,06	Setembro	0,05	0,02	0,04	Não
0,02	Outubro	0,02	0,01	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,01	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,18	0,09	0,13	Não
1,00	Anual	0,83	0,42	0,62	Não

Tabela 7 – Valores Perfil C do índice de influência topográfica mensal

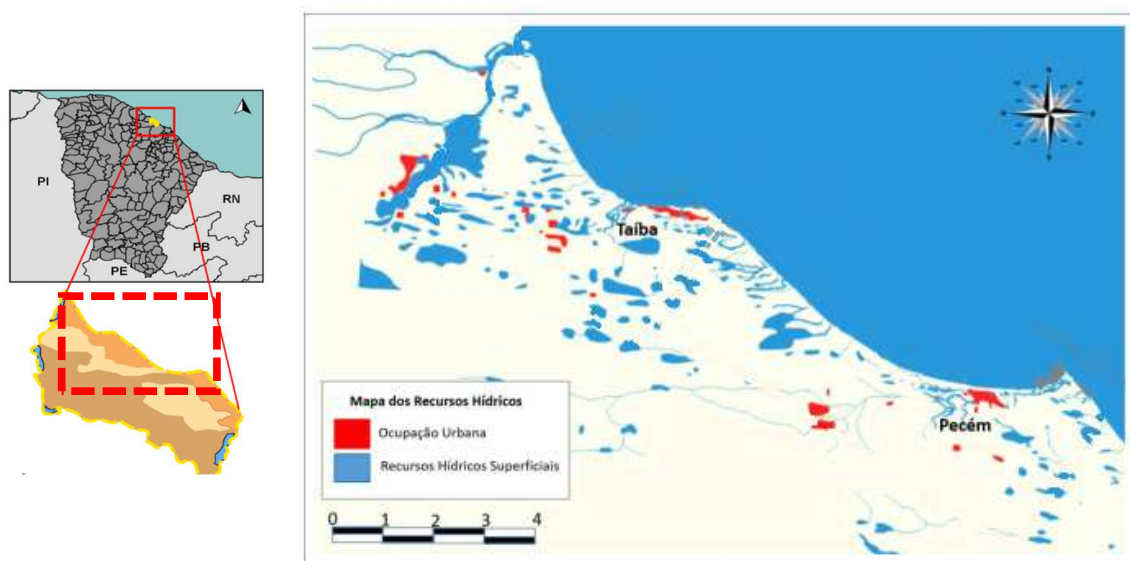
Perfil CC'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,56	0,28	0,42	Não
1,66	Fevereiro	0,82	0,41	0,62	Não
2,79	Março	1,38	0,69	1,04	Transição
2,86	Abril	1,42	0,71	1,06	Transição
1,60	Maio	0,79	0,40	0,59	Não
1,03	Junho	0,51	0,25	0,38	Não
0,52	Julho	0,26	0,13	0,19	Não
0,08	Agosto	0,04	0,02	0,03	Não
0,06	Setembro	0,03	0,01	0,02	Não
0,02	Outubro	0,01	0,00	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,00	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,10	0,05	0,08	Não
1,00	Anual	0,49	0,25	0,37	Não

Os perfis, analisados mensalmente apontam para uma diferença de status nos meses da quadra chuvosa (fevereiro a maio), onde dois dos perfis (AA' e BB') apontam claramente para que em março e abril a influência da topografia parece consolidada e nos meses de fevereiro e maio certa indefinição apontando para uma transição entre a influência e não influência da topografia. Os demais meses a não influência fica patente.

No perfil CC' a mudança de status acontece somente nos meses de março e abril para um status de transição, sem a consolidação da influência da topografia, em termos de pluviometria média mensal, os demais meses permanece com a não influência consolidada.

Interessante notar que a região é abundante de riachos e córregos temporários, bem como de lagoas interlunares intermitentes, que devem surgir no período de chuvas, permanecer durante algum tempo e desaparecer no período anual de estiagem, entretanto, dependendo do regime de chuvas de anos sucessivos é possível alguns desses córregos ou mesmo lagoas prolongarem sua existência. Os espelhos d'água intermitentes podem na região do Campo de Dunas Noroeste pode ser exemplificado a pelo mapa da Figura 28, extraído do trabalho de Portela, Freire e Morais (2017).

