

ÍTEM 2 – DIAGNÓSTICO

ÍTEM 2.7 – ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS BÁSICO COM DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E RELATÓRIOS

**NATAL/RN,
Outubro/2009**

DIAGNÓSTICO DO PLANO DIRETOR DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DA CIDADE DO NATAL

ÍTEM 2.7 - ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS RELATÓRIO CONSOLIDADO

**NATAL/RN,
Outubro/2009**

EQUIPE DO PLANO DIRETOR DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS (PPDDMA)

Demétrio Paulo Torres – Secretário Municipal de Obras e Infra Estrutura

Luciano Rebello da Cunha Melo – Secretário Adjunto de Planejamento de Obras

GRUPO DE TRABALHO LOCAL

Vital Gorgônio da Nóbrega Engenheiro Civil – Coordenador – SEMOPI

José Edilson Bezerra – Engenheiro Civil – Sub-Coordenador – SEMURB

Francisco Werton Diógenes - Engenheiro Civil – SEMOPI

Ivanilde Ramos da Silva – Engenheira Sanitarista - SEMSUR

Uéliton Cabral da Silva – Geógrafo – SEMOPI

EQUIPE TÉCNICA L. R. ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Alberto de Melo Rodrigues – Engenheiro Civil CREA 210.405.683-7 (Coordenador Geral)

Diógenes Santos de Sena – Eng. Civil e Mestre em Eng. Sanitária CREA 210.136.107-8

Marcos Roberto de Melo R. Filgueira – Engenheiro civil CREA 210.416.831-7

Geová Alves da Costa– Técnico em Topografia CREA 210.266.657-4

Mércia Targino de Oliveira – Técnica em Edificações

Roberto Silva de Oliveira – Cadista

Eberth Ferreira de Oliveira – Cadista

EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL PELO RELATÓRIO

João Abner Guimarães Jr. (Coordenador)

Eng. Civil - CREA 881-D (RN) – Doutor em Hidráulica e Saneamento

Roberto Pereira

Geólogo – CREA 140.406.499-0 – Doutor em Geociência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	02
3. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE NATAL	06
3.1. Introdução	06
3.2. Formação Barreiras	07
3.3. Sedimentos eólicos	08
4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	10
4.1. Introdução	10
4.2. Funcionamento hidrodinâmico do aquífero Dunas-Barreiras	12
4.2.1. Interconexão hidrodinâmica	12
4.2.2. Parâmetros Hidráulicos das Dunas	13
4.2.3. Parâmetros Hidráulicos da Formação Barreiras	14
4.2.4. Potenciometria	15
4.2.5. Profundidade das Águas	20
4.2.6. Taxas de Infiltração	22
4.3. Contaminação das Águas e os Nitratos	22
5. ASPECTOS HIDROLÓGICOS DAS LAGOAS	27
6. EXPLOTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	32
6.1. Diagnóstico da Situação do Abastecimento de Águas Subterrâneas do Município do Natal	32
6.2. Áreas de Exploração Atual	35
6.3. Alternativas de Abastecimento de Água Subterrânea	37
7. INFILTRAÇÃO DA ÁGUA DE DRENAGEM PLUVIAL NO SOLO	35
7.1. Introdução	38
7.2. Capacidade de infiltração	39
7.3. Ensaio de infiltração em Natal	40
7.3.1. Taxas de infiltração em Natal ..	41
7.3.2. Permeabilidade da área de recarga efetiva do aquífero de Natal	41
7.4. Capacidade de infiltração superficial de referência nas bacias de	46

drenagem de Natal	
8. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	48
9. AVALIAÇÃO DA RECARGA DO AQUIFERO INDUZIDA PELO SISTEMA DE DRENAGEM DA CIDADE	48
9.1. Bacias de Drenagem de Natal	48
9.2. Avaliação de recarga induzida pelo sistema de drenagem	50
9.3. Impactos de recarga induzida no aquífero	51
10. RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO E INFILTRAÇÃO	51
10.1. Introdução	51
10.2. Método de Green Ampt aplicado a infiltração a partir de um reservatório	52
10.3. Infiltração d'água no reservatório com carga hidráulica constante	53
10.4. Infiltração d'água no reservatório com carga variável	54
10.5. Infiltração induzida por poços	55
10.6. Infiltração em lagoas com afloramento do lençol freático	56
10.7. Infiltração lateral em reservatórios	56
10.8. Aplicação da metodologia	57
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa geológico geomorfológico do município do Natal. Adaptado de Melo (1995) e Melo (1998)	03
Figura 3.1 - Subdivisão em sub-bacias da faixa sedimentar costeira de Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte (Mabesoone & Alheiros, 1991)	06
Figura 3.2 - Estratigrafia da região do litoral Oriental do RN (Fonseca <i>et al.</i> , 1997)	07
Figura 4.1 – Sistemas hidrográficos do Rio Grande do Norte e localização do município de Natal nas bacias 16-5, Faixa Litorânea Leste de Escoamento Difuso (Zona Sul) e 07, bacia do rio Doce (Zona Norte) (SRPE, 1995)	11
Figura 4.2 – Potenciometria do sistema aquífero Dunas – Barreiras (Adaptado de Melo, 1995 e 1998)	17
Figura 4.3 – Potenciometria dos bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN. Janeiro de 2000 (Carvalho Jr. 2001)	18
Figura 4.4 – Potenciometria dos bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN. Setembro de 2000 (Carvalho Jr. 2001),., 20	19
Figura 4.5 – Curvas de isopropundidade das águas subterrâneas da Zona Sul – Fevereiro de 1993 – (Melo, 1995) e Zona Norte de Natal – Fevereiro de 1993 – (Melo, 1998)	20
Figura 4.6 – Potenciometria do nível dinâmico do Sistema dunas – Barreiras (Melo, 1995), mediante o funcionamento de poços da CAERN na região de Lagoa Nova	21
Figura 4.7 – Relação entre poços desativados e ativos na CAERN. Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)	24
Figura 4.8 – Curvas de iso-concentração de nitratos nas águas subterrânea do município do Natal. Adaptado de Vasconcelo (2002) para a Zona Sul e Melo (1998) para a Zona Norte	26
Figura 5.1 – Vista panorâmica da BR 101 em área de sub-bacia confinada, na altura do conjunto habitacional Mirassol em período chuvoso junho/2000 (Esquerda) e no período de verão - set/2000 (Direita). Fonte: Medeiros, 2001	27
Figura 5.2 – Seção hidrogeológica mostrando lagoas suspensas (Melo, 1995)	30
Figura 5.3 – Formação de lagoas naturais devido a presença de compartimentação	

hidrogeológica natural (Melo, 1995)	31
Figura 5.4 – Cenário hidrogeológico esquemático da região compreendida entre os bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN (Carvalho Jr. 2001)	31
Figura 6.1 – Origem da água consumida em Natal para a Zona Sul (A) e Zona Norte (B). Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)	32
Figura 6.2 – Áreas produtoras de águas subterrâneas da CAERN na Zona Sul e Zona Norte da cidade do Natal. Fonte: banco de dados do IGARN (2007)	36
Figura 7.1 – Capacidade de infiltração do solo a 2 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal.....	43
Figura 7.2 – Capacidade de infiltração do solo a 4 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal.....	44
Figura 7.3 – Capacidade de infiltração do solo a 6 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Variação de espessura das dunas nos poços de abastecimento da CAERN (Melo 1995)	09
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica (K) conforme diversos trabalhos para a Zona Não Saturada (ZNS) e Zona Saturada (ZS)	13
Tabela 4.2 – Situação dos poços de abastecimento da Zona Sul do Natal. Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)	24
Tabela 6.1 – Dados operacionais sobre o abastecimento de água para o município do Natal – RN	33
Tabela 6.2 – Evolução da contaminação por nitratos na Zona Sul do Natal (Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)	34
Tabela 7.1 - Parâmetros da fórmula de HORTON.....	39
Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica (K) para a Zona Norte.....	41
Tabela 7.3 - Ensaios de permeabilidade na área de recarga do aquífero de Natal – Zona Sul.....	42
Tabela 7.4 – Taxas de infiltração de referência das bacias de Natal	47
Tabela 9.1 – Bacias de drenagem da Zona Norte de Natal (Estudos Hidrológicos do PDDMA: 1º Relatório).....	48
Tabela 9.2 – Bacias de drenagem das zonas Leste/Oeste/Sul (Estudos Hidrológicos do PDDMA: 1º Relatório).....	49
Tabela 9.3 – Balaço hídrico das bacias fechadas urbanizadas de Natal	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 Lagoas naturais e artificiais da Cidade do Natal (Medeiros, 2001)	28
Quadro 10.8.1 – Quadro da evolução da taxa de infiltração no transcorrer de tempo.....	58

1. INTRODUÇÃO

O presente documento trata-se do Relatório consolidado dos Estudos Hidrogeológicos da Etapa do Diagnóstico do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal – PDDMA.

A importância desses estudos deve-se a relevância das captações subterrâneas no município de Natal para o abastecimento de água de sua população, tendo em vista que atualmente mais de 70% do consumo de água das zonas Leste, Oeste e Sul e 30% da Zona Norte são provenientes de captações subterrâneas no interior do Território Municipal.

O presente Estudo levanta os aspectos geológicos e geomorfológicos, a caracterização do aquífero e a Identificação do comportamento do fluxo subterrâneo e o levantamento da produção hídrica no interior do Município. Inclusive, foi feita uma avaliação do processo, em curso, de contaminação das águas do aquífero de Natal por nitrato, oriunda de poluição provocada por lançamentos de efluentes de esgotos domésticos no sub-solo do território municipal.

Os estudos envolveram o levantamento dos perfis de sondagem e testes de infiltração de poços das bacias de drenagem estudadas no PDDMA e o desenvolvimento de metodologia de avaliação, para efeito de projeto, da taxa de infiltração de reservatórios de retenção dos sistemas de drenagem de Natal.

Outro aspecto estudado, de grande relevância, foram os impactos da recarga do aquífero induzida a partir de lagoas de infiltração do sistema de drenagem da Cidade, prática bastante comum na Região. Para isso, foram pesquisadas as condições de infiltração natural nas bacias de drenagem e as artificiais a partir de lagoas de infiltração com drenos profundos.

2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Conforme Medeiros (2001), a cidade do Natal possui um relevo mais ou menos plano, registrando pequenas elevações, com elementos bem definidos que diferenciam sua paisagem nos seguintes compartimentos de relevo (Figura 2.1): cordões de dunas fixas, dunas móveis, superfície de aplainamento de dunas descaracterizadas, planície fluvio-marinha do estuário do Potengi, recifes de arenito ou “beach rock”, falésias, rios, riachos e lagoas.

A planície flúvio-marinha, formada pelo estuário dos rios Potengi, Jundiá e o Doce, corresponde às áreas de mangue e aluviais que sofrem influência das marés. Essa área vem sofrendo, ao longo dos tempos, um processo de descaracterização pela ação do homem, degradando-se em função do crescimento de atividades econômicas, que inicialmente foi a extração do sal marinho impulsionando alterações ambientais nesse ecossistema, assim como o uso do estuário para a procriação de camarão em cativeiro. Mais recentemente, tem sido o processo de expansão urbana que vem afetando esse ecossistema, utilizando-se do mesmo como bacia receptora de efluentes domésticos e industriais. Ademais, salienta-se que, com a ampliação portuária, e a construção de margens artificiais, tem-se feito a eliminação de rochas submersas para a viabilização de navios de grande calado.

Com respeito aos campos eólicos encontram-se dunas com cristas em formatos variados, além de apresentar vales fechados gerando uma série de micro-bacias de drenagens, onde afloram as lagoas temporárias com suprimento d’água oriundo por ocasião das precipitações pluviométricas e da elevação da superfície do lençol freático.

MAPA GEOLÓGICO - ZONA NORTE E SUL

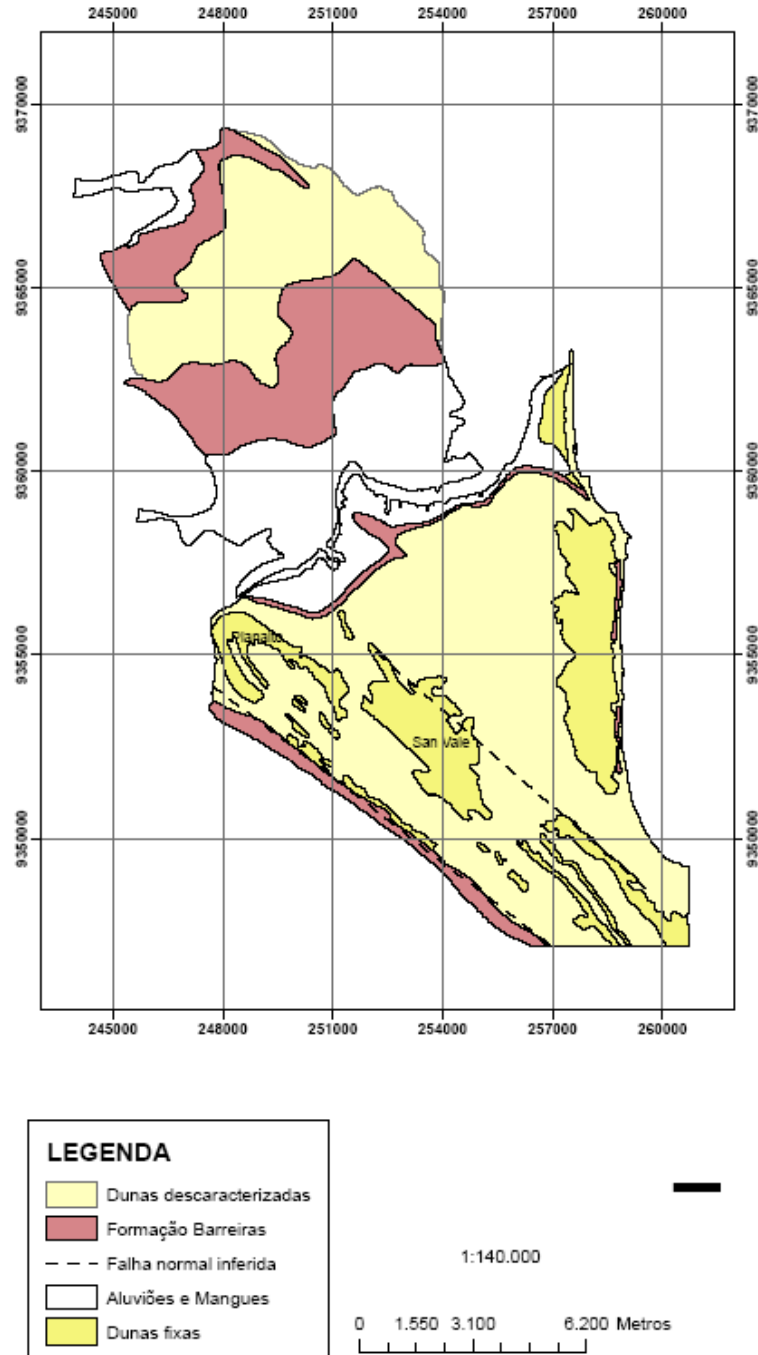


Figura 2.1 – Mapa geológico e geomorfológico do município do Natal. Adaptado de Melo (1995) e Melo (1998).

Na Zona Sul destaca-se dois cordões de dunas fixas principais que se sobressaem no relevo da cidade. No limite leste, destaca-se um cordão de dunas separadas por corredores que em seu conjunto constituem um sistema único de direção norte-sul, denominadas de Parque das Dunas e apresentam um relevo ondulado com cotas altimétricas maior que 50 metros. Caracteriza-se por dunas parabólicas com vertentes suaves a barlavento e mais abrupto no sentido de sotavento, obedecendo a direção dos ventos de SE para NW. São cordões dunares de idade sub-recente, situados após os campos de dunas móveis e sua fixação é consequência da perda de intensidade dos ventos alísios, que favorecem o desenvolvimento de uma cobertura vegetal original, classificada como arbustiva-arbórea e densa. O segundo conjunto, com sentido geral 120° Az, refere-se às dunas parabólicas do San Vale e Planalto avançando até o rio Potengi, além daquelas longitudinais da região das Lagoinhas. As características destas feições, como a cobertura vegetal e a morfologia, estão parcialmente erodidas e destruídas pela ocupação humana (movimentos de terra e construções).

As dunas móveis, não vegetadas e com alturas médias entre 30 a 40 metros, são desprovidas de vegetação, e apresentam uma grande intensidade de processos eólicos, tanto erosivos, como deposicionais, as quais situam-se na planície de deflação até o início das dunas fixas, sendo alimentadas pelos sedimentos praias, caracterizados como areias quartzosas, oriundas das planícies de deflação.

A superfície de aplainamento corresponde às dunas descaracterizadas onde se encontra edificada a parte central da Zona Norte e da Zona Sul do Natal. Neste último caso com cotas variando entre 30 e 50 m. Parte desta superfície poderá corresponder aos tabuleiros costeiros da Formação Barreiras, como é o caso da Zona Norte. Este compartimento representa dunas arrasadas pelas atividades antrópicas, pois o terreno é ainda suavemente ondulado marcados pelos divisores topográficos (antigas cristas das dunas) e vales, onde se encontram diversas lagoas, tais como, lagoa do Centro Administrativo, do Preá e São Conrado, entre outras. Diversas lagoas, como do próprio Centro Administrativo de Natal e da região do San Vale não afloraram nos últimos anos, apesar da ocorrência de precipitações

elevadas tende em vista, provavelmente, o aumento de exploração, pela CAERN, das águas subterrâneas na Zona Sul promovendo um rebaixamento do lençol freático, o que favorece um aumento da recarga induzida, já que as perdas por evaporação das lagoas são minimizadas. Por outro lado, estes mesmos pontos baixos representando os antigos vales interdunares, sofrem processos de alagamentos devido aos escoamentos rápidos como resultados das impermeabilizações da cidade, alterando a elevada capacidade de infiltração das dunas. Isto pode ser atestado pela pouca presença de drenagem natural, como é o caso apenas dos riachos da Lavadeira, do Baldo e das Quintas.

Na Zona Norte, as lagoas associadas, direta e indiretamente, ao sistema hidrográfico do rio Doce ocorre como conseqüência do surgimento de corredores interdunares, formando e contornando as lagoas: Azul, Dendê, Pajussara e Guamoré. Esses sedimentos, em alguns locais, alcançam dimensões notáveis, visto que sua frente pode chegar até quarenta metros acima do substrato da Formação Barreiras.

Os recifes de arenito são denominados de *beach rocks*, compostos de grãos de quartzo bem cimentados por carbonatos, representando antigas linhas de praia (Bezerra et al. 1993). Estes se mostram sob a forma alongada dispostos paralelos à linha de costa, aflorando principalmente nas praias do Meio, Forte e Alagamar.

