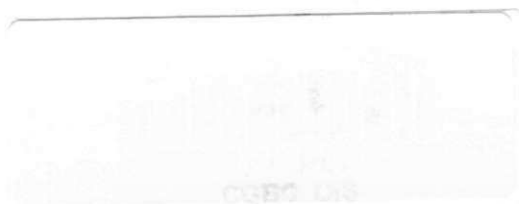


UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**- Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas:
aplicação em uma área urbana costeira**

Susana Cristina Batista Lucena

CAMPINA GRANDE-PB
DEZEMBRO DE 2007



Susana Cristina Batista Lucena

**Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas:
aplicação em uma área urbana costeira**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

*Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica.*

Orientadores:

Carlos de Oliveira Galvão

Iana Alexandra Alves Rufino

**CAMPINA GRANDE-PB
DEZEMBRO DE 2007**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

L935e

2007 Lucena, Susana Cristina Batista.

Estimativa de recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira / Susana Cristina Batista Lucena. — Campina Grande: 2007.

101f. : il

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Dr. Carlos de Oliveira Galvão e Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino.

1. Balanço Hídrico. 2. Estimativa de recarga. 3. Alagamento Urbano. 4. Sistemas de Informações Geográficas I. Título.

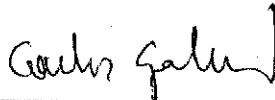
CDU 556.18 (043)

SUSANA CRISTINA BATISTA LUCENA

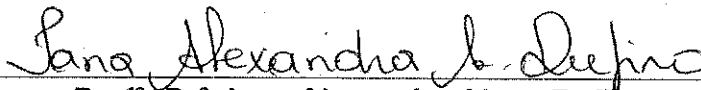
ESTIMATIVA DE RECARGA PARA GESTÃO DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO EM UMA ÁREA
URBANA COSTEIRA

APROVADA EM 20 DE DEZEMBRO DE 2007

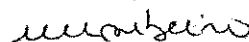
COMISSÃO EXAMINADORA:



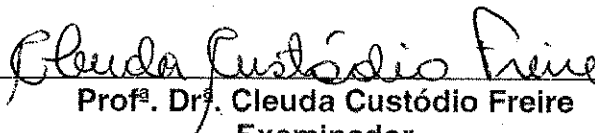
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Orientador



Prof^ª. Dr^ª. Iana Alexandra Alves Rufino
Orientador



Prof^ª. Dr^ª. Márcia Maria Rios Ribeiro
Examinador



Prof^ª. Dr^ª. Cleuda Custódio Freire
Examinador

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO - 2007

Aos meus pais, Olívia e José
Gomes, pelo apoio e
incentivo; aos meus filhos,
Francisco Neto e M^a Olívia
que, mesmo
involuntariamente,
participaram deste trabalho e
ao meu marido, Antônio
Cláudio, pelo amor e
paciência... **DEDICO.**

AGRADECIMENTOS

Sem **Ele** eu não sou nada, mas com **Ele** eu posso todas as coisas através de **Jesus Cristo**, que me fortalece. (Filipenses 4:13).

Ao orientador **Carlos Galvão** por acreditar em mim e pela paciência, incentivo, amizade e transmissão de conhecimentos.

À co-orientadora **Iana Rufino** que surgiu como um anjo e me ajudou a desempenhar as tarefas necessárias à realização deste trabalho.

Ao professor **Janiro C. Rêgo** e aos **demais professores** da área de Recursos Hídricos pela transmissão de conhecimentos.

Às amigas **Talita e Katiana** pela parceria no primeiro ano do mestrado e a **Isabel Mota** que no segundo ano soube ser amiga, parceira de atividades e conselheira.

A **Jozivan Marques e Jonh Elton** pelo empenho e contribuição.

Aos amigos **Rodolfo e Marília** pela paciência e aos demais colegas do laboratório de Hidráulica II pela saudável convivência.

À amiga **Jozilene de Souza** pelo apoio.

Às professoras **Cleuda Freire e Márcia M^a Rios** por aceitarem o convite de participação na banca examinadora.

A **Vanessa Queiroz** pelos momentos em que assumiu o papel de mãe da minha filha para que eu pudesse estudar.

A **Joseilda** pela amizade e apoio durante esses dois anos.

A **CAPES**, pelo auxílio financeiro e a todos seus membros que direta ou indiretamente colaboraram com esta pesquisa.

Ao **INMET**, na pessoa de Lissandra Mota e à **AESA/LMRS**, na pessoa de Carmem Becker pelo fornecimento dos dados.

Aos **funcionários do Laboratório de Hidráulica**, em especial a Ismael, Valdomiro e Vera. A **Aurezinha** pela amizade e incentivo.

Enfim, a todos que torceram por mim e me ajudaram, tornando possível a realização deste sonho.