Figura 28 – Espelhos d'água intermitentes.



Fonte: adaptado de Portela, Freire e Morais (2017).

A influência da Recarga nessa mudança de status pode ser vista nos gráficos a seguir. Os dois gráficos apresentam o relevo e a carga observada para médias anuais. Na *Figura 28* *Figura 29* temos em pontilhado a carga teórica relativo a recarga estimada anualmente, apesar de abaixo da topografia a carga teórica se coloca acima da carga observada devido aos fluxos fora do eixo do corte BB', ou seja, devido a geometria do escoamento, entretanto fica visível a não influência da topografia.

Já na *Figura 30*, a recarga está calculada conforme a média mensal para mês de abril, indicando forte tendência a elevar o lençol com influência direta da topografia segunda a teoria sintetizada na figura.

A linha pontilhada nas *Figura 28* *Figura 29* e *Figura 30* representa a carga teórica devido à recarga esboçada a partir da equação da *Figura 6b*.

Figura 29 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga anual.

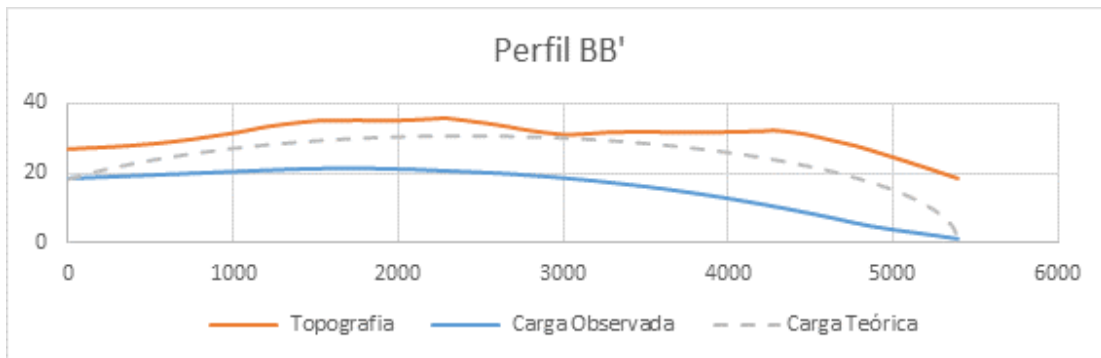
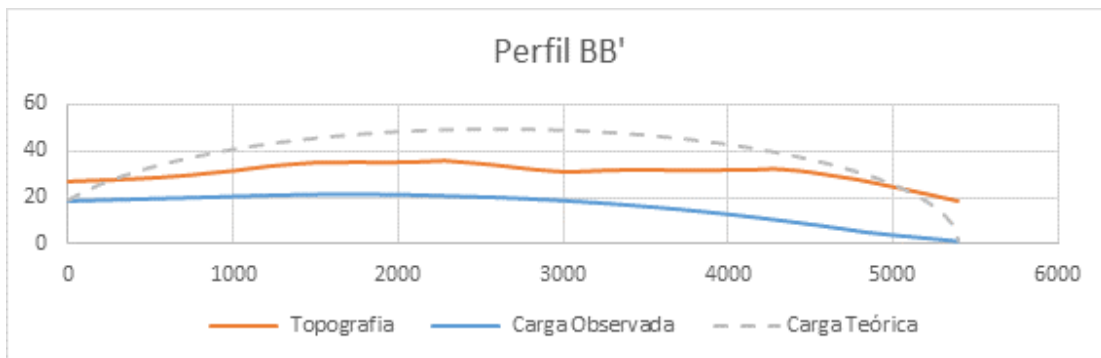


Figura 30 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga mensal (abril).



5.5. Segundo campo de Dunas (Campo Sudeste)

Os perfis DD', EE' e FF' dizem respeito ao segundo campo de dunas - Figura 31, Figura 32 e Figura 33.