As falésias ocorrem tanto sob a forma de falésias vivas ou mortas, as quais se sustentam nos sedimentos lateritizados da Formação Barreiras. Estas têm alturas variadas, sendo em média 3 m, mas podem atingir desníveis expressivos de mais de 20 m, como a que se encontra em frente a praia do meio. As vertentes, neste caso de origem pluvial ou mesmo fluvial, são aquelas situadas junto às margens dos rios e que geralmente são também desenvolvidas nas rochas com cimento ferruginoso da Formação Barreiras.

3. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE NATAL

3.1. Introdução

Em revisão geológica da faixa costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte, Mabesoone & Alheiros (1991) apresentam uma compartimentação desta porção sedimentar em sub-bacias, com base em características litológicas e estruturais (Figura 3.1). O município de Natal situa-se justamente no domínio da sub-bacia Natal.

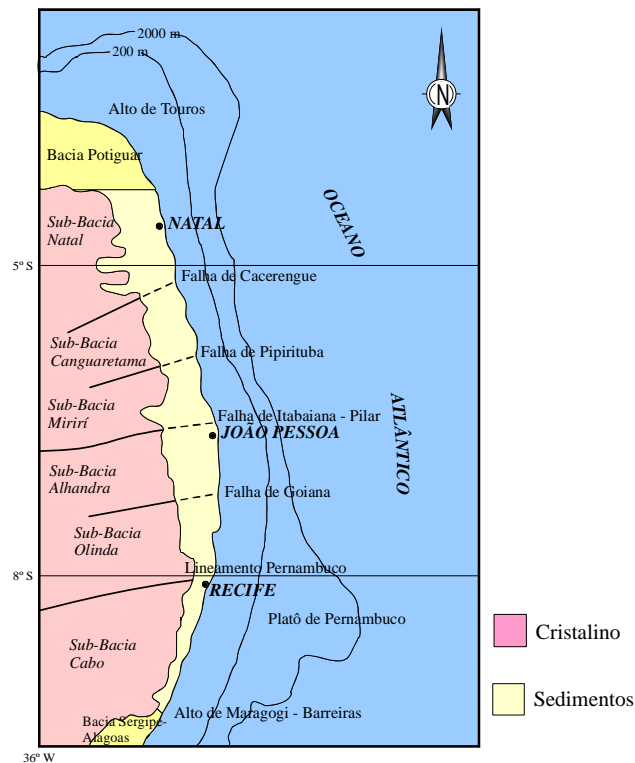


Figura 3.1 - Subdivisão em sub-bacias da faixa sedimentar costeira de Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte (Mabesoone & Alheiros, 1991).

Uma estratigrafia de referência para esta região (Figura 3.2) foi elaborada por Fonseca *et al.* (1997) a qual revela rochas do embasamento pré-cambriano, rochas sedimentares mesozóicas (arenitos calcíferos, margas e calcários) e, por fim, rochas sedimentares e sedimentos cenozóicos. Por último, os vales dos rios são ocupados

pelos aluviões, constituídos de cascalhos, limos, siltes, argilas e sedimentos de mangues.

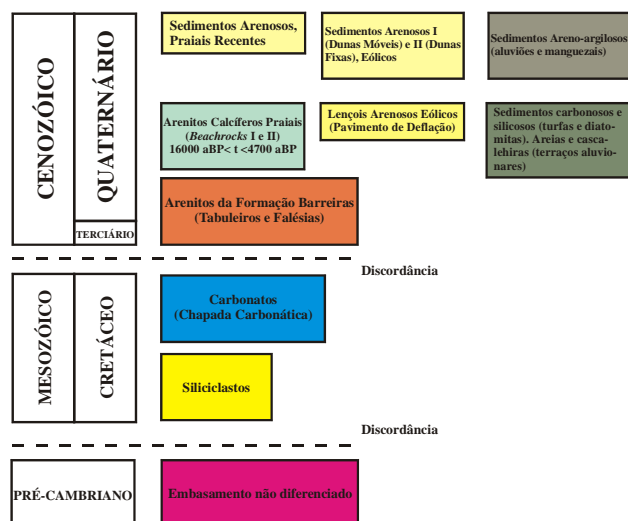


Figura 3.2 - Estratigrafia da região do litoral Oriental do RN (Fonseca *et al.*, 1997).

3.2. Formação Barreiras

De acordo com a Figura 2.1, em superfície a Formação Barreiras aflora de maneira restrita na Zona Sul de Natal e de forma mais expressiva na Zona Norte, como por exemplo, nas margens do rio Potengi, rio Pitumbu, margem direita do rio Doce, nas imediações da lagoa de Extremoz, bem como ao longo da Via Costeira, formando algumas vezes falésias na linha de costa e vertentes nas margens dos rios, embora sejam típicas as feições de tabuleiros no litoral Oriental, como é o caso da parte mais elevada e central no domínio da Zona Norte, onde em parte se encontram recoberta pelos sedimentos eólicos recentes. Conforme o trabalho de Duarte (1995) parte do que se considera como Formação Barreiras neste setor poderá corresponder às dunas antigas arrasadas de coloração avermelhadas chamadas de Formação Potengi. Independente dessa interpretação representam as coberturas latossolizadas de Nunes (1996). Segundo o IPT (1981 e 1982) as rochas clásticas continentais pouco consolidadas da Formação Barreiras a sul de Natal

apresentam, em superfície, tanto nos cortes das estradas como nos perfis das falésias, um pacote heterogêneo de sedimentos areno-siltico-argilosos pouco consolidados e fracamente selecionados.

Em sub-superfície, os trabalhos do IPT (op. cit.) e Melo (1995 e 1998) mostram um comportamento diferente da Formação Barreiras entre os domínios: Zona Norte e Zona Sul. Desse modo, na Zona Sul, a partir da base sobre as rochas carbonáticas, ocorre uma seqüência de arenitos de granulação grossa e, em direção ao topo, uma diminuição granulométrica composta de rochas areno-argilosas, argilo-arenosas, siltico-argilosas e intercalações de arenitos de granulometria fina a média, mas com grande variação de fácies tanto lateral como verticalmente, perfazendo uma espessura total variando de 60 m a 116 m. Como conseqüência, localmente poderá ocorrer intercalações de lentes argilosas ou areno-argilosas, com certa continuidade, a qual deverá ter um caráter de semi-confinamento do ponto de vista hidráulico. Por outro lado, a Norte de Natal, observa-se que a seqüência Terciária do Barreiras, juntamente com as aluviões e dunas, formam um pacote sedimentar predominantemente arenoso, onde são pouco freqüentes ou mesmo raras as intercalações argilosas, conferindo um caráter típico de aquífero livre, cuja espessura varia de 50 a 110 m.

3.3. Sedimentos eólicos

O mapa geológico e geomorfológico do Natal (Figura 2.1) mostra que a maior parte do município é praticamente recoberto pelos sedimentos eólicos os quais se encontram como dunas fixas, móveis e descaracterizadas pelas atividades antrópicas, formados pelas areias quartzosas finas a média de coloração variada conforme a idade cronológica. Isto porque, as dunas mais antigas (denominadas de Formação Potengi por Villaça *et al.*, 1986) tendem a ser avermelhadas, as mais novas esbranquiçadas e as de idade intermediárias apresentam uma coloração amarelada. Em algumas situações podem apresentar algum conteúdo argiloso como provável intemperização da Formação Barreiras constituindo hoje as coberturas

latossólicas de Nunes (1996). Esta unidade, porém, caracteriza-se por uma fácies basal conglomerática, sobreposta por uma fácies areno-conglomerática, ocorrendo localmente e expostas em encostas.

Segundo Melo (1995), na Zona Sul, as dunas apresentam espessuras variadas devido à sua própria geometria, de tal modo que os dados de poços do sistema de captação pública d'água da CAERN mostraram uma espessura mínima de 3,0 m e máxima de 51,0 m, ambas coincidentemente na captação Lagoa Nova II, mas a espessura média ficou em torno de 20,0 m. A Tabela 3.1 construída por este mesmo autor detalha estes dados.

Finalmente, segundo o IPT (1982), a granulometria e o alto grau de seleção e de arredondamento, confere a esses sedimentos excelentes características hidráulicas, refletindo-se diretamente na alta permeabilidade e velocidade de infiltração. Desse modo, desempenham excelente papel como reguladores dos recursos hídricos, na região costeira, transferindo ao aquífero inferior por infiltração considerável volume anual de água.

Tabela 3.1 – Variação de espessura das dunas nos poços de abastecimento da CAERN (Melo 1995).

Captação	Quantidade de poços	Variação de espessura (m)	Espessura média (m)
Lagoa Nova I	11	06 a 22	15
Lagoa Nova II	09	03 a 51	24
Dunas	15	06 a 30	19
Novo Campo	17	05 a 43	23
Ponta Negra	04	17 a 28	21
Cidade Satélite	06	06 a 32	20
Felipe Camarão	08	17 a 26	21
Pirangi	04	13 a 20	17
Média Geral =			20

4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

4.1. Introdução

O município de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte, está inserido nas chamadas micro-bacias de escoamento difuso do Litoral Leste e parte das bacias do rio Doce, Pirangi e Potengi (Figura 4.1). Segundo Feitosa & Melo (1997), esta região está incluída na chamada região dos vales úmidos do Rio Grande do Norte, a qual está representada por uma faixa costeira leste que se estende desde a bacia do Boqueirão, no município de Touros (100 km a norte de Natal), até a fronteira com a Paraíba, exibindo uma largura média de 30 Km e acrescentam, ainda, que as principais características que justificam a designação supracitada que foi atribuída a este setor são:

- Pluviometria média anual entre 1.200 e 1.500 mm, considerada a mais alta do Estado;
- Ocorrência de formações sedimentares de alta capacidade de infiltração e armazenamento de águas subterrâneas (Formação Barreiras, dunas e aluviões), sendo o Barreiras, indiscutivelmente, o reservatório subterrâneo mais importante da bacia costeira;
- Rios perenizados, mantendo o fluxo de base graças à restituição das águas subterrâneas;
- Grande número de lagoas as quais constituem verdadeiro afloramento do lençol freático regional.

De acordo com a classificação de Köppen (Ministério da Agricultura, 1969), a região apresenta um tipo climático AS', caracterizando-se pela existência de condições quentes e úmidas, com estação seca, no verão (setembro a janeiro), e chuvosa, no outono-inverno (fevereiro a agosto).

“Nossa missão é servir com excelência, ética e eficiência, contando com servidores competentes e valorizados, primando todos pelo respeito ao cidadão e ao meio ambiente, contribuindo para fazer de Natal uma cidade cada vez mais humana, socialmente mais justa, solidária e sustentável, com a melhor qualidade de vida para toda a população”.

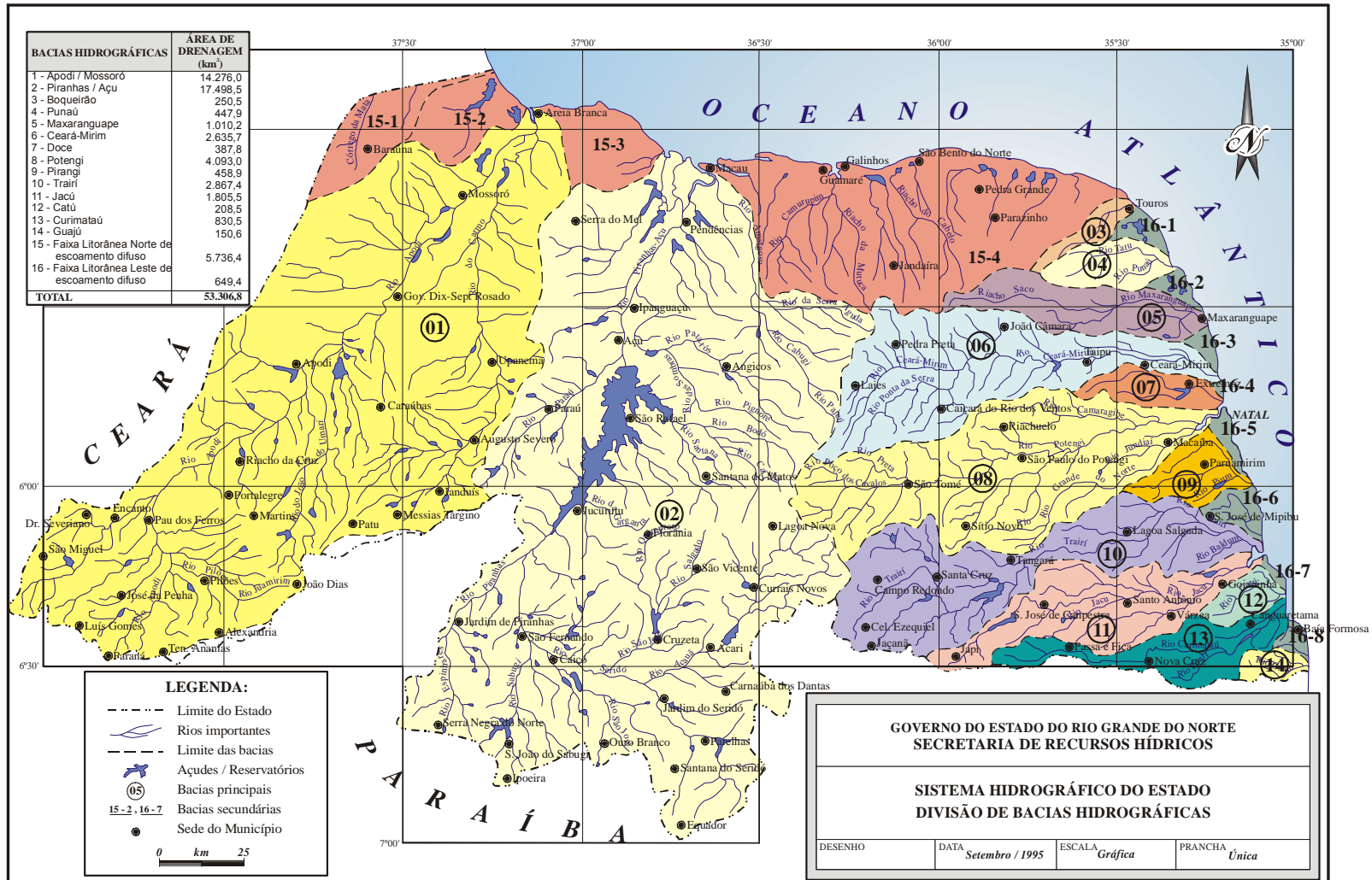


Figura 4.1 – Sistemas hidrográficos do Rio Grande do Norte e localização do município de Natal nas bacias 16-5, Faixa Litorânea Leste de Escoamento Difuso (Zona Sul) e 07, bacia do rio Doce (Zona Norte) (SRPE, 1995).

4.2. Funcionamento hidrodinâmico do aquífero Dunas-Barreiras

4.2.1. Interconexão hidrodinâmica

Apesar de trabalhos anteriores apontarem a existência de uma compartimentação ampla do tipo semi-confinada na Zona Sul, onde a seqüência superior do aquífero Barreiras se caracterizaria como um “aquitardo”, separando duas unidades aquíferas: uma superior do tipo livre, formada de sedimentos dunares, com baixo potencial hidrogeológico, e uma inferior, semi-confinada, formada pelos arenitos inferiores da Formação Barreiras, é possível abraçar a hipótese levantada por Melo (1995) quando afirma que as dunas e a Formação Barreiras formam, em conjunto, um sistema hidráulico único, muito complexo e indiferenciado designado **Sistema Aquífero Dunas/Barreiras**. Este, em geral, comporta-se como livre; entretanto, localmente, pode apresentar semi-confinamentos. As dunas, neste caso, exercem a função de uma unidade de transferência das águas de infiltração em direção aos estratos arenosos da Formação Barreiras, conforme já comentado pelo IPT (1982).

A hipótese levantada por Melo (op. cit.) baseia-se no trabalho da ACQUA-PLAN (1988), sobre a hidrogeologia de Natal, que mostra que os aquíferos dunas e Barreiras apresentam uma forte conexão do ponto de vista hidráulico subterrâneo, conforme estudo na área do Centro Administrativo de Natal utilizando bombeamento de poços profundos (62 m) bem construídos, devidamente bem cimentados em seu espaço anelar, e observação da reação de piezômetros rasos (15 m). Além disso, observou que os níveis potenciométricos rasos e profundos se ajustam a uma única superfície potenciométrica, embora haja um pequeno retardo natural entre os níveis rasos e profundos, entretanto observou que nas áreas mais densamente ocupadas, os níveis d’águas se recuperam muito mais lentamente, mostrando o impacto da impermeabilização do solo.

4.2.2. Parâmetros Hidráulicos das Dunas

Segundo Melo (1995) a espessura saturada das dunas depende da oscilação do nível das águas subterrâneas, pois somente nos períodos de recarga justamente nos relevos mais baixos é que as partes inferiores desta cobertura ficam saturadas. Exceção é feita na parte sul da área, com espessuras saturadas de até 3,0 m mesmo no período de estiagem, justamente onde ocorrem as lagoas de Pirangi, Lagoinha e Ponta Negra, pois isto se verifica devido a uma formação de aquíferos suspensos retendo por mais tempo as infiltrações descendentes.

Os testes de infiltrações realizados por Melo (1995) pelo método de rebaixamento na zona não saturado destes sedimentos eólicos para determinação da condutividade hidráulica, conforme metodologia de ensaios pontuais da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE (1990), mostraram resultados com variações quase insignificantes, cuja média ficou em $2,2 \times 10^{-4}$ m/s. Esses valores não parecem estar muito próximos dos obtidos por outros trabalhos (Tabela 4.1) na zona saturada.

Vale salientar que o trabalho da ACQUA-PLAN (1978) obteve um valor de 10% para a porosidade efetiva.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica (K) conforme diversos trabalhos para a Zona Não Saturada (ZNS) e Zona Saturada (ZS).

Local	Trabalho – Ano	Nível Testado (m)	K (m/s)
Lagoa de Pitimbu	Modificado de Melo – 1995	0,00 – 2,90 (ZNS)	$1,5 \times 10^{-6}$
Campus Universitário	Modificado de Melo – 1995	0,00 – 14,23 (ZNS)	$2,2 \times 10^{-6}$
Lagoa dos Potiguares	Modificado de Melo – 1995	0,00 – 14,66 (ZNS)	$2,8 \times 10^{-6}$
Bosque dos Namorados	Modificado de Melo – 1995	0,00 – 23,83 (ZNS)	$2,3 \times 10^{-6}$

Lagoa do Preá	ACQUA – PLAN – 1978	ZS	$2,0 \times 10^{-4}$
Centro Adminis.	ACQUA – PLAN – 1988	ZS	Média de $3,1 \times 10^{-4}$

4.2.3. Parâmetros Hidráulicos da Formação Barreiras

Melo (1995), estudando a zona Sul de Natal, conforme comentado, descreve que a parte superior da Formação Barreiras, sotoposta às dunas, exhibe, em geral, sedimentos mais argilosos, espessura da ordem de 23 m, sendo, no entanto, heterogêneos, com grandes variações de fácies tanto vertical como lateralmente, o que facilita a conexão hidráulica com as dunas. Com relação a condutividade hidráulica desta camada superior da Formação Barreiras, a ACQUA-PLAN (1998) obteve um valor de $1,6 \times 10^{-6}$ m/s. A parte inferior dos perfis de poços, base da Formação Barreiras, é formada predominantemente de arenitos de granulometria fina a grossa, com intercalações argilosas, sendo considerado, na prática, para efeito de exploração, como o aquífero Barreiras. De um modo geral a parte inferior do aquífero Barreiras apresenta condutividades hidráulicas que variam de $6,7 \times 10^{-5}$ m/s (captação Guarapes) a $3,74 \times 10^{-4}$ m/s (captação Lagoa Nova II). Com relação aos valores do coeficiente de armazenamento, os dados de trabalhos anteriores (ACQUA – PLAN, 1998 e PLANAT, 1982) não são conclusivos, pois indicam uma variação ampla de $1,4 \times 10^{-4}$ a $1,6 \times 10^{-3}$. Por fim, a espessura saturada levando em consideração apenas os estratos arenosos variaram de 36 m (captação Guarapes) a 54 m (captação Dunas).