Figura 31 – Perfil DD', Topografia e superfície freática

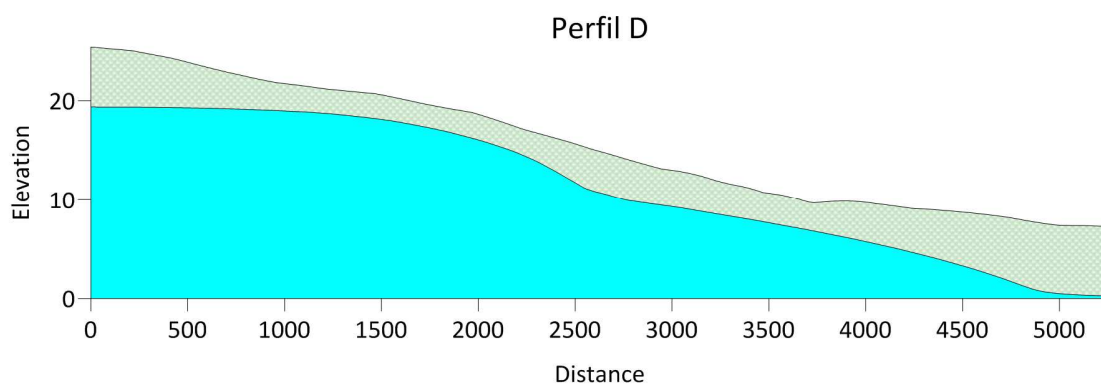


Figura 32 – Perfil EE', Topografia e superfície freática

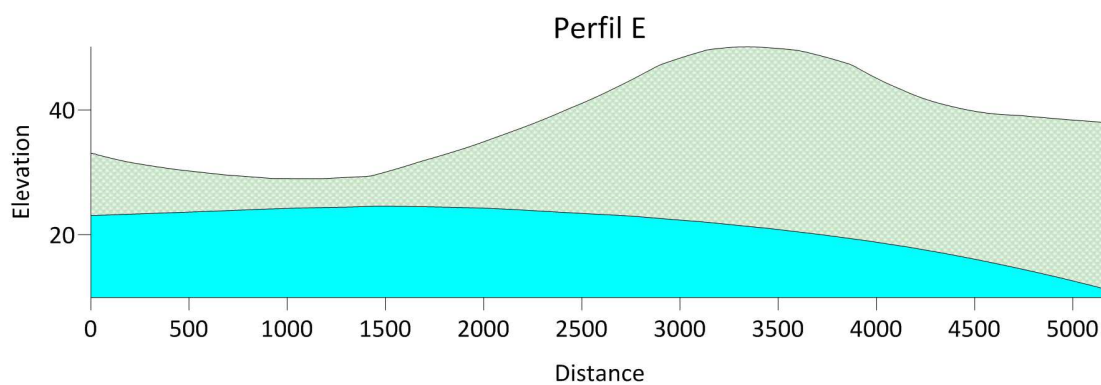
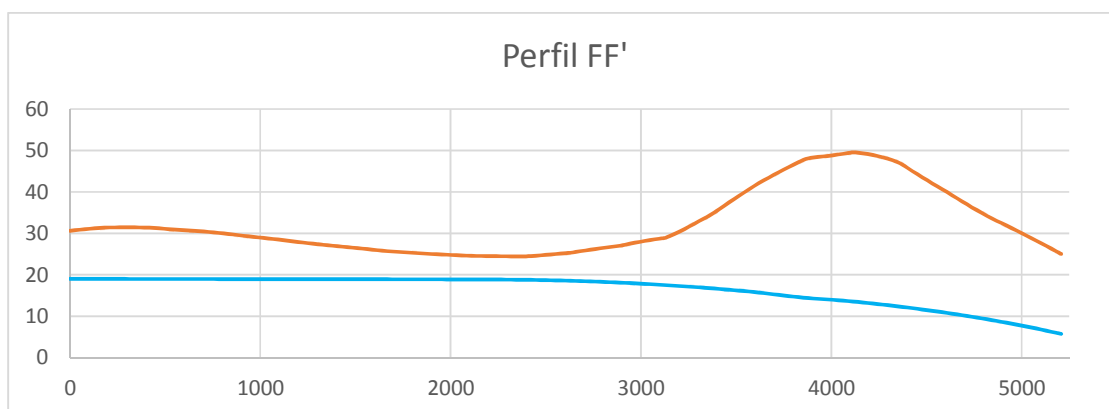


Figura 33 – Perfil FF', Topografia e superfície freática



Os três perfis do campo de dunas apontam também para a não influência da topografia para uma recarga média anual como pode visto na Tabela 8.

Tabela 8 – índice de influência da Topografia Campo de Dunas Sudeste.

Perfil	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
	Circular	Paralelas		
DD'	0,77	0,38	0,58	Não
EE'	0,72	0,36	0,54	Não
FF'	0,61	0,31	0,46	Não
Média			0,53	Não

Em termos de Recarga mensal, feita a devida correção conforme já exemplificado, temos de forma mais pronunciada a influência da topografia nos meses de março e abril (mais chuvosos), os três perfis apontam igualmente para essa mudança de status, estabelecendo também que os meses de fevereiro e maio se configuram como meses de transição, permanecendo o restante dos meses sem influência da topografia na superfície freática - Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9 – Valores Perfil D do índice de influência topográfica mensal

Perfil DD'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,88	0,44	0,66	Não
1,66	Fevereiro	1,28	0,64	0,96	Transição
2,79	Março	2,15	1,07	1,61	Topografia
2,86	Abril	2,20	1,10	1,65	Topografia
1,60	Maio	1,23	0,62	0,92	Transição
1,03	Junho	0,79	0,40	0,59	Não
0,52	Julho	0,40	0,20	0,30	Não
0,08	Agosto	0,06	0,03	0,04	Não
0,06	Setembro	0,05	0,02	0,03	Não
0,02	Outubro	0,02	0,01	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,01	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,16	0,08	0,12	Não
1,00	Anual	0,77	0,38	0,58	Não

Tabela 10 – Valores Perfil E do índice de influência topográfica mensal

Perfil EE'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,83	0,41	0,62	Não
1,66	Fevereiro	1,21	0,60	0,90	Transição
2,79	Março	2,02	1,01	1,52	Topografia
2,86	Abril	2,08	1,04	1,56	Topografia
1,60	Maio	1,16	0,58	0,87	Transição
1,03	Junho	0,75	0,37	0,56	Não
0,52	Julho	0,38	0,19	0,28	Não
0,08	Agosto	0,06	0,03	0,04	Não
0,06	Setembro	0,04	0,02	0,03	Não
0,02	Outubro	0,02	0,01	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,01	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,15	0,08	0,11	Não
1,00	Anual	0,72	0,36	0,54	Não

Tabela 11 – Valores Perfil F do índice de influência topográfica mensal

Perfil FF'					
Fator de correção	Mês	Geometria Condições de Contorno		Valor Central	Influência da Topografia
		Circular	Paralelas		
1,14	Janeiro	0,70	0,35	0,52	Não
1,66	Fevereiro	1,02	0,51	0,76	Transição
2,79	Março	1,71	0,85	1,28	Topografia
2,86	Abril	1,75	0,88	1,31	Topografia
1,60	Maiο	0,98	0,49	0,73	Não
1,03	Junho	0,63	0,31	0,47	Não
0,52	Julho	0,32	0,16	0,24	Não
0,08	Agosto	0,05	0,02	0,04	Não
0,06	Setembro	0,04	0,02	0,03	Não
0,02	Outubro	0,01	0,01	0,01	Não
0,02	Novembro	0,01	0,01	0,01	Não
0,21	Dezembro	0,13	0,06	0,10	Não
1,00	Anual	0,61	0,31	0,46	Não

A mudança de status pode ser melhor vista nos perfis contendo a carga teórica devido a recarga anual e mensal além da topografia e nível calculado pelo modelo para médias anuais.

Figura 34 – Perfil EE', superfície teórica devido a recarga anual.