A Formação Barreiras na Zona Norte (Melo, 1998), mostra na parte superior um aspecto heterogêneo e uma freqüente mudança lateral de fácies com passagens bruscas de argilas para arenitos pouco ou não argilosos, o que facilita a conexão hidráulica entre as camadas inferiores e superiores, configurando um sistema do tipo livre, essencialmente. Neste sentido os valores dos parâmetros hidrodinâmicos mostraram as seguintes variações:

- Transmissividade (T): $1,05 \times 10^{-3}$ a $3,0 \times 10^{-2}$ m²/s;

- Condutividade hidráulica (K): $1,9 \times 10^{-5}$ a $1,4 \times 10^{-3}$ m/s;
- porosidade efetiva : 10%.

4.2.4. Potenciometria

O estudo realizado pelo IPT (1981) sobre a qualidade das águas subterrâneas na grande Natal mostra na zona sul de Natal um mapa de fluxo subterrâneo construído com as cargas hidráulicas no período de estiagem (Março – abril de 1980) com um importante divisor hidrogeológico (curva de nível máxima de 30 m) na porção oeste de Natal de direção NE-SW com inflexão para SE nas imediações do San Vale indo na direção ao bairro de Pirangi. Na Zona Norte de Natal, a sua porção central mostra um alto hidrogeológico ou uma zona de recarga no conjunto Alvorada, Parque dos Coqueiros e Distrito Industrial, cujos fluxos subterrâneos irradiam-se em direção aos rios doce e Potengi.

Um mapa de fluxo subterrâneo do Natal sintetizado na Figura 4.2, a partir dos trabalhos de Melo (1995 e 1998), confirma e detalha o padrão apresentado pelo IPT (1981), o qual mostra o fluxo divergente da Zona Norte e na Zona Sul um alto hidráulico no setor oeste do município, região do San Vale, constituindo a região de recarga principal por infiltração da chuva, que prolonga-se para NE, no sentido do bairro Petrópolis, e para SE, no sentido de Lagoinha, caracterizando dois divisores hidrogeológicos importantes. Isto porque definem três frentes principais de escoamento subterrâneo, ou bacias hidrogeológicas. A frente costeira (setor oriental) com descarga para o mar, a frente Potengi (setor ocidental) escoando para o rio de mesmo nome e a frente Pitimbu (setor sul) com fluxo em direção ao rio Pitimbu, totalizando, com base na lei de Darcy, um fluxo subterrâneo da ordem de $70,0 \times 10^6$ m³/ano.

Ainda segundo Melo (1995), no setor sul da área, nas localidades Jiqui – Pirangi e Lagoinha, o grande afastamento entre as equipotenciais seria atribuído a uma estrutura local que condiciona a formação de aquíferos suspensos e lagoas, funcionando como zonas importantes de alimentação do fluxo regional.

Carvalho J. (2001) detalhou o comportamento do fluxo nesta região supracitada no período de estiagem (janeiro de 2000) e no final do inverno (setembro de 2000). No primeiro caso (Figura 4.3) o comportamento natural foi alterado por um cone de rebaixamento nas imediações de Ponta Negra. Entretanto, a segunda feição (Figura 4.4), realçando a primeira, deixa bem clara um divisor hidrogeológico controlado pela continuidade, para SE, do cordão de dunas elevadas de Lagoinha e com baixa urbanização, ignorando, portanto, a compartimentação localizada supracitada. Nota-se, neste caso, o encurvamento do divisor para o sentido Norte, em direção ao Parque das Dunas, o que poderá significar que esta feição venha se formar temporariamente ao longo deste cordão de dunas, no período de inverno. Caso isto ocorra, a Zona Sul de Natal se comportaria como uma grande bacia hidrogeológica fechada durante um certo tempo, a qual seria, obviamente, favorável ao armazenamento de águas por infiltração, e diminuiria as perdas naturais para o mar. Entretanto seria aumentaria negativamente o tempo de permanência dessas águas, dificultando a renovação com relação aos problemas de contaminação.

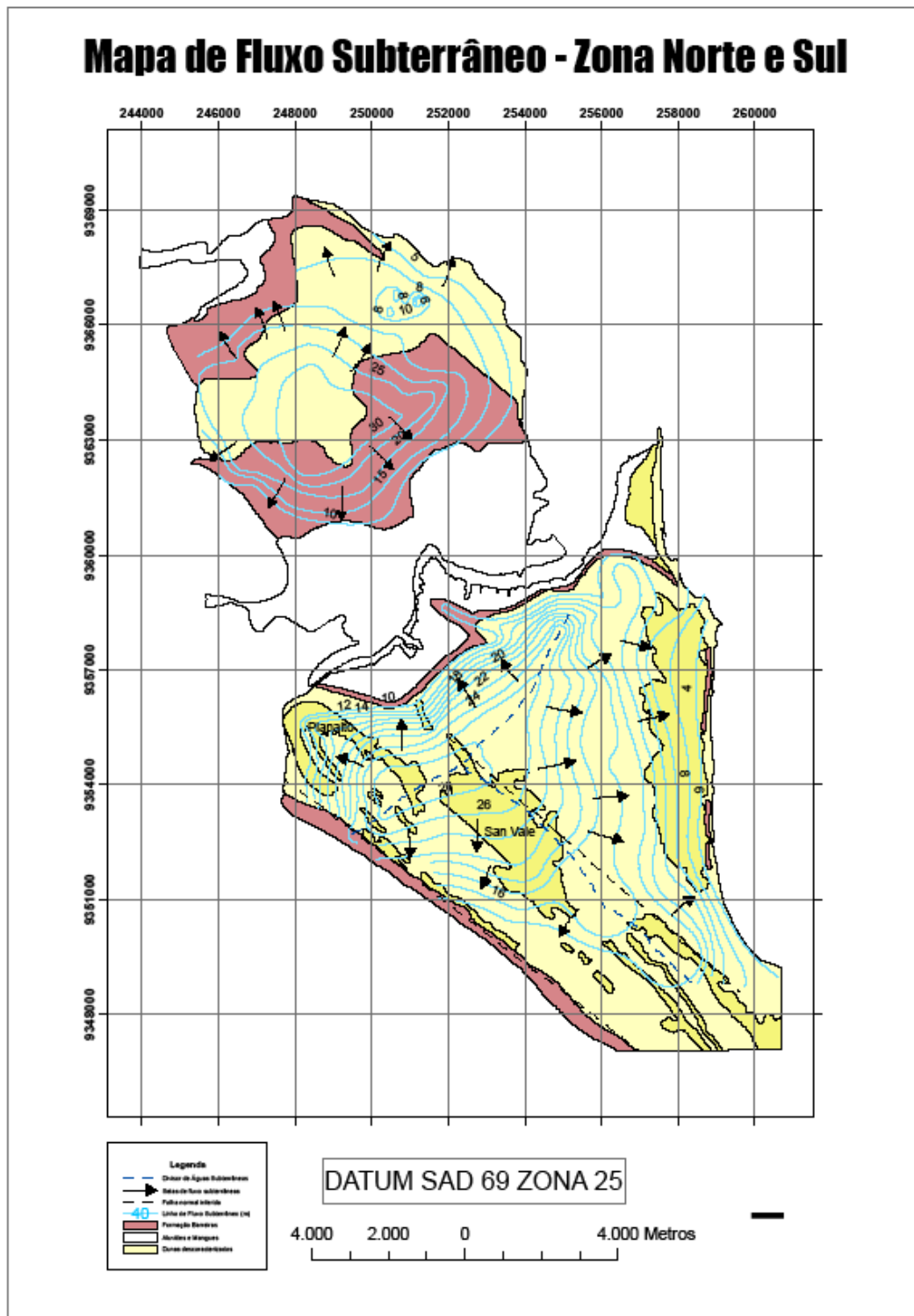


Figura 4.2 – Potenciometria do sistema aquífero Dunas – Barreiras (Adaptado de Melo, 1995 e 1998).

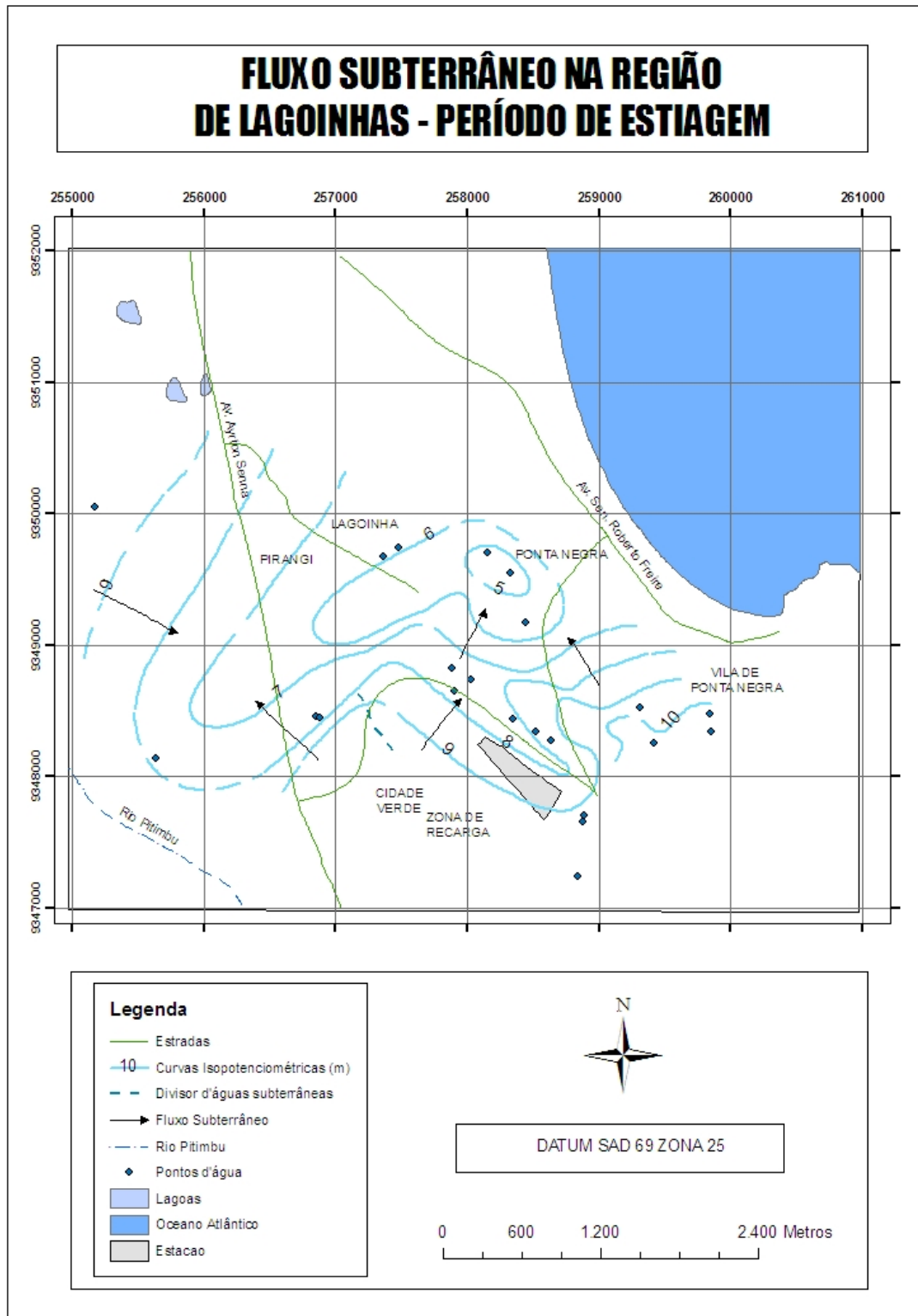


Figura 4.3 – Potenciometria dos bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN. Janeiro de 2000 (Carvalho Jr. 2001).

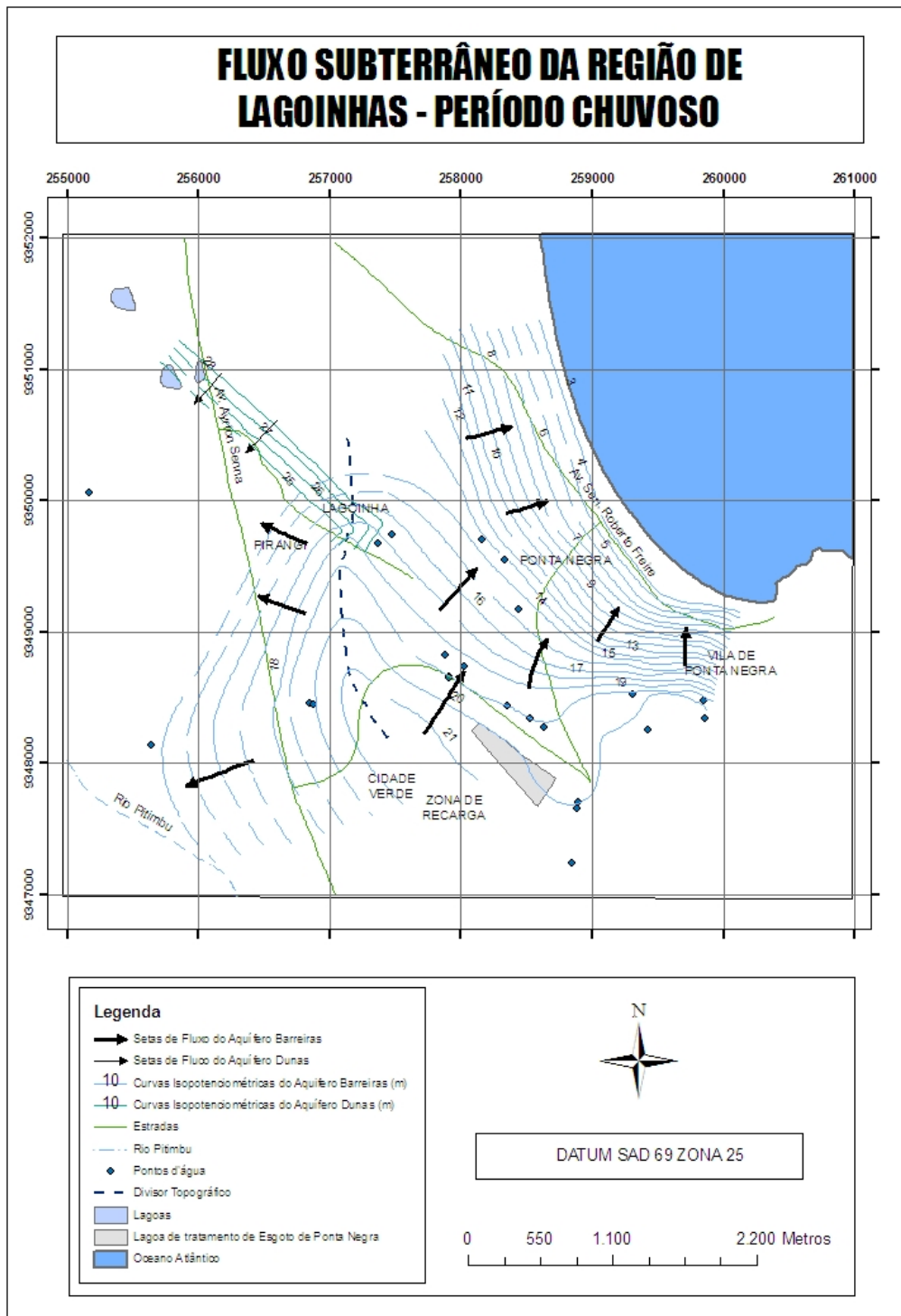


Figura 4.4 – Potenciometria dos bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN. Setembro de 2000 (Carvalho Jr. 2001).

4.2.5. Profundidade das Águas

No geral, pode-se dizer que as profundidades da água (Figura 4.5) são variáveis em função dos aspectos geomorfológicos, pois geralmente tendem a ser mais profundos onde o relevo é mais alto e de pouca profundidade nas imediações das lagoas alimentadas por estes mesmos níveis d'água.

**Mapa de Isopropfundidade das Águas Subterrâneas
- Zona Norte e Sul -**

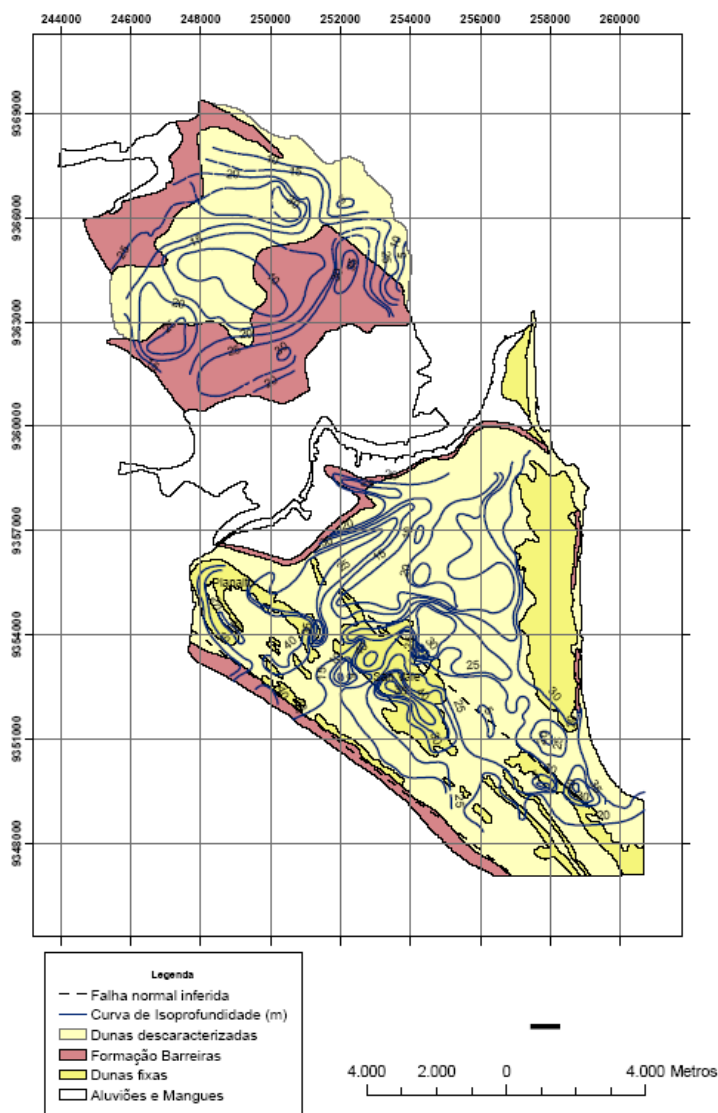


Figura 4.5 – Curvas de isopropfundidade das águas subterrâneas da Zona Sul – Fevereiro de 1993 – (Melo, 1995) e Zona Norte de Natal – Fevereiro de 1993 – (Melo, 1998).