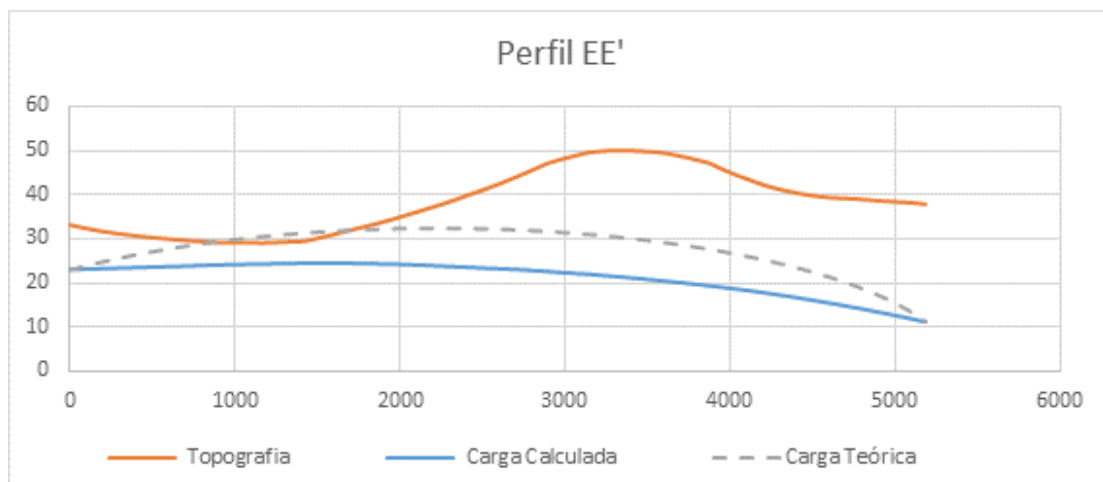
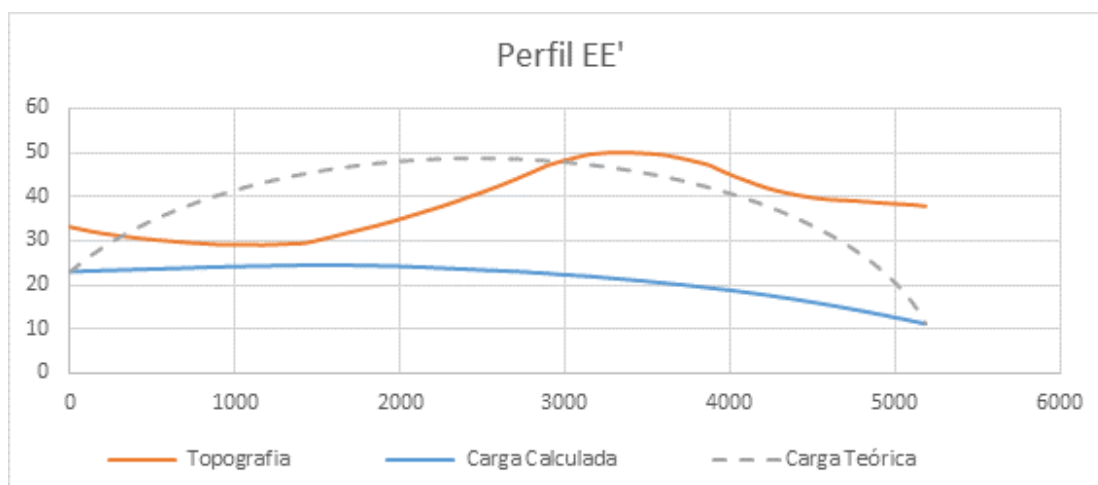


Figura 35 – Perfil BB', superfície teórica devido a recarga mensal (abril).



Novamente fica explicitado a tendência da elevação do lençol freático até este se configurar com a topografia da região nos moldes da Figura 34 e Figura 35. A linha pontilhada representa a carga teórica devido à recarga esboçada a partir da equação da Figura 6b.

5.6. Parâmetros para os Índices de HAITJEMA, H.M., MITCHELL

Na Tabela 12 apresenta-se um resumo dos índices calculados para os perfis apresentados conforme a recarga anual.