Assim, na parte central da Zona Sul, no período de estiagem, justamente onde o relevo é mais arrasado, o nível estático ocorre entre 10,0 m e 15,0 m, mas aumenta para leste e oeste justamente onde ocorrem os cordões mais elevados, podendo ser superior a 40 m. Entretanto, as explorações cada vez mais acentuada modificam e aprofundam os níveis d'água junto às baterias de poços de exploração, em função do cone de rebaixamento gerado (Figura 4.6)

Na Zona Norte o comportamento é similar, porquanto vai se tornando cada vez mais raso em direção ao rio Doce, entretanto, exceto nos domínios locais de elevações dunares cuja profundidade pode ser um pouco maior que 35 m, na parte central os níveis são relativamente rasos inferiores a 10 m, caracterizando uma alta vulnerabilidade à contaminação. Em direção à sul os níveis tendem a ser um pouco mais elevado atingindo valores em torno de 25 m.

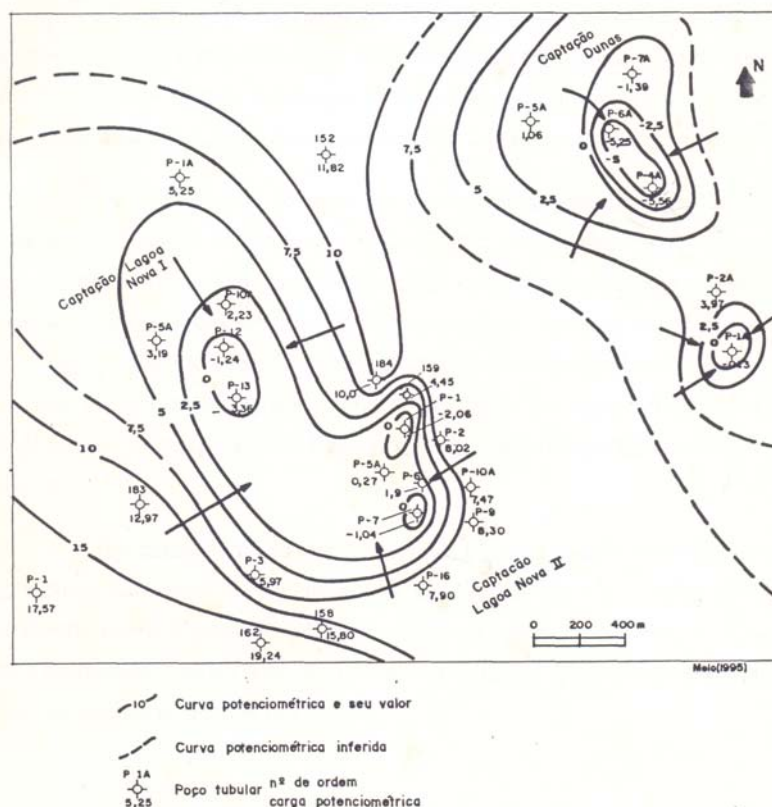


Figura 4.6 – Potenciometria do nível dinâmico do Sistema dunas – Barreiras (Melo, 1995), mediante o funcionamento de poços da CAERN na região de Lagoa Nova.

4.2.6. Taxas de Infiltração

O balanço hídrico de Thornthwaite (Castany, 1971) realizado por Melo (1995), considerou os dados da estação Meteorológica da UFRN no período de 1931 – 1960, a partir de um valor arbitrário de 100 mm para a capacidade máxima de armazenamento do solo, a estimativa da ETP pelo método de TURC e avaliou uma infiltração de 532 mm, o que corresponde a uma taxa de 34% da precipitação média do período (1547 mm). Este valor é muito próximo do estimado por Costa (1970), pois considerando uma precipitação média de 1500 mm, apresentou uma taxa de infiltração de 35%.

Entretanto, Melo (1995), a partir das reservas reguladoras de águas subterrâneas na Zona Sul de Natal com base no total anual de $70 \times 10^6 \text{ m}^3$, avaliadas através da Lei de Darcy, comparou com o volume precipitado de 1600 mm/ anuais em uma área de 90 Km^2 e encontrou uma taxa de infiltração de 48%. Esta taxa fornece uma porosidade efetiva de 10%, para uma variação de carga de 7,5 m, à semelhança do estimado para as dunas pela ACQUA-PLAN, 1978.

4.3. Contaminação das Águas e os Nitratos

A partir dos trabalhos do IPT (1981) os estudos sobre os nitratos avançaram bastante na cidade de Natal, capital do RN e constiuem atualmente o foco das atenções sobre problemas de poluição, embora não se deve perder de vista outras inúmeras fontes potenciais de comprometimento das águas subterrâneas. O IPT (1981) já ressaltava que a cidade do Natal situa-se em área considerada crítica quanto ao risco de contaminação dado a sua elevada vulnerabilidade natural, tanto que já naquela época a poluição das águas subterrâneas pelos nitritos e nitratos se fazia presente em alguns focos do aquífero Barreiras mais densamente ocupado, chegando a superar em muito o máximo permitido pela Organização Mundial de Saúde (OMS) que é de 45 mg/L de NO_3 , pois apontou valores de 124 mg/L.

Melo (1995), Melo e Queiroz. (1998) e Melo *et al.* (1998) alertam que o sistema de saneamento com disposição local de efluentes domésticos (fossas e

sumidouros) constitui a principal origem dos nitratos, porquanto isótopos estáveis de nitrogênio apontam que o principal tipo de contaminante envolvido é o íon nitrato, resultante da biodegradação dos excrementos humanos. A contaminação já atinge uma expressiva área da Zona Sul de tal modo que atualmente existem muitos poços já desativados (Figura 4.6) ou com presença de nitratos (Tabela 3.3), apesar da tentativa de diluição com as águas de boa qualidade da lagoa do Jiqui, a sul de Natal. Como qualidade e quantidade estão relacionadas, a impermeabilização do terreno acaba por comprometer os processos de diluição das águas contaminadas.

Vasconcelos (2002) também estudou o avanço da contaminação por nitrato nas águas subterrâneas da Zona Sul da Grande Natal comparando dois períodos: 1988 e sendo o segundo de 1993 à 2002 e constatou que a frente de avanço da contaminação expande-se radialmente (Figura 4.7), a partir dos bairros mais povoados (Dix – Sept Rosado, Alecrim, Quintas, Lagoa Seca, Bairros Vermelho, Nossa Senhora de Nazaré e Cidade da Esperança), principalmente nos sentidos Leste e Sul, pois os teores de nitrato, em vários setores, vem aumentando assustadoramente. Alguns pontos com aparente diminuição é aparente, uma vez que está ligado à desativação de poços. Para ser ter uma idéia na região oeste os teores superam os 150 mg/L. Nos bairros do Alecrim, Cidade Alta – Tirol, atingem valor da ordem de 90 mg/L, destacando o bairro Tirol com contaminações pontuais de 150 mg/L. Já na região do Campus Universitário, foram registrados valores da ordem de 115 mg/L; todavia, nos setores menos habitados e nas porções SW e SE, predominaram níveis abaixo de 45 mg/L, com apenas valores pontuais violando o limite permitido pela OMS. Por fim, dos 139 poços ativos da CAERN, na época, aproximadamente 32% superavam o limite de 45 mg/L.

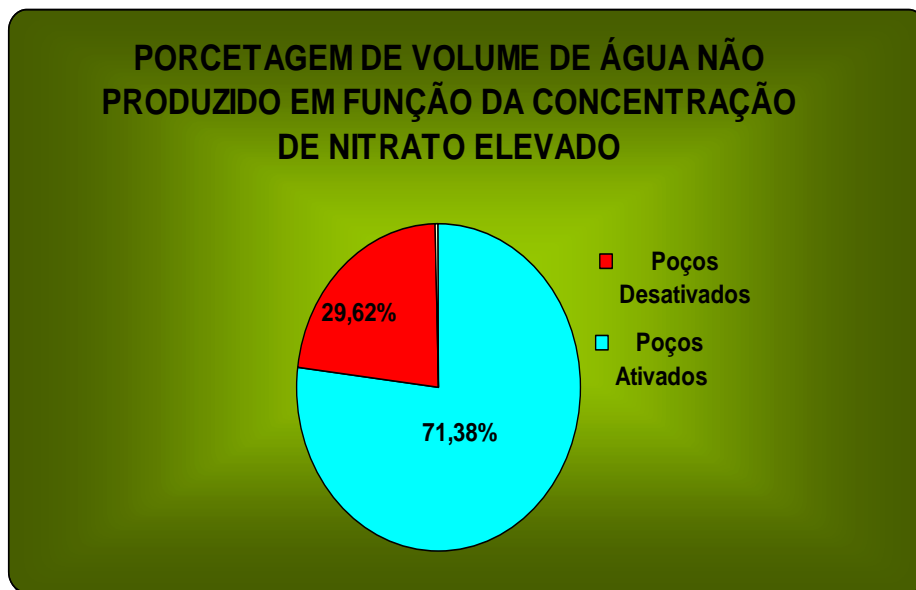


Figura 4.7 – Relação entre poços desativados e ativos na CAERN. Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007).

Tabela 4.2 – Situação dos poços de abastecimento da Zona Sul do Natal. Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)

Ano	< 10 mg/L de NO ₃ ⁻ (%)	> 10 mg/L de NO ₃ ⁻ (%)
2003	69,2	30,8
2004	62	38
2005	62,2	37,8
2006	57,6	42,4
2007	52,7	47,3

Sabe-se que as infiltrações oriundas das precipitações devem, no geral, provocar processos de diluição no aquífero subjacente. Neste sentido, Pereira et al. (2000) mostraram diferenças hidroquímicas obtidas do monitoramento de dois poços (um raso com 40 m aproximadamente e outro profundo com 80 m, mas distante apenas um do outro cerca de 50 m) no bairro de Lagoa Nova (região adensada), no período de 23/04/02 até 4/04/03. Enquanto o poço raso apresentou um mínimo de 17,15 mg/L e um máximo de 27 mg/L, o poço profundo variou de 32,82 mg/L a 37,14 mg/L. Em ambas situações os valores mínimos ocorrem justamente no pico de

elevação do nível d'água do poço profundo, representando fenômenos de diluição (ressalta-se que não foi possível monitorar o nível d'água do poço mais raso). Entretanto, os dados coletados por Carvalho Jr. (2001) mostram um pequeno aumento de nitrato no aquífero inferior do Barreiras na região de Jiqui – Pirangi e Lagoinha no final do período chuvoso, mas que seria favorecido pela presença, conforme já comentado, de um aquífero suspenso raso ou “reservatório subterrâneo de esgoto” que lixiviaria por drenança ou fluxos laterais à camada argilosa, os nitratos gerados nessas condições favoráveis.

Com respeito à Zona Norte (Figura 4.8), Melo (1998) e Melo e Queiroz. (1998) comentam que o processo de contaminação ocorre de forma menos acentuada com relação à Zona Sul do Natal, mas mesmo assim os teores de nitratos já são superiores a 10 mg/L, valor de referência como de ocorrência natural, o que vem já mostrar a contaminação difusa dos efluentes domésticos na zona mais povoada. Entretanto os valores acima do limite recomendado pela OMS ocorre de forma mais localizada, justamente onde os níveis d'água são mais rasos, como à norte do Conjunto Alvorada, nas regiões de cobertura dunar proeminente de Pajuçara/Gramoré e em situações onde as atividades urbanas são mais antigas, de tal modo que em determinadas situações chegam a atingir níveis maiores de 100 mg/L. Constata-se a ausência de saneamento básico, sendo utilizado também o sistema de disposição local de efluentes, mediante o uso em fossas sépticas e sumidouros e um número elevado de lagoas de recepção e estabilização, que recebem um grande número de esgotos clandestinos, quer seja pela falta de esgotos, bem como pela ausência de Estações de Tratamento.

MAPA DE ISOCONCENTRAÇÃO DE NITRATO - ZONA NORTE E SUL-

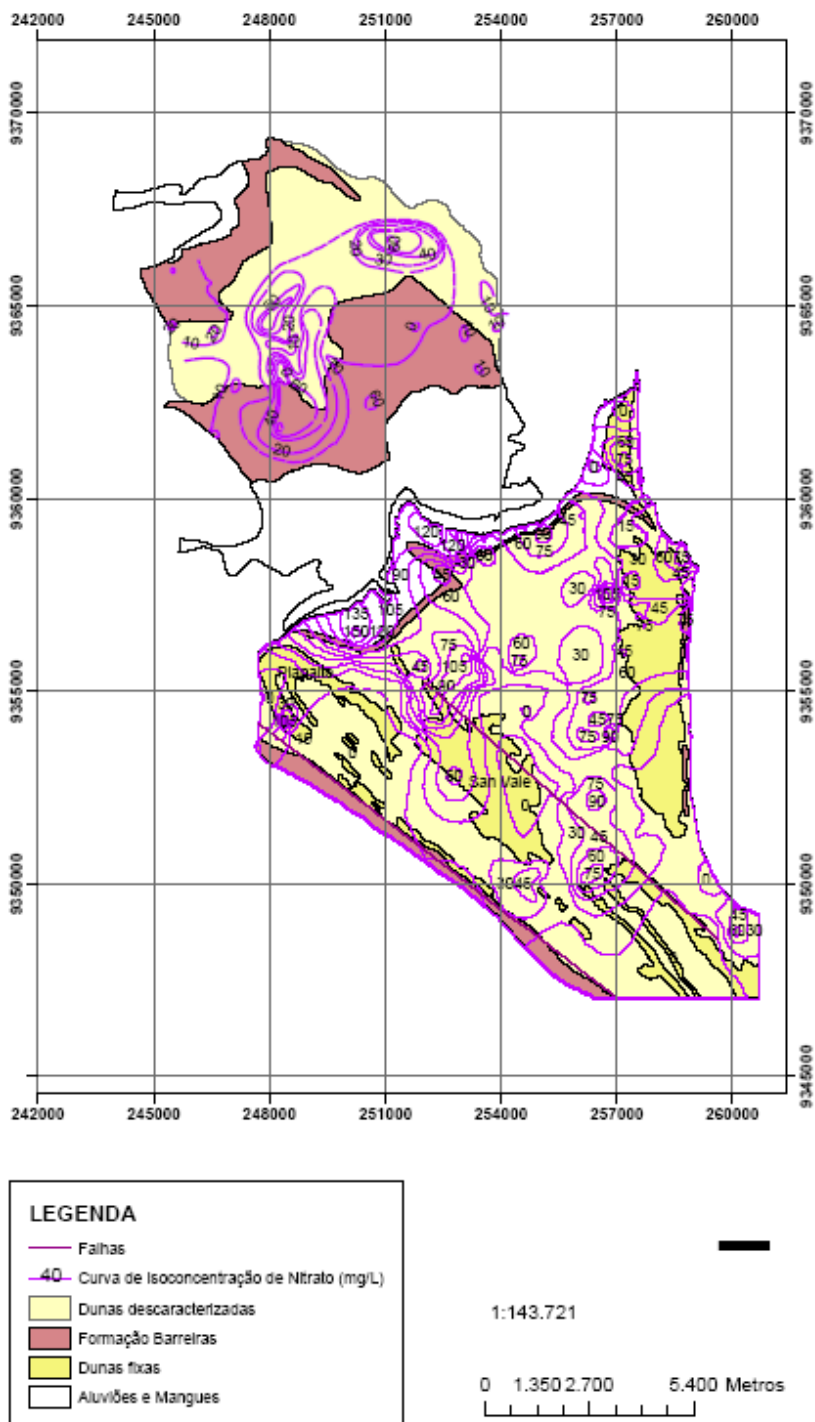


Figura 4.8 – Curvas de iso-concentração de nitratos nas águas subterrânea do município do Natal. Adaptado de Vasconcelo (2002) para a Zona Sul e Melo (1998) para a Zona Norte.

5. ASPECTOS HIDROLÓGICOS DAS LAGOAS

O trabalho de Medeiros (2001) optou-se por utilizar a denominação de “Lagoa” como depressão com forma variada, contendo ou não água, de forma natural ou artificial. Já o termo “Alagado” (ou alagamento) são áreas caracterizadas pela presença de água, principalmente nos meses que ocorrem elevados índices pluviométricos.

Na Cidade do Natal, lagoas como lagoa Nova, lagoa Seca, lagoa do Jacob e a lagoa da Campina, desapareceram. Isto porque a partir da década de 70 aumentaram expressivamente as áreas de ocupação no entorno das lagoas para dar lugar a edificações, como praças, colégio, edifícios públicos e residências, provocando a transferência da drenagem urbana da cidade através de redes de galerias ou afetando o seu regime hídrico. Entretanto, muitas vezes estas lagoas ressurgem em períodos chuvosos formando áreas alagadas, causando freqüente inundação, pois são depressões fechadas para onde as precipitações pluviométricas se direcionam como resultado das impermeabilizações (Figura 5.1). Portanto, da mesma forma, a diminuição da área das lagoas, faz com que em época de chuva as águas ultrapassem o limite imposto pela urbanização e alcance às residências, prédios públicos e avenidas. Além disso processos de assoreamentos por retiradas de materiais tem diminuído a capacidade de recepção das águas pluviais.

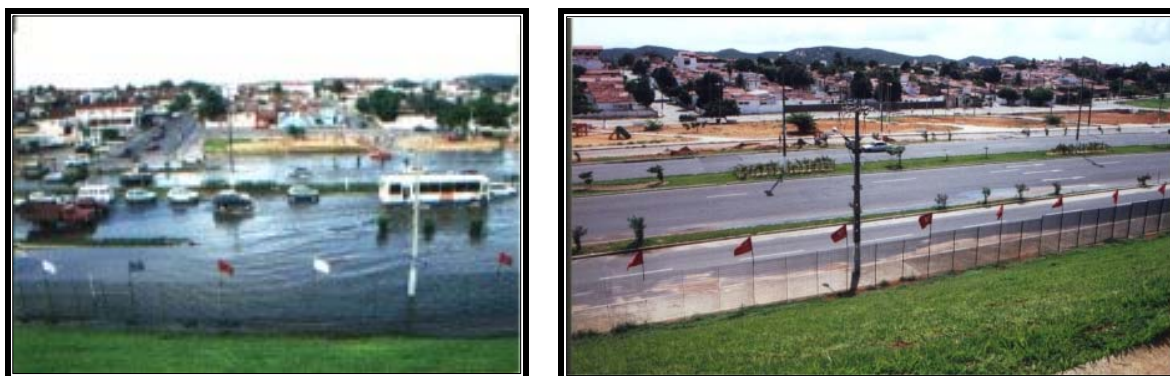


Figura 5.1 – Vista panorâmica da BR 101 em área de sub-bacia confinada, na altura do conjunto habitacional Mirassol em período chuvoso junho/2000 (Esquerda) e no período de verão - set/2000 (Direita). Fonte: Medeiros, 2001.

As lagoas da Campina (localizada anteriormente na área onde se encontram a Estação Ferroviária, Estação Rodoviária Presidente Kennedy, a praça Augusto Severo e a Igreja de Bom Jesus da Ribeira, aterrada em junho de 1904), Seca (sem qualquer vestígios, atualmente, próximo do Clube dos Radio Amadores, na avenida Campos Sales), Jacob (Instituto Padre Monte), associadas ao Sistema estuário Potengi-Jundiá estão totalmente descaracterizadas, onde os impactos da ação humana mudaram sua morfologia. A lagoa Manuel Felipe é a única associada a este sistema que resiste ao avanço da urbanização, ligada por um canal, conhecido como riacho do Baldo, “sangradouro” natural, conhecido anteriormente como Oitizeiro ou rio Tiçuru. Em 1761, era a principal fonte de abastecimento d’água para a cidade, juntamente com a fonte de Santa Cruz da Bica (Casculo, 1968). A lagoa Nova foi aterrada na década de 70 para dar lugar ao Centro Administrativo do Estado.

O Quadro 5.1 mostra um resumo das principais lagoas da cidade do Natal que ainda estão presente, foram transformadas ou estão ainda de maneira natural.

Quadro 5.1 - Lagoas naturais e artificiais da Cidade do Natal (Medeiros, 2001)

Lagoas	Presente	Transformada	Naturais
Manuel Felipe	X	X	X
Conj. Hab.Pirangi/ Jiqui (3 lagoas)	X	X	X
Cid. Satélite	X	X	
Bum Bum		X	
PETROBRÁS	X	X	
Preá	X		
Potiguares	X	X	
São Conrado	X	X	
C.Administ. (3 lag.)		X	X
Mirassol		X	
Av.Integração			
Sapo (alagado)	X	X	X
Azul	X		X
Lagoinha (7lagoas)	X		X

Pajussara	X		X
Guamoré	X		X
José Sarney (2 lag.)	X	X	
Santarém	X	X	
Clube COSERN			
Capim Macio			
Alagamar	X		
Ponta Negra			
Campina		X	X
Jacob	X	X	X
Seca		X	X
Vila de Ponta Negra			

Pode – se dizer que as lagoas no município do Natal são de quatro tipos básicos com funcionamento bastante complexo.

Assim, ocorrem na área do município do Natal algumas lagoas originadas do afloramento de águas subterrâneas provenientes do aquífero Dunas/Barreiras, como as três lagoas do conjunto habitacional Jiqui/Pirangi; lagoa Manuel Felipe, no bairro do Tirol; a lagoa Lagoinha, formada por sete pequenas lagoas no bairro de Ponta Negra e as lagoas Azul Dendê, Pajussara e Guamoré no vale do rio Doce (Zona Norte).

Existem, porém aquelas que em condições naturais são temporárias devido às variações dos níveis do lençol freático, pois aparecem somente quando o nível do lençol freático eleva-se em ocasiões de recargas acentuadas em períodos chuvosos, como é o caso típico da lagoas do Centro Administrativo e da Cidade Satélite. Entretanto, as taxas cada vez mais acentuadas de bombeamentos do sistema público de abastecimento têm, provavelmente, impedido o surgimento das mesmas.

Neste contexto existem também as que ficam suspensas na zona saturada nos períodos de estiagens em função da impermeabilização do seu fundo, em muitos casos dado ao lançamento de esgotos clandestinos e águas pluviais, como é o caso das lagoas da Candelária, Preá, dos Potiguares e São Conrado (Figura 5.2).

O quarto tipo de lagoa corresponde as que ocorrem no setor Jiqui – Pirangi e Alagoninha, sul da área, pois a sua perenidade está associada com a presença de uma camada argilosa de baixa permeabilidade que acaba por retardar as percolações profundas, funcionando como área de recarga do aquífero inferior da Formação Barreiras, motivo pelo qual existem um espaçamento maior das equipotenciais do mapa de fluxo, conforme será visto adiante. Nos períodos de estiagem acabam por comporta-se igualmente como lagoas suspensas (Figura 5.3 e 5.4), mas podem secar.

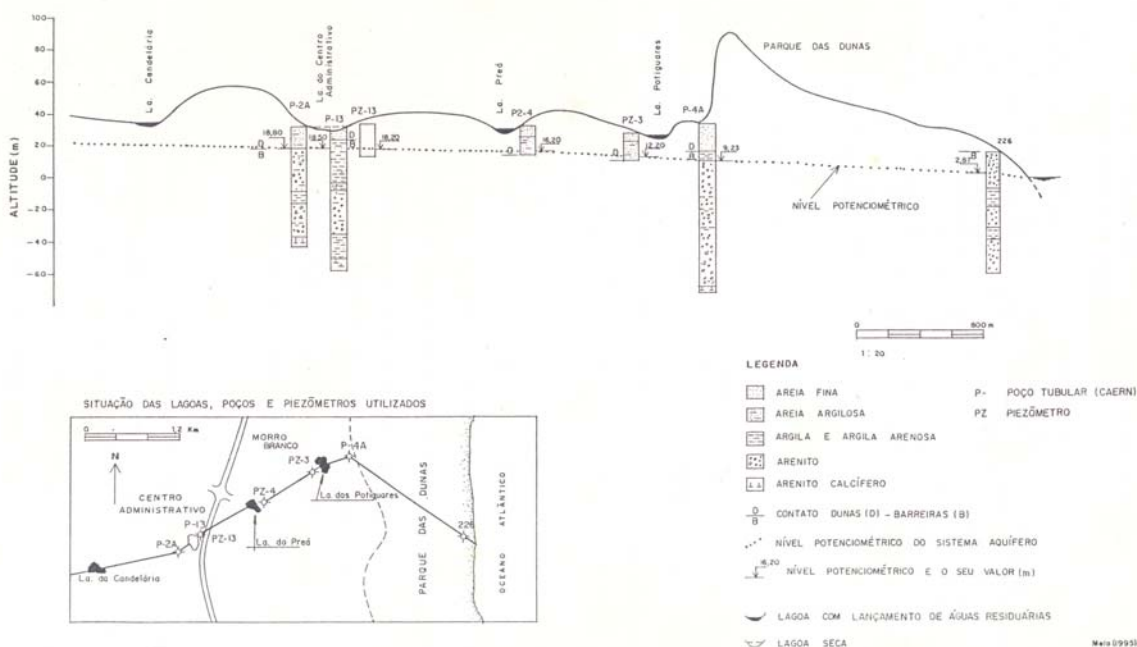


Figura 5.2 – Seção hidrogeológica mostrando lagoas suspensas (Melo, 1995).

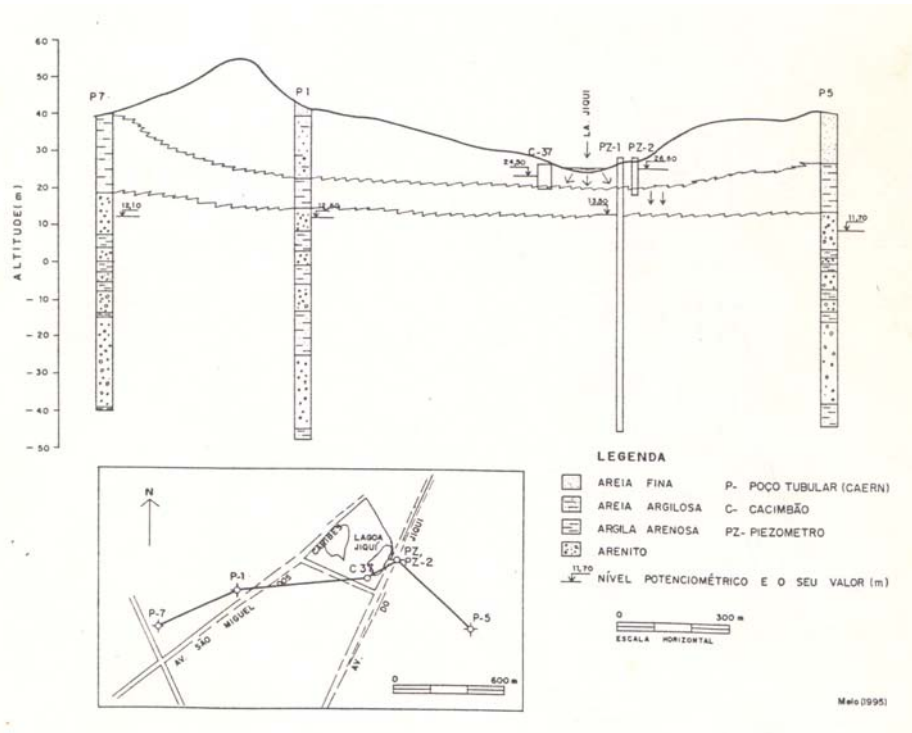


Figura 5.3 – Formação de lagoas naturais devido a presença de compartimentação hidrogeológica natural (Melo, 1995).

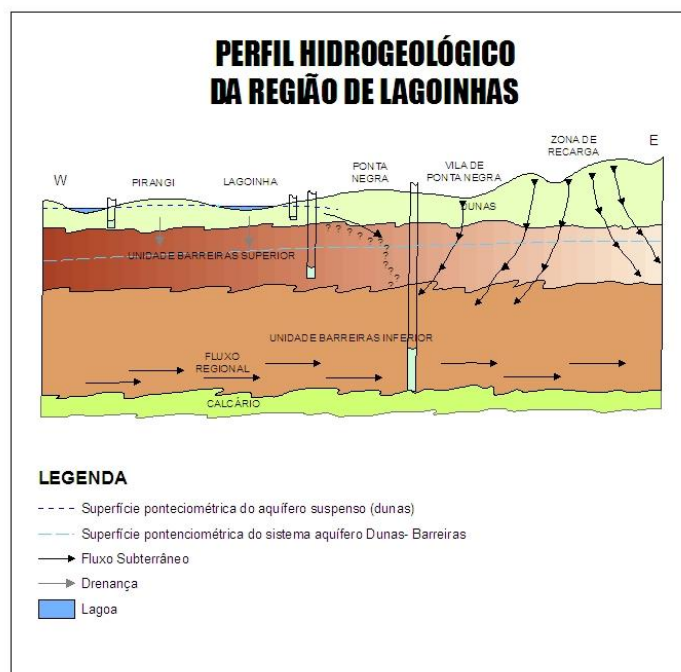


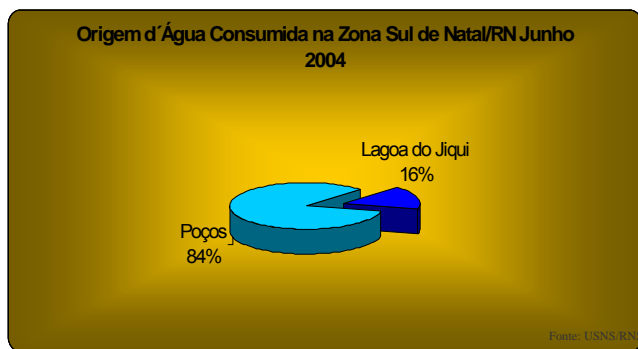
Figura 5.4 – Cenário hidrogeológico esquemático da região compreendida entre os bairros de Pirangi e Ponta Negra, Natal – RN (Carvalho Jr. 2001).

6. EXPLOTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

6.1. Diagnóstico da Situação do Abastecimento de Águas Subterrâneas do Município do Natal

As figuras 6.1A e 1B mostram o volume de água explorado do manancial subterrâneo de Natal, em termos de percentagens para o ano de 2004, destacando a maior importância deste para a Zona Sul e as águas superficiais para a Zona Norte.

A)



B)



Figura 6.1 – Origem da água consumida em Natal para a Zona Sul (A) e Zona Norte (B). Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007)

Em termos quantitativos, os recursos subterrâneos explorados no domínio da Zona Sul (Melo, 1995) são da ordem de $52 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Melo (1998) mostra que $16,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ são explorados dos mananciais subterrâneos da Zona Norte de Natal, sendo $11,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ (devendo aumentar para $12,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ em função de dois outros perfurados) pela CAERN e $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ por poços particulares.

Ainda em termos quantitativos (Melo e Queiroz, 1998), em abril de 1998 o volume total, incluindo Zona Norte e Zona Sul, bombeado dos mananciais subterrâneos é da ordem de $57 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A tabela abaixo (Tabela 6.1) permite visualizar o aumento da demanda de água potável para a Zona Norte e função da ocupação acentuada e a problemática do nitrato para a Zona Sul. Isto porque de 2005 para 2007 existe uma tendência de diminuição do abastecimento de água subterrânea para a Zona Sul em função da desativação de poços contaminados acima dos padrões permitidos (cerca de aproximadamente 25 poços). O aumento da produção subterrânea para a Zona Norte é visível, tendo em vista os índices menores de contaminação, sendo previsto novas perfurações de poços tubulares na região do Rio Doce. O bombeamento atual das lagoas do Jiqui e Extremos em regime de 24 horas é da ordem, respectivamente, de $2.361 \text{ m}^3/\text{hora}$ e $1.356 \text{ m}^3/\text{hora}$. Atualmente o volume explorado total, incluindo os mananciais superficiais e subterrâneos já é da ordem de $91.380.160 \text{ m}^3$ (CAERN, 2007). Desse total, 63,8 % ainda é subterrânea e 36,25% refere-se às contribuições das lagoas do Jiqui e Extremoz.

Tabela 6.1 – Dados operacionais sobre o abastecimento de água para o município do Natal – RN.

Ano	Região	Total Anual (m^3) Superficial + Subterrânea	Poços (m^3)	Lagoa (m^3)
1995 (Melo, 1995)			52×10^6 (Zona Sul)	

1998 (Melo e Queiroz)	Zona Sul		45,8 x 10 ⁶	
	Zona Norte		11,2 x 10 ⁶	
	Zona Norte + Zona Sul		57 x 10 ⁶	
2006 (CAERN)	Zona Sul	51.460.951		
	Zona Norte	19.993.608		
	Zona Norte + Zona Sul	71.454.559		
2007 (CAERN)	Zona Sul	48.662.904	27.697.224	20.965.680 (Jiqui)
	Zona Norte	42.717.256	30.675.976	12.041.280 (Extremoz)
	Zona Norte + Zona Sul	91.380.160	58.373.200	33.006.960

A Tabela 6.2 mostra aspectos da evolução da contaminação por nitratos nos poços da Zona Sul do Natal.

Tabela 6.2 – Evolução da contaminação por nitratos na Zona Sul do Natal (Fonte: palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007).

Ano	(%) < 10 mg/L de NO ₃ ⁻	(%) > 10 mg/L de NO ₃ ⁻
2003	69,2	30,8
2004	62	38
2005	62,2	37,8
2006	57,6	42,4
2007	52,7	47,3

6.2. Áreas de Exploração Atual

Conforme o banco de dados do IGARN, existem cerca de 157 poços de abastecimento da CAERN. Um total de 42 pertence à Zona Norte e 115 à Zona Sul, havendo, entretanto, alguns nos municípios vizinhos, já próximo do limite com Natal. Alguns desses podem estar desativados em função dos altos índices de nitratos.

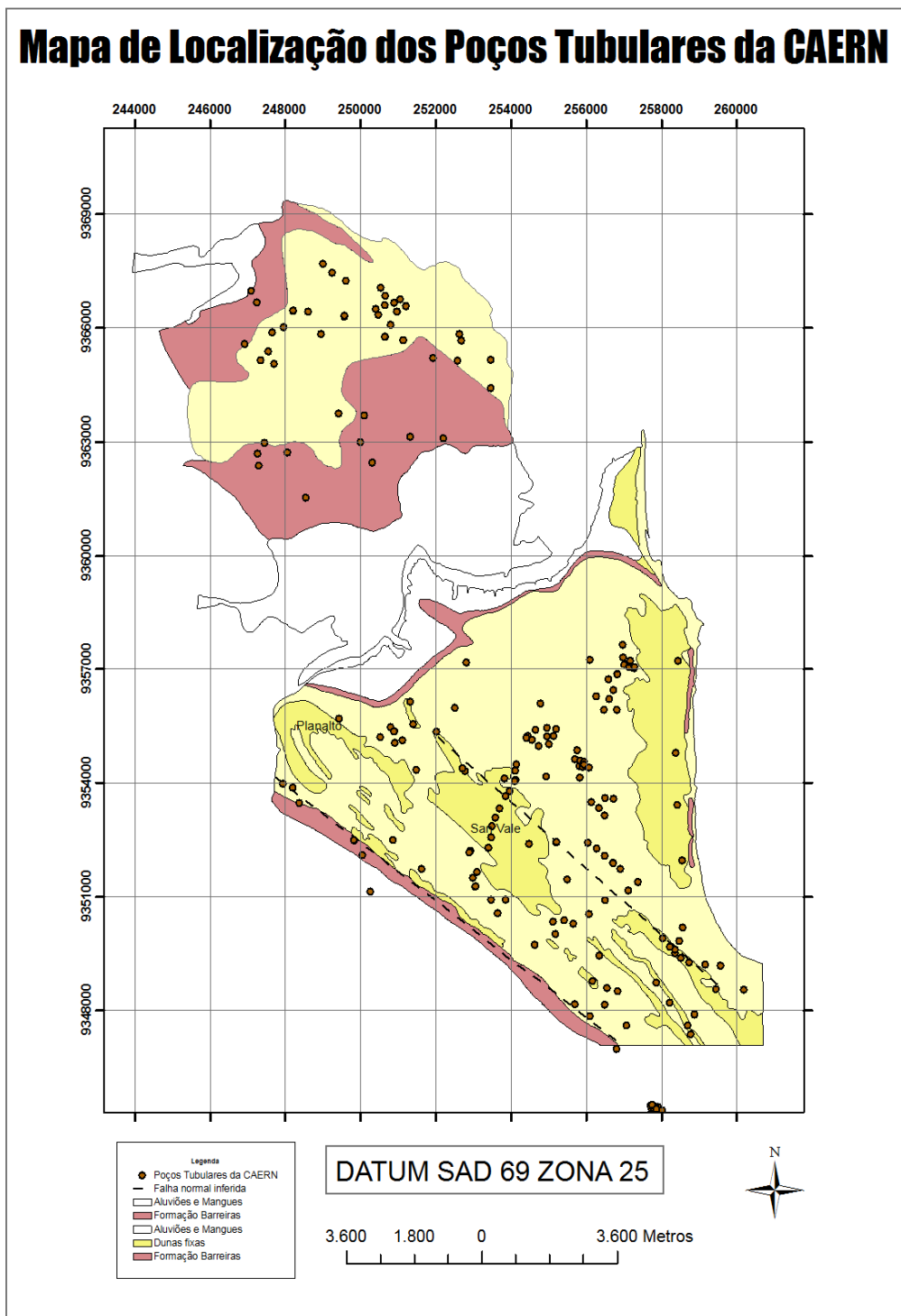


Figura 6.2 – Áreas produtoras de águas subterrâneas da CAERN na Zona Sul e Zona Norte da cidade do Natal. Fonte: banco de dados do IGARN (2007).