Tabela 12 – Resumo dos parâmetros calculados para os índices de influência da topografia

Parâmetros	Campo Dunas Noroeste			Campo Dunas Sudeste		
	Perfil A	Perfil B	Perfil C	Perfil D	Perfil E	Perfil F
R[m/s]	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08
K[m/s]	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04
L[m]	5478,01	5393,59	5340,53	5256,37	5184,92	5206,71
Carga inicial [m]	13,13	18,55	18,32	19,35	23,04	19,01
Carga Final [m]	0,45	1,25	1,04	0,27	11,19	5,73
Carga Base[m]	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
Khoriz [m/s]	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04
Kvert [m/s]	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05
H[m]	25,38	27,11	25,64	26,54	23,67	23,64
Índice Hipóteses Dupuit-Forchheimer [m] << 5500 m	80,27	85,72	81,08	83,94	74,86	74,75
R/K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L/H	215,80	198,97	208,30	198,02	219,03	220,25
L/d	221,31	311,99	177,59	290,31	247,29	207,33
$\Delta h/d$ (m=8)	0,64	0,83	0,49	0,77	0,72	0,61
$\Delta h/d$ (m=16)	0,32	0,42	0,25	0,38	0,36	0,31
Valor Médio	0,48	0,62	0,37	0,58	0,54	0,46

6. Conclusão

Em aquíferos livres o fluxo subterrâneo é determinado forma a superfície freática. Comumente, associa-se as configurações do relevo topográfico à superfície freática. Entretanto, esse fenômeno é pouco estudado, sendo desconhecidas em profundidade as circunstâncias hidrogeológicas em que ocorre.

A aplicação de um índice baseado na teoria de Dupui-Forchheimer surge como um indicar da ocorrência dessas condições no âmbito de aquíferos regionais.

Baseado em indicadores hidrogeológicos, sobretudo nas relações entre Recarga e condutividade hidráulica; e comprimento do aquífero pela sua espessura; apontou-se para a pouca influência da topografia no aquífero costeiro de dunas, considerando uma simulação calibrada com médias anuais de precipitação e recarga.

Ao estender a análise para uma alteração da recarga proporcional à pluviometria para cada mês do ano (médias históricas) observou-se que o status do aquífero muda ao longo do ano e que há forte tendência da superfície freática ser influenciada pela topografia nos meses de maior precipitação (março e abril), sendo os meses de fevereiro e maio meses em transição entre a influência e não influência da topografia, esta última predominante nos demais meses do ano.

Importante ressaltar que o surgimento de córregos e lagoas interlunares intermitentes é intensificado nos meses nos meses de maior influência do relevo das dunas no formato da superfície freática devido sua maior proximidade à superfície topográfica – fenômeno que corrobora o índice aplicado.

A dinâmica desses espelhos d'água intermitentes tende a ser fortemente influenciado pelos ciclos anuais de precipitação estabelecendo zonas úmidas geralmente nas regiões mais baixas, conforme apontado pelo índice aplicado.

O estudo da geometria das linhas de fluxo na construção dos índices de influência da topografia em cortes retos ao longo da superfície freática tende a ser promissor para obtenção de índices mais precisos visto que as linhas de fluxo impactam os pontos de descarga nas regiões mais baixas do relevo e interferem no fluxo fora do plano do perfil estudado, estabelecendo uma linha teórica da linha de carga acima da observada na simulação adotada.