Assim, as principais captações do sistema Público de Abastecimento da CAERN de águas subterrâneas da Zona Sul são:

- Candelária;
- Novo Campo;
- Dunas;
- Lagoa Nova I;
- Lagoa Nova II;
- Ponta Negra;
- Cidade Satélite;
- Conjunto Jiqui;
- Planalto;
- Nova Cidade.
- Felipe Camarão – Cidade Nova;
- Nova Parnamirim;
- San Vale;
- Cidade da Esperança;
- Morro Branco;
- Quintas;
- Pirangi;
- Dix- Sept Rosado;
- Guarapes;

As principais captações do sistema Público de Abastecimento da CAERN de águas subterrâneas da Zona Norte são:

- Redinha;
- Pajuçara/Gramoré;
- Igapó;
- Potengi;
- Nova Natal;
- Gramorezinho;
- Rio Doce;
- Brasil Novo;
- Parque dos Coqueiros;
- Alvorada IV;
- Amarante;
- Soledade.
- Panatis;
- Lagoa Azul;
- Jardim Progresso;
- Santa Catarina.

6.3. Alternativas de Abastecimento de Água Subterrânea

A procura de novas áreas de exploração de água subterrânea no município de Natal deve-se a dois fatores principais. O primeiro refere-se ao aumento da população, sendo este fenômeno mais evidente na Zona Norte.

O segundo aspecto a ser considerado é a deterioração progressiva do principal manancial subterrâneo disponível como consequência da contaminação por nitrato, provocando a desativação de poços.

Diante desse conflito, alternativas tem sido analisadas pela CAERN, conforme a seguir (Fonte: Palestra apresentada por Queiroz (Seminário promovido pela ABES, 2007):

a) Locais ou “Áreas Preservadas” presentes dentro do perímetro urbano

- Área Militar – Capim Macio;
- Área de Proteção Ambiental do San Vale;
- Proteção Ambiental do Parque das Dunas - Via Costeira;

b) Litoral Sul

- Captação Subterrânea no entorno da Lagoa do Jiqui;

c) Litoral Norte

- Rio Doce/Zona Norte (margem esquerda)

7. INFILTRAÇÃO DA ÁGUA DE DRENAGEM PLUVIAL NO SOLO

7.1. Introdução

Infiltração é o processo de transferência da água da superfície para o interior do solo. Em condições favoráveis, em solos com superfície permeável preservada, a infiltração retém no solo grande parte das precipitações pluviométricas, reduzindo significativamente o escoamento superficial. Esse processo pode ser natural, infiltrando-se de forma difusa diretamente no solo da bacia ou induzido através de estruturas ou equipamentos apropriados para esse fim.

As características de drenagem de Natal - bacias de drenagem fechadas com solos permeáveis - recomendam o desenvolvimento de uma política de indução do processo de infiltração como elemento de drenagem, a partir da preservação de áreas de infiltração nos lotes e a construção de reservatórios de infiltração para receber as águas do sistema público de drenagem e promover a recarga induzida do aquífero.

7.2. Capacidade de infiltração

A infiltração da água na superfície de um solo pode ser avaliada pela lei de HORTON, dada pela equação seguinte:

$$f = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-kt}$$

Em que:

f = capacidade de infiltração depois do tempo t ;

f_o = capacidade de infiltração inicial ($t = 0$);

f_c = capacidade de infiltração final ($t = \infty$);

k = constante característica do solo.

t = intervalo de tempo;

Estudos realizados pelo SCS (Soil Conservation Service) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos chegaram aos valores da Tabela 1 para os parâmetros da fórmula de HORTON.

Tabela 7.1 - Parâmetros da fórmula de HORTON

Parâmetros	Classificação hidrológica do solo (SCS)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Taxa de infiltração inicial do solo seco: f_o (mm/h)	250	200	130	80
Taxa de infiltração final do solo úmido: f_c (mm/h)	25	13	7	3
Constante característica	2	2	2	2

Classificação hidrológica dos solos segundo o SCS:

- TIPO A - Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, com perfil uniforme e profundidade superior a 1,5 m
- TIPO B - Solos arenosos menos profundos, com teor de argila inferior a 15%, com presença de camadas inferiores densificadas, porém, sem a presença de camadas argilosas e blocos de pedras.
- TIPO C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30 %, sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo blocos de pedras até a profundidade 1,2 m. Nota-se a presença de camadas inferiores densificadas permeáveis.
- TIPO D - Solos argilosos (30 - 40% de argila total), com camadas intermediárias densificadas. Solos arenosos como B ou solos barrentos como C com camadas argilosa quase impermeável ou com pedras.

7.3. Ensaios de infiltração em Natal

A capacidade de infiltração de um solo é determinada por ensaios de permeabilidade que são associados ao método de prospecção empregado, tais como: sondagens a trado e a percussão, poços rasos e trincheiras.

Para a determinação “in situ” da capacidade de infiltração do solo nos projetos de drenagem recomenda-se a adoção de ensaios em cavas – tipo Matsuo para a superfície do solo e poços de sondagens para camadas inferiores.

As especificações dos ensaios de infiltração serão apresentadas no Manual de Drenagem a ser aprovado juntamente com o Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Natal, na última Audiência pública.

7.3.1. Taxas de infiltração na Zona Norte

Na Zona Norte foi realizado ensaios de permeabilidade do meio poroso insaturado pelo método de rebaixamento acima do nível d'água (Melo, 1998), conforme Tabela 4.2 seguinte, que corresponde as taxas de infiltração adotados nos projetos de drenagem.

Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica (K) para a Zona Norte.

Sonsagem a Trado (1998)	Local	Nível Testado (m)	K (m/s)
S4	Nova Natal	0,00 – 3,30	$1,5 \times 10^{-5}$
S5	Nova Natal	0,00 – 2,00	$3,2 \times 10^{-5}$
S8	Extremoz	0,00 – 20,00	$1,1 \times 10^{-6}$
S9	Extremoz	0,00 – 13,50	$9,9 \times 10^{-6}$
S10	Extremoz	0,00 – 07,50	$1,5 \times 10^{-6}$
S11	Nova Natal	0,00 – 18,00	$1,2 \times 10^{-6}$
S12	Nova Natal	0,00 – 16,10	$2,2 \times 10^{-6}$
S13	Santa Catarina	0,00 – 12,50	$2,0 \times 10^{-6}$
S15	Igapó	0,00 – 16,10	$1,4 \times 10^{-6}$
S16	Dunas VI	0,00 – 29,00	$3,7 \times 10^{-7}$

7.3.2. Taxas de infiltração da Zona Sul de Natal

A Tabela 7.3 seguinte apresenta os resultados dos testes de infiltração nas bacias XVII (San Vale/Cidade Satélite) e XIX (Lagoinha) que correspondem a área de recarga efetiva do aquífero de Natal proveniente do sistema de drenagem urbana, conforme proposta do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Natal.

Os testes de infiltração citados anteriormente compreenderam ensaios de permeabilidade do meio poroso insaturado pelo método de rebaixamento acima do nível d'água.

Tabela 7.3 - Ensaio de permeabilidade na área de recarga do aquífero de Natal – Zona Sul

Sub-Bacias	Ponto	Coordenadas do Ponto		Kvertical (2m)		Kvertical (4m)		Kvertical (6m)	
		X _{UTM}	Y _{UTM}	(cm/s)	(mm/h)	(cm/s)	(mm/h)	(cm/s)	(mm/h)
XVII-4-A	TP-01	253959	9353724	4,55E-04	16,38	3,87E-04	13,93	5,14E-04	18,50
XVII-4-B	TP-03	253995	9353249	3,91E-04	14,08	2,85E-04	10,26	8,60E-05	3,10
	TP-04	254072	9353174	6,78E-04	24,41	2,61E-04	9,40	1,59E-04	5,72
	Média	254034	9353212	5,35E-04	19,24	2,73E-04	9,83	1,23E-04	4,41
XVII-4-C	TP-09	253385	253385	5,07E-04	18,25	3,69E-04	13,28	4,69E-05	1,69
	TP-10	253629	253629	4,42E-04	15,91	3,94E-04	14,18	7,02E-05	2,53
	Média	253507	253507	4,75E-04	17,08	3,82E-04	13,73	5,86E-05	2,11
XVII-4-D	TP-05	253941	9352798	4,62E-04	16,63	2,44E-04	8,78	1,11E-04	4,00
	TP-06	254014	9352754	4,55E-04	16,38	1,65E-04	5,94	1,21E-04	4,36
	Média	253978	9352776	4,59E-04	16,51	2,05E-04	7,36	1,16E-04	4,18
XVII-6	TP-07	253945	9351467	5,44E-04	19,58	4,13E-04	14,87	2,08E-04	7,49
	TP-08	253985	9351425	5,64E-04	20,30	5,11E-04	18,40	3,97E-04	14,29
	Média	253965	9351446	5,54E-04	19,94	4,62E-04	16,63	3,03E-04	10,89
XIX-2-A	TP-03	257738	9350190	9,94E-04	35,78	1,37E-04	4,93	9,12E-06	0,33
	TP-04	257938	9350036	9,10E-04	32,76	9,70E-05	3,49	8,83E-06	0,32
	Média	257838	9350113	9,52E-04	34,27	1,17E-04	4,21	8,98E-06	0,32
XIX-2-B	TP-01	256697	9351913	7,63E-04	27,47	5,21E-04	18,76	2,77E-04	9,97
	TP-02	256647	9351707	8,59E-04	30,92	5,50E-04	19,80	3,07E-04	11,05
	Média	256672	9351810	8,11E-04	29,20	5,36E-04	19,28	2,92E-04	10,51
XIX-2-D	TP-01	257522	9350880	4,20E-06	0,15				
	TP-02	257579	9350953			3,83E-06	0,14		
	TP-03	257636	9351027	3,02E-06	0,11				
	TP-01	257707	9351068	3,12E-05	1,12	2,17E-05	0,78		
	TP-02	257675	9351122	2,91E-05	1,05	1,29E-05	0,46		
	Média	257624	9351010	1,69E-05	0,61	1,28E-05	0,46		
XIX-5	TP-01	257331	9350181	1,31E-03	47,16	3,14E-04	11,30	2,51E-04	9,04
	TP-02	257409	9350145	1,61E-03	57,96	2,28E-04	8,21	2,46E-04	8,86
	Média	257370	9350163	1,46E-03	52,56	2,71E-04	9,76	2,49E-04	8,95

As taxas de infiltração da área de recarga efetiva do aquífero de Natal estão representadas em mapas através de isolinhas de mesma taxa de infiltração para as três profundidades seguintes: 2,0 m (Figura 7.1); 4,0 m (Figura 7.2) e 6,0 m (Figura 7.3).

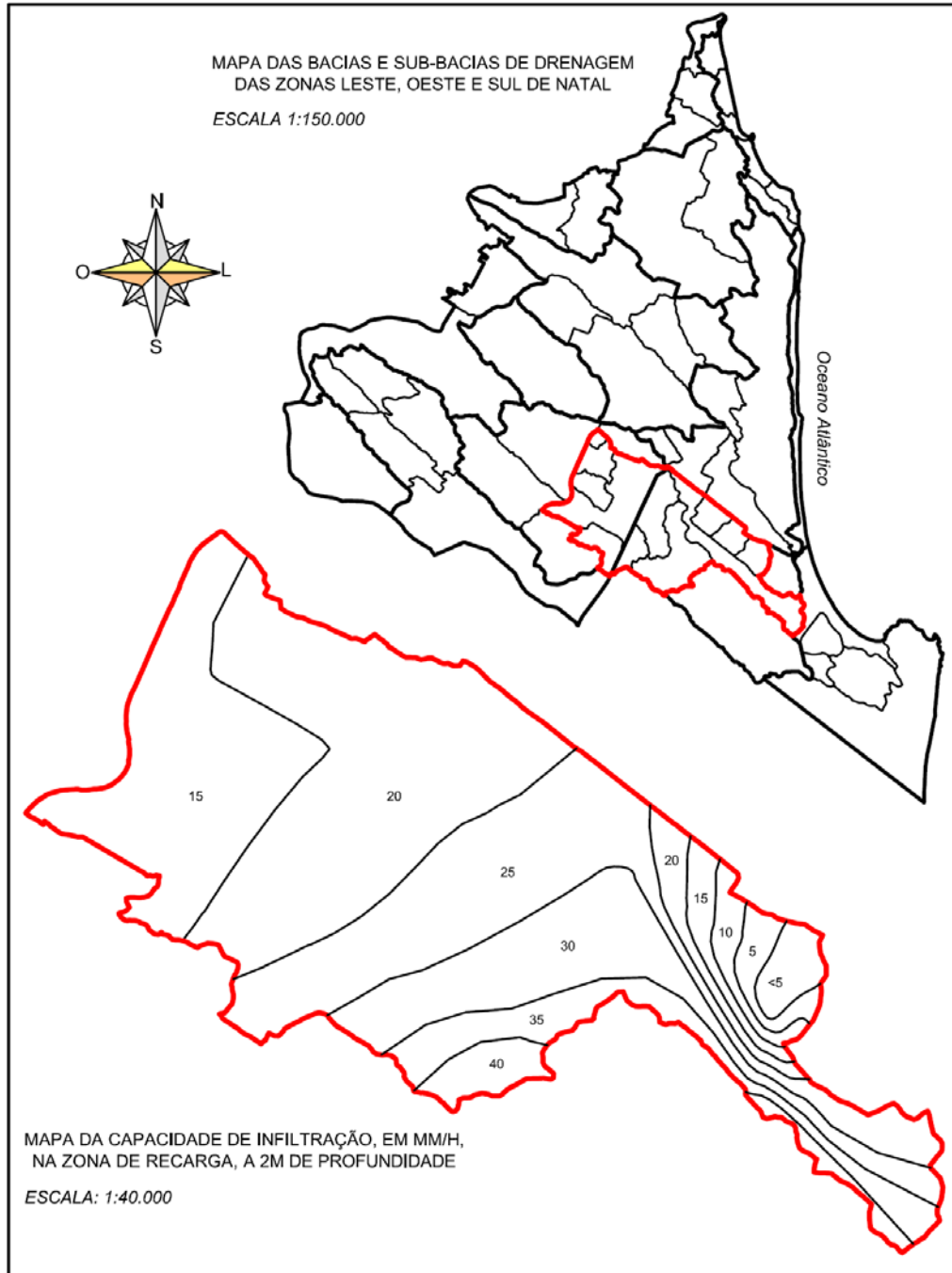


Figura 7.1 – Capacidade de infiltração do solo a 2 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal.

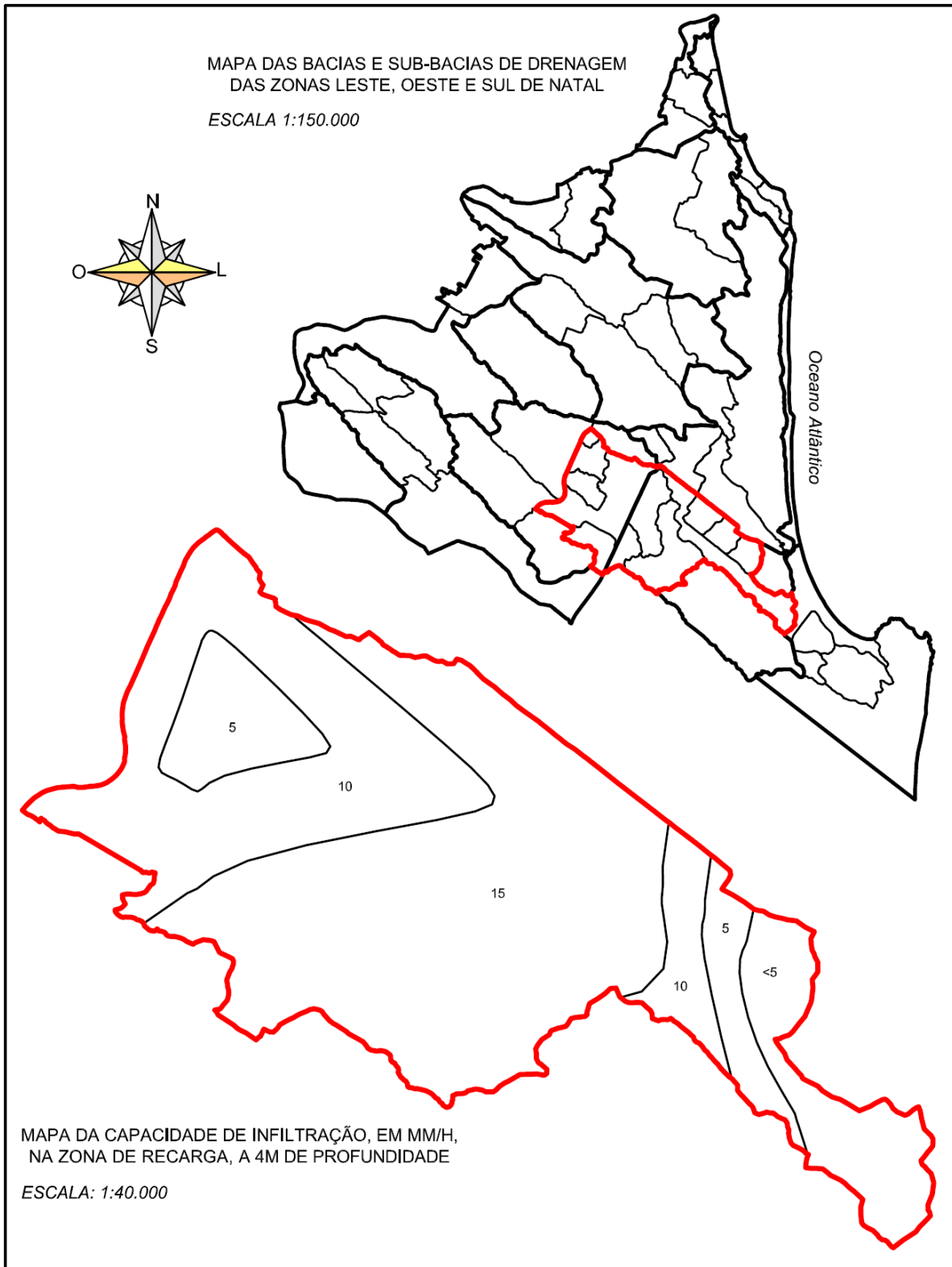


Figura 7.2 – Capacidade de infiltração do solo a 4 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal.

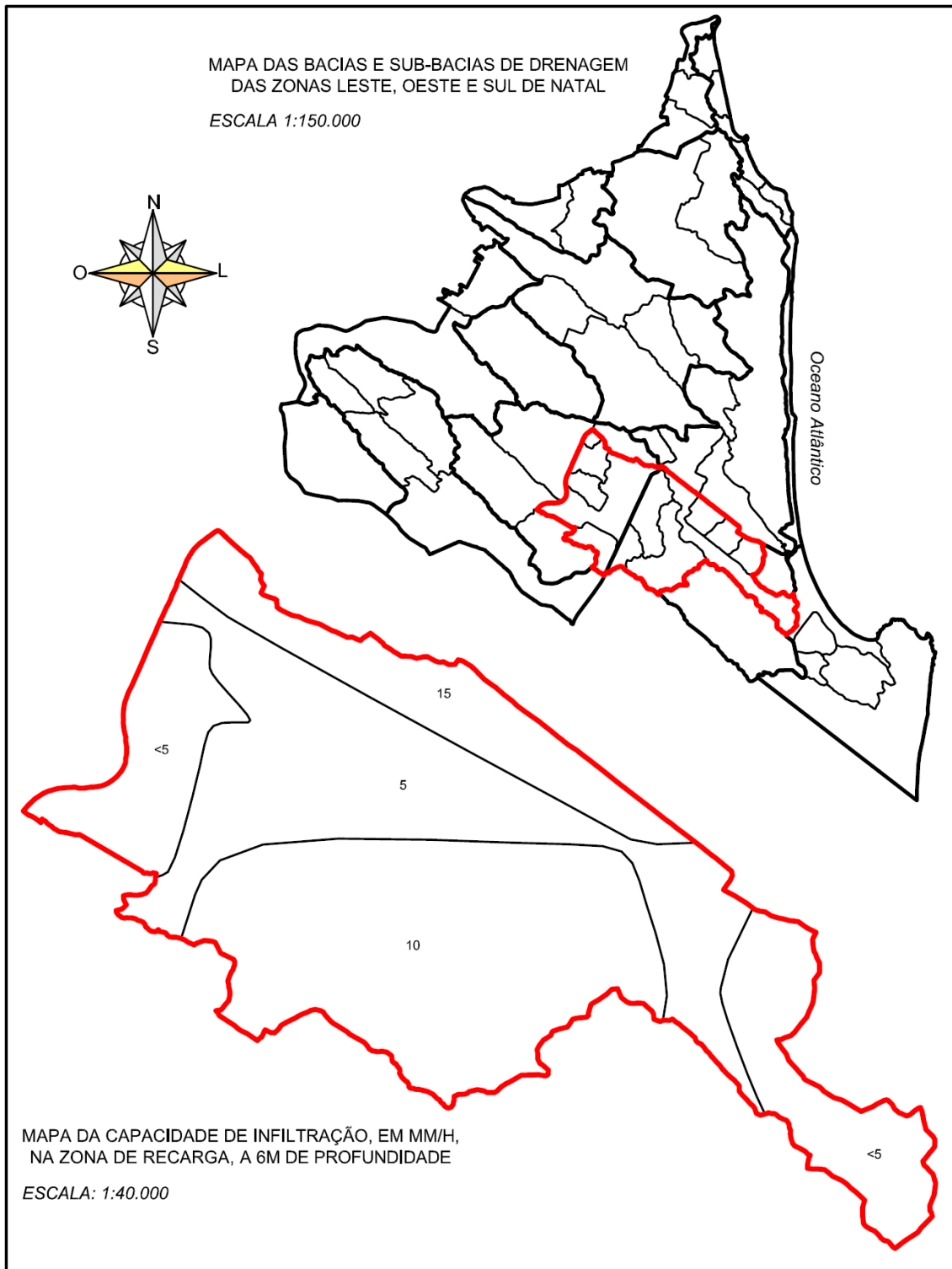


Figura 7.3 – Capacidade de infiltração do solo a 6 m de profundidade da área de recarga do aquífero de Natal

7.4. Capacidade de infiltração superficial de referência nas bacias de drenagem de Natal

Para efeito da avaliação da infiltração nos projeto de equipamentos de sistemas de drenagem de Natal recomenda-se a adoção da taxa de infiltração final do solo úmido (f_c) da fórmula de Horton citada anteriormente. Essa velocidade de infiltração mínima também é denominada de velocidade de infiltração básica (VIB).

Como referência para uma análise preliminar das condições de infiltração no município de Natal, recomenda-se:

- Os solos arenosos das coberturas de dunas preservadas como solos tipo A, aplicando-se nesse caso aos terrenos dos parques das Dunas e da Cidade e do cordão de dunas de Lagoinha.
- Nas regiões com cobertura de dunas descaracterizadas recomenda-se a classificação como solo tipo B, como é o caso dos bairros de Candelária e Mirassol e tendendo para uma classificação de solos tipo C em Lagoa Nova, Dix Sept Rosado, Tirol e Petrópolis e na Zona Norte.
- Nas locais com formações de solos de fundo de lagoa, tal como em Capim Macio e solos aluvionais do bairro da Ribeira e nos afloramentos do Barreiras recomenda-se a classificação como solo tipo D.

Desse modo, a Tabela 7.4 apresenta as taxas infiltração de referência para as bacias de drenagem de Natal, para condições superficiais, tendo como base a classificação dos tipos de solos proposto pelo SCS, conforme apresentado anteriormente.

Tabela 7.4 – Taxas de infiltração de referência das bacias de Natal

Bacias		Tipo do Solo	Taxa de infiltração mm/h
I	Rio Doce	A	25
II	Lagoa Azul	C	7
III	Lagoa de Extremoz	D	3
IV	Rio Golandim	D	3
V	Rio Potengi/Salinas	D	3
VI	Redinha	B	13
VII	Poteng/Rocas-Ribeira	D	3
VIII	Praias Urbanas	D	3
IX	Riacho do Baldo	C	7
X	Potengi/Quintas-Base Naval	D	3
XI	Parque das Dunas	A	25
XII	Rio das Lavadeiras	C	7
XIII	Via Costeira	D	3
XIV	Rio Potengi/Felipe Camarão	C	7
XV	Cidade da esperança	C	7
XVI	Rio Pitimbu	C	7
XVII	San Vale/Cidade Satélite	B	13
XVIII	Rio Jundiáí/Guarapes	D	3
XIX	Lagoinha	B	13
XX	Praia de Ponta Negra	C	7

Na elaboração de projetos executivos de drenagem em Natal recomenda-se a execução de testes de permeabilidade in situ.

8. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

A capacidade de infiltração de um solo é determinada por ensaios de permeabilidade que são associados ao método de prospecção empregado, tais como: sondagens a trado e a percussão, poços rasos e trincheiras.

Para a determinação "in situ" da capacidade de infiltração do solo nos projetos de drenagem recomenda-se a adoção de ensaios em cavas – tipo Matsuo para a superfície do solo e poços de sondagens para camadas inferiores.

As especificações dos ensaios de infiltração serão apresentadas no manual de drenagem.

9. AVALIAÇÃO DA RECARGA DO AQUÍFERO INDUZIDA PELO SISTEMA DE DRENAGEM DA CIDADE.

9.1. Bacias de drenagem de Natal

O sistema de drenagem de Natal é constituído de vinte bacias de drenagem, sendo que: seis dessas bacias estão localizadas na Zona Norte da Cidade, conforme Tabela 2, e as outros catorzes restantes encontram-se nas zonas Leste, Oeste e Sul, Tabela 3, drenando um área total de 14.200,3 ha.

Tabela 9.1 – Bacias de drenagem da Zona Norte de Natal (Estudos Hidrológicos do PDDMA: 1º)

Bacias	Área (ha)	
	Abertas	Fechadas
I Rio Doce	617,5	
II Lagoa Azul	2.417,1	
III Lagoa de Extremoz	100,2	
IV Rio Golandim	181,5	
V Rio Potengi/Salinas	885,4	
VI Redinha	108,2	
Total Zona Norte	4.309,9	

Tabela 9.2 – Bacias de drenagem das zonas Leste/Oeste/Sul (Estudos Hidrológicos do PDDMA: 1º Relatório)

ZONAS LESTE/OESTE/SUL		
Bacias	Área (ha)	
	Abertas	Fechadas
VII Potengi/Rocas-Ribeira	376,3	
VIII Praias urbanas	218,2	
IX Riacho do Baldo	714,8	
X Potengi/Quintas-Base Naval	304,1	
XI Parque das Dunas		1.194,0
XII Rio das Lavadeiras	1.264,8	
XIII Via Costeira	116,2	
XIV Rio Potengi/Felipe Camarão	712,6	
XV Lagoas da Jaguarari		431,8
XVI Rio Pitimbú	1.048,9	
XVII San Vale/Cidade Satélite		1.145,4
XVIII Rio Jundiá/Guarápes	398,0	
XIX Lagoinha		1.016,0
XX Praia de Ponta Negra	949,3	
Total Zonas Leste/Oeste/Sul	6.103,2	3.787,2
Total Natal	10.413,1	3.787,2
TOTAL GERAL	14.200,3	

As bacias de drenagem de Natal praticamente se desenvolvem plenamente no território municipal, tendo em vista que o município de Natal recebe pequenas contribuições hídricas superficiais externas ao seu perímetro urbano, que, nesse caso, podem ser desprezadas no balanço hídrico global do Município.

Para efeito de balanço hídrico, distinguem-se as bacias de drenagem de Natal em bacias abertas e fechadas.

As bacias fechadas, sem exutório de escoamento superficial, localizam-se nas zonas Oeste e Sul, compreendendo as Bacias do Parque das Dunas, Lagoas da Jaguarari, San Vale/Cidade Satélite e Lagoinha, com uma área de drenagem de 3.787,2 há, correspondendo a 26,7% do território municipal.

Nas bacias de drenagem fechadas a recarga do aquífero é potencializada pelo sistema de drenagem, tendo em vista que: com a impermeabilização do solo as perdas por evapotranspiração da bacia são reduzidas significativamente, aumentando, conseqüentemente, os volumes do escoamento superficial que são direcionados para os

reservatórios de detenção e infiltração, que estão sujeitos a perdas por evaporação bem menores do que as taxas de infiltração no solo, recarregando, dessa forma, o aquífero de uma forma muito mais eficiente que no processo natural.

9.2. Avaliação da recarga induzida pelo sistema de drenagem

Para efeito de avaliação da recarga induzida pelo sistema de drenagem de Natal foi desenvolvido o balanço hídrico das bacias fechadas urbanizadas, conforme Tabela 4 seguinte, englobando as bacias Lagoas da Jaguarari, San Vale/Cidade Satélite e Lagoinha. Para isso adotou-se como parâmetros: a precipitação média de Natal, coeficientes de deflúvios adequados as condições das bacias e uma eficiência de recarga nos reservatórios de infiltração de 80%.

Tabela 9.3 – Balanço hídrico das bacias fechadas urbanizadas de Natal

Bacias de drenagem	Superfície	Coeficiente de deflúvio	Precipitação	Volume escoado
	ha		mm/ano	m³/ano
Lagoas da Jaguarari (XV)	431,8	0,6	1550	4.015.740,0
San Vale/Cidade Satélite (XVII)	1.145,4	0,4	1550	7.101.480,0
Lagoinha (XIX)	1.016,0	0,5	1550	7.874.000,0
Total	2.593,2		1550	18.991.220,0

Recarga média anual do aquífero de Natal = 70.000.000,0 m³

Recarga induzida0,8 x 18.991.220,0 = 15.192.976,0 m³

As análises dos números anteriores mostram que o acréscimo de recarga induzida pelo sistema de drenagem nas bacias fechadas representa 21,7 % da recarga total no município.

9.3. Impactos da recarga induzida no aquífero

Os impactos da recarga induzida no aquífero pelo sistema de drenagem estão relacionados com a elevação do nível do lençol freático.

Dessa forma, para as condições de precipitações médias em Natal adotadas como referência nos estudos hidrogeológicos, dividindo-se o volume da recarga induzida (V_{ri}) pela porosidade eficaz ($\Delta\Theta$) e pela superfície total das bacias de drenagem fechadas (S_{bf}), condições mais desfavorável, chega-se a seguinte elevação da superfície freática (Δh):

$$\Delta h = \frac{1}{\Delta\Theta} \frac{V_{ri}}{S_{bf}} = \frac{15.192.976(m^3)}{0,1 \times 2.593,2 \times 10^4 (m^2)} = 5,856 \text{ m}$$

A análise comparativa da variação da superfície freática decorrente da recarga induzida pelo sistema de drenagem de Natal, avaliada em 5,856 m, com as oscilações médias da superfície freática do aquífero de Natal, da ordem de 7,0 m, permite concluir pela relevância desses impactos, principalmente nas regiões próximas às lagoas decorrentes do afloramento do lençol freático, orientado a necessidade de se implanta conjuntamente as políticas de recarga induzida e reutilização dessas água pelo sistema de abastecimento urbano através de captações de poços na região de recarga induzida.

10. RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO E INFILTRAÇÃO

10.1. Introdução

O processo de infiltração em reservatórios ocorre em dois estágios:

Fase 1: acumulação de água no reservatório tendo em vista que a infiltração no solo é um fluxo secundário frente as vazões afluentes decorrentes do sistema drenagem, com período de duração de horas.

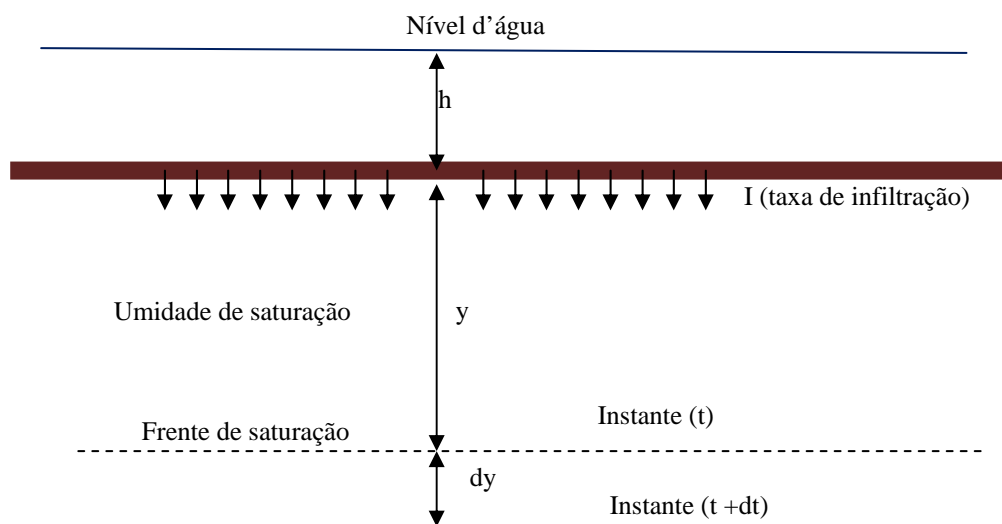
Fase 2: esvaziamento do reservatório pelo efeito da infiltração da água no solo a partir do reservatório com período de duração de vários dias.

10.2. Método de Green Ampt aplicado a infiltração a partir de um reservatório

As perdas d'água num reservatório de infiltração se assemelham às condições de infiltração estabelecidas no modelo de Green Ampt, derivado da equação de Darcy e desenvolvido para avaliar a percolação em meios não saturados. Tal método simula o efeito do avanço da frente de umidade de saturação no interior do solo, também chamada de frente de molhamento, a partir da superfície mantida em condições permanentes de saturação, conforme a seguinte fórmula:

$$I = K' \frac{\varphi_f + y}{y} \quad (01)$$

Em que: I é a taxa de infiltração; K' é a condutividade hidráulica saturada aparente do solo (equivalente ao f_c da fórmula de Horton); φ_f é o potencial gravitacional e y é a profundidade da superfície até a frente de molhamento, conforme esquema a seguir:



Capacidade de campo

Lençol freático

Nesse caso: o solo é considerado totalmente saturado da superfície até a frente de molhamento e abaixo da frente de saturação a umidade, em todo o perfil do solo, mantém-se igual à capacidade campo.

Admitindo o potencial gravitacional φ_f equivalente a carga hidráulica na superfície do solo (h), chega-se:

$$I = K' \frac{h + y}{y} \quad (02)$$

De acordo com a equação anterior a taxa de infiltração (I) se reduz com o aumento da profundidade da frente de saturação, permanecendo constante a partir do momento que a frente de saturação encontra a superfície freática.

10.3. Infiltração d'água no reservatório com carga hidráulica constante

A velocidade média de infiltração (I) no fundo de um reservatório no intervalo de tempo dt, mantida a lâmina d'água constante no período, pode ser avaliada pelo produto da variação da frente de saturação pela variação da umidade do solo ($\Delta\Theta$), determinada pela diferença entre a umidade de saturação e a capacidade de campo do solo (para as condições de solo arenoso de Natal recomenda-se $\Delta\Theta \cong 0,1$). Isto é:

$$I = \Delta\Theta \frac{dy}{dt} \quad (03)$$

Combinando-se as equações (02) e (03), obtém-se:

$$\Delta\Theta \frac{dy}{dt} = K' \frac{h + y}{y} \quad (04)$$

Separando-se as variáveis (t e y) e integrando-se a equação (04) chega-se à seguinte equação para a determinação do tempo total de avanço (t) associado a uma dada profundidade da frente de avanço (y), para uma condição de carga hidráulica constante e partindo-se da condição inicial t=0 e y=0.

$$t = \frac{\Delta\Theta}{K'} (y - h \cdot \ln(1 + y/h)) \quad (05)$$

A equação anterior permite também se determinar, com o auxílio de um processo iterativo e para as mesmas condições estabelecidas anteriormente, a profundidade da frente de avanço associada com um determinado tempo total de avanço.