Referências Bibliográficas

- ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. 4.ed. Ottawa: WLD Publications, 1995. 294p.
- AZEVEDO, J. M., **Caracterização Hidrológica e Modelagem Numérica de Fluxo do Aquífero Dunas Entre As Praias De Pecém e Taíba**, Dissertação, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, IFCE, Fortaleza, 2020.
- BEAR, J. 1972. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York: American Elsevier.
- BEAR, J. **Hdraulics of Groundwater**. Dover, New York, 569p, 1979.
- BLASKOVA, S., K. BEVEN, P. TACHECCI, AND A. KULASOVA. 2002. Testing the distributed water table predictions of TOPMODEL (allowing for uncertainty in model calibration): The death of TOPMODEL? **Water Resources Research** 38, no. 11: 1257–1268.
- DE VRIES, J.J., 2004. From speculation to science: The founding of groundwater hydrology in the Netherlands. In: Touret, J.L.R. & Visser, R.P.W. (eds): **Dutch pioneers of the earth sciences**. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (Amsterdam): 139–164.
- DESBARATS, A.J., C.E. LOGAN, M.J. HINTON, AND D.R. SHARPE. 2002. On the Kriging of water table elevations using colateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology** 255, no. 1: 25–39.
- DUPUIT, J. 1863. **E´tudes The´oriques et Practiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Decouverts et a` Travers les Terrains Perme´ables**, 2nd ed. Paris, France: Dunod.
- FEITOSA, F.A.C., **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHIDUFPE, 2000.
- FETTER, Jr C. W. Hydrogeology: A Short History, Part 2. **Ground Water**, v.42, 6, p.946-953, november-december 2004.
- FORCHHEIMER, P. 1886. **Uber die Ergiebigkeit von Brunnen-Anlagen und Sickerschlitzten. Zeitschrift des Architektenund Ingenieurs Vereins zu Hannover** 32, 539–564.

- FREEZE, R.A., AND CHERRY, J.A., 1979, **Groundwater**: Englewood Cliffs, NJ, Prentice- Hall, 604 p.
- HAITJEMA, H.M. 1995. **Analytic Element Modeling of Groundwater Flow**. San Diego, California: Academic Press.
- HAITJEMA, H.M., MITCHELL, B. (2005). Are water tables a subdued replica of the topography? **Ground Water**. 43 (6):781–786.
- HARR, M.E. 1962. **Groundwater and Seepage**. New York: McGraw-Hill.
- HUBBERT, M.K. 1940. The Theory of ground-water motion. **The Journal of Geology** 48, no. 8: 785–944.
- JORNAL O POVO, Estudos mostram que Ceará possui áreas ricas em água subterrânea- 05/10/2015. Disponível em:
<http://www.opovo.com.br/app/opovo/cotidiano/2015/10/05/noticiasjornalcotidiano,3514325/estudos-mostram-que-ceara-possui-areas-ricas-em-aqua-subterranea.shtml> Acesso em, 20 fev. 2016.
- KING, F. H. **Principles and Conditions of Movements of Ground Water**. USGS 19th Annual Report, Part 2, 1899.
- KIRKHAM, D. 1967. Explanation of paradoxes in Dupuit- Forchheimer seepage theory. **Water Resources Research** 3, no. 2: 609–622.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **MODFLOW: a modular three-dimensional finite difference ground-water flow model**. Washington: U. S. Geological Survey, 1988.
- MINELLA, J.P.G., MERTEN, G.H., Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.9, p.1575-1582, set, 2012.
- MITCHELL-BRUKER, S. 1993. **Modeling steady state groundwater flow and surface water interactions**. Ph.D. diss., School of Public and Environmental Affairs, Indiana University.
- MOORE, I.D. et al. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.
- MOORE, R.D., AND J.C. THOMPSON. 1996. Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept? **Water Resources Research** 32, no. 3: 663–669.

- PONTES, A. P., **Estudo da contaminação, vulnerabilidade à poluição e fluxo do aquífero no entorno do Cemitério São João**, Dissertação, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, IFCE, Fortaleza, 2010.
- PORTELA, J. P.; FREIRE, G. S. S.; MORAIS, M. V. A. R. Análise do uso e ocupação do litoral de São Gonçalo do Amarante – Ceará – Brasil, **Revista de Geociências do Nordeste**, Volume 3, Nº 2, 2017.
- SHAMAN, J., M. STIEGLITZ, V. ENGEL, R. KOSTER, AND C. STARK. 2002. Representation of subsurface storm flow and a more responsive water table in a TOPMODEL-based hydrology model. **Water Resources Research** 38, no. 8: 1156–1172.
- STRACK, O.D.L. 1989. Ground Water Mechanics. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- TOTH, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research** 68, no. 16: 4795–4812.
- WINSTON, R.B., 2019, **ModelMuse version 4—A graphical user interface for MODFLOW 6**, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5036, 10 p.