10.4. Infiltração d'água num reservatório com carga variável

Para uma situação de carga variável, o intervalo de tempo associado com um rebaixamento de uma profundidade y^t para uma y^{t+1} pode ser determinado pela expressão seguinte derivada da integração da equação (04), admitindo-se uma carga hidráulica constante no intervalo de tempo.

$$\Delta t = \frac{\Delta\Theta}{K'} \int_{y^t}^{y^{t+1}} \frac{h+y}{y} dy = \frac{\Delta\Theta}{K'} [F(y^{t+1}) - F(y^t)] \quad (06)$$

Onde: y^t e y^{t+1} são as profundidades da frente de avanço nos instantes inicial e final do intervalo de tempo Δt e $F(y^{t+1})$ e $F(y^t)$ são funções da integral definida da equação (06) nos limites y^{t+1} e y^t :

Para uma dada profundidade y e carga h, determina-se:

$$F(y^t) = \bar{h}^t + y^t - \bar{h}^t \cdot \ln(\bar{h}^t + y^t) \quad (07)$$

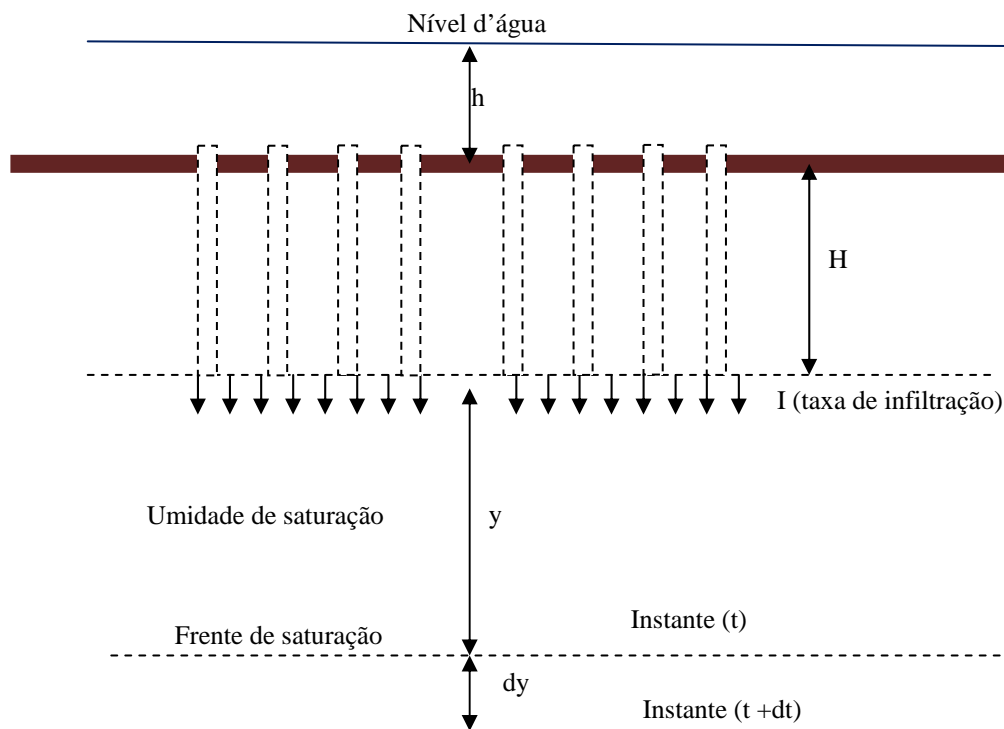
$$F(y^{t+1}) = \bar{h}^t + y^{t+1} - \bar{h}^t \cdot \ln(\bar{h}^t + y^{t+1}) \quad (08)$$

Em que: \bar{h}^t é a carga hidráulica média no intervalo de tempo Δt sendo associado com a variação da profundidade da frente de saturação no caso de esvaziamento de um reservatório, isto é;

$$\bar{h}^t = \Delta \Theta (y^{t+1} - y^t) \quad (09)$$

10.5. Infiltração induzida por poços

A implantação de poços de infiltração nos fundos de reservatórios amplia significativamente as taxas de infiltração dado que aumenta a carga hidráulica de um valor equivalente a altura do poço aumentando também a infiltração lateral, conforme esquema mostrado a seguir:



Capacidade de campo

L.R. ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA

Rua Bel. Francisco Menezes de Mello, 89 - Ponta Negra - Natal RN
 CEP 59.082-354 - Fone/Fax: (084) 3219-3827 - 9407 1489
 CNPJ: 70.052.634/0001-73 Insc. Est.: 20.041.249-3

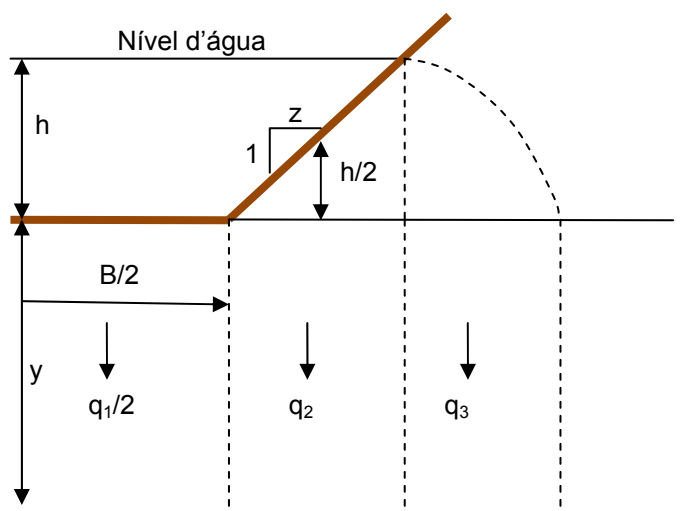
Lençol freático

10.6. Infiltração em lagoas com afloramento do lençol freático

A infiltração em lagoas onde ocorre afloramento do lençol freático é determinada pelo fluxo de água subterrânea do aquífero aflorante, que depende das condições de contorno e das características hidrogeológicas do mesmo. Portanto, a avaliação das perdas de águas numa lagoa, nesse caso, requer um estudo hidrogeológico de caráter regional.

10.7. Infiltração lateral em reservatórios

O esquema abaixo mostra a composição dos fluxos de saída de um reservatório de infiltração por unidade de comprimento, onde: q_1 é a vazão percolada pelo fundo da lagoa; q_2 é a vazão percolada pela projeção horizontal do talude do reservatório e q_3 é a vazão percolada horizontalmente.



As equações abaixo permitem calcular os fluxos (q_1 , q_2 e q_3) na metade de um reservatório de infiltração simétrico.

$$q_1 = K_y \left(\frac{y+h}{y} \right) B \quad (10)$$

$$q_2 = K_y \left(\frac{y+h}{y+h/2} \right) z.h \quad (11)$$

$$q_3 = \sqrt{2K_x K_y \left(\frac{h^3}{3y} + \frac{h^2}{2} \right)} \quad (12)$$

Em que: K_x é a permeabilidade horizontal e K_y é a permeabilidade vertical e z é a cotangente do ângulo que o talude do reservatório forma com a horizontal.

10.8. Aplicação da metodologia

Para exemplificar, a metodologia proposta foi aplicada na avaliação da infiltração a partir de um reservatório cujos dados de projeto são os seguintes:

- Taxa de infiltração de referência de 0,120 m/dia;
- Carga hidráulica de 2,0 m;
- Profundidade do lençol freático de 10 m.
- Variação da umidade do solo ($\Delta\theta$) de 0,1
- Largura do fundo do reservatório de 100 m
- Comprimento do reservatório de 200 m
- Inclinação do talude 2:1 ($z = 2$)

a) Taxa de infiltração no fundo do reservatório

O quadro 10.8.1 seguinte mostra a evolução da taxa de infiltração no fundo do reservatório para uma carga hidráulica constante

Quadro 10.8.1 – Quadro da evolução da taxa de infiltração no transcorrer de tempo

y	t	dy	dt	I
(m)	(dia)	(m)	(dia)	(m/dia)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1,000	0,158			
2,000	0,511	1,000	0,354	0,283
3,000	0,973	1,000	0,461	0,217
4,000	1,502	1,000	0,529	0,189
5,000	2,079	1,000	0,576	0,173
6,000	2,690	1,000	0,611	0,164
7,000	3,327	1,000	0,637	0,157
8,000	3,984	1,000	0,658	0,152
9,000	4,659	1,000	0,674	0,148
10,000	5,347	1,000	0,688	0,145

Observações:

Na tabela anterior:

- (1) - Profundidade da frente de saturação.
- (2) - Tempo total de avanço determinado pela equação (05),
- (3) - Intervalo entre as profundidades da frente de avanço.
- (4) - Intervalo de tempo associado com a variação das profundidades da frente avanço.
- (5) – Taxa média de infiltração da lagoa no intervalo de tempo determinada pela Equação (03).

b) Esvaziamento do reservatório

O processo de esvaziamento do reservatório do reservatório é apresentado no quadro seguinte

y	h	F(y)	dt	t	I
(m)	(m)		(dia)	(dia)	(mm/h)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0,000	2,000	0,614	-	0,000	-
1,000	1,900	0,840	0,189	0,189	0,529
2,000	1,800	1,356	0,430	0,619	0,233
3,000	1,700	2,023	0,556	1,175	0,180
4,000	1,600	2,793	0,641	1,816	0,156
5,000	1,500	3,637	0,703	2,519	0,142
6,000	1,400	4,538	0,751	3,270	0,133
7,000	1,300	5,485	0,789	4,059	0,127
8,000	1,200	6,469	0,820	4,880	0,122
9,000	1,100	7,485	0,846	5,726	0,118
10,000	1,000	8,527	0,869	6,595	0,115
10,000	0,885	-	1,000	7,595	0,115
10,000	0,770	-	1,000	8,595	0,115
10,000	0,655	-	1,000	9,595	0,115
10,000	0,540	-	1,000	10,595	0,115
10,000	0,424	-	1,000	11,595	0,115
10,000	0,309	-	1,000	12,595	0,115
10,000	0,194	-	1,000	13,595	0,115
10,000	0,079	-	1,000	14,595	0,115
10,000	0,000	-	0,688	15,283	0,115

Observações:

Na tabela anterior:

(1) - Profundidade da frente de saturação.

- (2) - Profundidade da lâmina d'água no reservatório, cuja variação é dada pelo produto da variação da umidade do solo ($\Delta\Theta$) pela variação da profundidade da frente de avanço.
- (3) – Função da integral definida calculado pela Equação (07).
- (4) – Intervalo de tempo associado com a variação da frente de avanço determinado pela Equação (06).
- (5) – Tempo acumulado desde o início do processo de esvaziamento do reservatório.
- (6) - Taxa média de infiltração da lagoa no intervalo de tempo determinada pela Equação (03)

c) Vazão total infiltrada no reservatório

A vazão total Infiltrada no reservatório, mantido o nível d'água constante e para uma condição onde a frente de avanço alcança o nível do lençol freático situado 10 m abaixo do fundo do reservatório, foi avaliada a partir da combinação dos resultados das equações 10, 11 e 12.

$$Q_1 = K_y \left(\frac{y+h}{y} \right) B.L = 0,12 \left(\frac{10+2}{10} \right) 100 \times 200 = 2905,649 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_2 = K_y \left(\frac{y+h}{y+h/2} \right) z.h.2(B+L) = 0,12 \left(\frac{10+2}{10+2/2} \right) 2 \times 2 \times 2.(100+200)$$

$$Q_2 = 314,182 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_3 = 2(B+L) \sqrt{2K_x K_y \left(\frac{h^3}{3y} + \frac{h^2}{2} \right)} = 2(100+200) \sqrt{2 \times 0,12^2 \left(\frac{2^3}{3 \times 10} + \frac{2^2}{2} \right)}$$

$$Q_3 = 153,300 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\text{Vazão total infiltrada} = 2.905,649 + 314,182 + 153,300 = 3.373,131 \text{ m}^3/\text{dia}$$

- d) Fluxo total induzida por poços de infiltração com 5 m de profundidade abaixo do fundo do reservatório.

O quadro seguinte mostra a evolução da taxa de infiltração no fundo do reservatório para uma carga hidráulica constante de 7 m (2 m de lâmina d'água acrescido dos 5,0 m dos poços de infiltração).

y (m)	t (dia)	dy (m)	dt (dia)	I (m/dia)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
5,000	0,054			
6,000	0,201	1,000	0,146	0,684
7,000	0,419	1,000	0,219	0,457
8,000	0,697	1,000	0,277	0,361
9,000	1,023	1,000	0,326	0,307
10,000	1,389	1,000	0,366	0,307

A vazão total Infiltrada no reservatório, mantido o nível d'água constante e para uma condição onde a frente de avanço alcança o nível do lençol freático situado 10 m abaixo do fundo do reservatório, foi avaliada a partir da combinação dos resultados das equações 10, 11 e 12.

$$Q_1 = K_y \left(\frac{y+h}{y} \right) B.L = 0,12 \left(\frac{5+7}{5} \right) 100 \times 200 = 5.760,000 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_2 = K_y \left(\frac{y+h/2}{y} \right) 2z.h.(B+L) = 0,12 \left(\frac{5+7/2}{5} \right) 2 \times 2 \times 2.(100+200)$$

$$Q_2 = 489,600 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_3 = 2(B+L) \sqrt{2K_x K_y \left(\frac{h^3}{3y} + \frac{h^2}{2} \right)} = 2(100+200) \sqrt{2 \times 0,12^2 \left(\frac{7^3}{3 \times 5} + \frac{7^2}{2} \right)}$$

$$Q_3 = 700,784 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\text{Vazão total infiltrada} = 5.760,00 + 489,600 + 700,784 = 6.950,384 \text{ m}^3/\text{dia}$$

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (1990). Ensaio de permeabilidade em solos. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, SP.

ACQUA-PLAN (1978). Recarga artificial aplicada à drenagem urbana de Natal, RN. Elementos para o Projeto Piloto da Bacia SI-2 (Campo do Preá). Estudos, Projetos e Consultoria, Relat. Final, Recife, PE.

ACQUA-PLAN (1988). Avaliação das possibilidades de infiltração de efluentes domésticos no aquífero Dunas, na área de Natal-RN. Estudos, Projetos e Consultoria, Recife, PE, 121p. il..

BEZERRA, F.H.R.; SAADI, A; MOREIRA, J. A.M. ; LINS, F.AP.L.; NOGUEIRA, A.M.B.; MACEDO, J.W.P.; LUCENA, L.F. & NAZARÉ Jr. D. (1993). Estruturação neotectônica do litoral de Natal (RN), com base na correlação entre dados geológicos, geomorfológicos e gravimétricos. IN: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 4., 1993, Belo Horizonte – MG. Anais... Belo Horizonte - MG: SBG, p. 317-321.

CARVALHO Jr., E.R.C. (2001). Contaminação das Águas Subterrâneas por Nitrato e sua Relação com a Estrutura Hidrogeológica nos Bairros de Pirangi e Ponta Negra. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Departamento de Geologia da UFRN. Dissertação de Mestrado.

CASTANY G. (1971). *Tratado Practico de las Aguas Subterraneas*. Barcelona, Ediciones Omega S. A., 672 p.

COSTA, W.D. (1970). Estudo hidrogeológico de Natal/RN. Consultoria Técnica de Geologia e engenharia (CONTEGE), Companhia de Águas e esgotos do estado do rio Grande do Norte (CAERN). Recife, PE., 224p.

DUARTE, M. I. M. (1995). Mapeamento Geológico e Geofísico do Litoral Leste do RN: Grande Natal (Área I). Departamento de Geologia da UFRN. Relatório de Graduação.

FEITOSA E. C. & MELO J.G. (1997). *Relatório Diagnóstico dos dados e Informações disponíveis. Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Natal, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos/Hidroservice engenharia Ltda.

FONSECA V.P., MELO, F.T.L., BEZERRA F.H.R, AMARAL R.F., AMARO V.E. (1997). *Mapeamento Geológico – Geomorfológico (1:250.000) do Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte: Primeiros Resultados*. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Fortaleza, Boletim 15, p. 378-382.

IPT/SEPLAN RN. 1981. Reconhecimento Hidrogeológico e Estudo sobre a qualidade atual das águas Subterrâneas da Grande Natal. Relatório n. 14.813, junho.

IPT 1982. *Estudos Hidrogeológico Regional Detalhado do Estado do Rio Grande do Norte*. Secretaria de Indústria e Comércio do Rio Grande do Norte, Vol.1, 389 p.

KRESIC, N. 1996. *Quantitative Solution in Hydrogeology and Groudwater Modeling*. Lewis Plubishers, New York.

MABESSONE J.M. & ALHEIROS M.M. 1991. Base Estrutural. In: *Estudos Geológicos: Revisão Geológica da Faixa Costeira de Pernambuco, Paraíba e Parte do Rio Grande do Norte*, UFPE - Recife, Série B, v. 10, p. 33-43.

MEDEIROS, T.H.L. (2001). *Evolução Geomorfológica, (Des)Caracterização e Formas de Uso das Lagoas da Cidade do NATAL-RN*. PPGG – UFRN. Dissertação de Mestrado, 99 p.

MELO J.G. 1995. *Impactos do Desenvolvimento Urbano nas Águas Subterrâneas de Natal/RN*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 196 p.

MELO, José Geraldo. 1998. *Avaliação dos recursos de contaminação e proteção das águas subterrâneas de Natal-Zona Norte*. 11998. CAERN - Divisão de Hidrogeologia, Natal, 101 P.

MELO J.G.; QUEIROZ M.A.; HUNZIKER 1998. Mecanismos e Fontes de Contaminação das Águas Subterrâneas de Natal/RN Por Nitrato. In: ABAS, Congr. Bras. De águas Subterrâneas, 10, São Paulo,CD-ROM, p.585-661.

MELO J.G. & QUEIROZ M.A 1998. Situação Atual da Exploração das Águas Subterrâneas da Região da Grande Natal-RN, BR. In: ALHSUD, Congr. LatinoAmericano de Hidrologia Subterrânea, 4, São Paulo,CD-ROM, 8p.

NUNES E. 1996. Aspectos morfo-estruturais, fisiográficos e de coberturas de alterações intempéricas, como base para o macrozoneamento Geo-ambiental da Grande Natal – RN. Tese (Doutorado). UNESP. Rio Claro – SP. 191 p.

PLANAT/CAERN 1982. *Disponibilidade de Recursos Hídricos na Região de Natal*. Água de Superfície, 24 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. 2008. *Estudos Hidrogeológicos – 1º Relatório*. Plano Diretor de Drenagem e Manejo de água Pluviais, Natal, RN.

QUEIROZ, M.A 2007. *Perspectivas do Abastecimento de Água da Região Metropolitana do Natal*. Seminário promovido pela ABES - Natal.

SILVEIRA, A. L; LOUZADA, J. A. e BELTRAME, L. 1993. *Infiltração e Armazenamento de Água no Solo* - Hidrologia: Ciência e Aplicação. ABRH, Porto Alegre, RS.

SRPPE 1995. *Caracterização das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Norte*. Secretaria de Recursos Hídricos e Projetos Especiais do Estado do Rio Grande do Norte, 41 p.

"Nossa missão é servir com excelência, ética e eficiência, contando com servidores competentes e valorizados, primando todos pelo respeito ao cidadão e ao meio ambiente, contribuindo para fazer de Natal uma cidade cada vez mais humana, socialmente mais justa, solidária e sustentável, com a melhor qualidade de vida para toda a população".

VASCONCELOS, N. S. (2002). O Avanço da Contaminação Por Nitrato nas Águas Subterrâneas da Zona Sul de Natal. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Departamento de Geologia da UFRN. Dissertação de Mestrado, 98 p.