RESUMO

As áreas urbanas costeiras, de maneira geral, enfrentam sérios problemas relacionados a diversos fatores como: ocupação desordenada do uso do solo, baixo gradiente topográfico, lençol freático aflorante, entre outros. Sabe-se que essas áreas apresentam grande densidade demográfica e que problemas como esses tendem a aumentar ao longo do tempo. Estudos comprovam que a solução mais viável é a gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando-se o manejo integrado das águas superficiais e subterrâneas. O presente trabalho propõe-se à implementação de um modelo distribuído de balanço hídrico a nível de solo, capaz de estimar a recarga em áreas urbanas costeiras. Neste sentido, investigou-se uma área urbana costeira que sofre problemas recorrentes de alagamento, escolhida como caso de estudo, com a finalidade de integração desse estudo a outros pré-existentes. A metodologia utilizada integra o modelo de balanço hídrico do solo a um modelo de fluxo subterrâneo, previamente calibrado, fazendo-se uma comparação dos níveis piezométricos observados através de sondagens e os níveis gerados através dessa integração. Objetivou-se com isso que, através de previsões meteorológicas, seja possível rebaixar os níveis piezométricos do aquífero dentro de limites seguros e sem riscos de intrusão salina. Utilizou-se na pesquisa um Sistema de Informações Geográficas para a parametrização do modelo distribuído. Para validação do modelo de recarga, foram simulados, usando como entrada dados de precipitação observada para a região, os níveis piezométricos do aquífero, para um período onde dados observados da superfície piezométrica estavam disponíveis. Os resultados mostraram boa concordância entre observações e simulações, podendo-se concluir que o modelo de cálculo da recarga foi validado para a área estudada.

PALAVRAS-CHAVE: estimativa de recarga, balanço hídrico, alagamentos urbanos e sistema de informações geográficas.

ABSTRACT

Urban coastal regions usually suffer from serious problems related to, among other factors: inadequate land use, low topographic gradient and shallow aquifers. It is widely known that these regions present high population density and the water resources problems tend to increase in time. Several studies show that the most feasible solution for these problems is the appropriate and integrated management of surface and groundwater. This dissertation aims at implementing a distributed soil water balance model able to estimate the aquifer recharge in urban coastal regions. For this purpose, a flooding-prone urban area was investigated, integrating this study with previous ones in the same area. The methodology applied in this research integrates the soil water balance model to a groundwater flow model, previously calibrated for the region, comparing the aquifer water levels calculated by the models with observed ones. The end-line purpose of this work is to lower the aquifer water levels, using information from rainfall forecasts, within safe limits and no risks of saline intrusion. A Geographic Information Systems was applied to the parameterization of the distributed model. The validation of the aquifer recharge model was implemented by comparing the simulated and observed aquifer water levels from observed rainfall data. The results showed a good agreement between observations and simulations, thus concluding that the recharge model is appropriate for the studied area.

KEYWORDS: estimate the aquifer recharge, water balance model, flooding urban and geographic information systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo Geral.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Balanço hídrico	5
2.1.1 Precipitação.....	6
2.1.2 Evaporação	7
2.1.3 Irrigação.....	7
2.1.4 escoamento Superficial.....	9
2.1.5 Armazenamento de Água no Solo	10
2.1.6 Drenagem Profunda ou Recarga	11
2.2 Águas Subterrâneas.....	12
2.3 Características dos aquíferos	16
2.3.1 Porosidade	16
2.3.2 Condutividade Hidráulica.....	17
2.3.3 Carga Hidráulica	18
2.4 Modelos.....	19
2.4.1 Modelos Urbanos	20
2.4.2 Modelo Atmosférico	21
2.4.3 Modelo Hidrológico	22
2.4.4 Modelo Hidrogeológico.....	23
2.5 Gestão de Recursos Hídricos.....	24
2.5.1 Gestão em Áreas Urbanas Costeiras	26
2.5.2 Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas	30
2.6 Sistemas de Informação Geográfica	32
2.7. Sistemas de Apoio à Decisão Espaciais	33
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	36
3.1 Localização	36
3.1.1 Aspectos Físicos.....	37
3.1.2 Hidrogeologia	39
3.2 Caracterização do Problema.....	42
3.2.1. Alagamentos Frequentes	44
3.2.2. Drenagem Superficial.....	45
3.2.3. Gestão x Alagamento	49
4 METODOLOGIA.....	53
4.1 Metodologia da Pesquisa.....	53
4.2 Modelo de Balanço Hídrico	54
4.3 Modelo de Fluxo Subterrâneo	63
4.3.1 Entrada dos Valores de Recarga no Modelo de Fluxo Subterrâneo	64
4.3.1.1 <i>Parâmetros Hidrogeológicos</i>	64
4.3.1.2 <i>Profundidade do Aquífero</i>	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1 Obtenção dos Valores de CN	69
5.2 Parametrização do Modelo de Balanço Hídrico	71
5.3 Aplicação do Modelo de Fluxo Subterrâneo	81
5.4 Validação dos Resultados.....	86

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXO 1 - Cotas da superfície piezométrica do aquífero obtidas pela UFPB/ATECEL (1999) durante a <i>primeira</i> campanha de medição (Marques, 2004).	99
ANEXO 2 - Cotas da superfície piezométrica do aquífero, obtidas pela UFPB/ATECEL (1999) na <i>segunda</i> campanha de medição (Marques, 2004).....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo hidrológico.....	5
Figura 2.2 – Água subterrânea.....	14
Figura 2.3 – Estrutura de um SIG.....	33
Figura 3.1 – Limite Municipal de João Pessoa, localização do bairro Bessa.....	36
Figura 3.2 – Modelo digital de elevação da cidade de João Pessoa – PB.....	39
Figura 3.3 – Mapa geológico da grande João Pessoa.....	40
Figura 3.4 – Modelos (atmosférico + hidrogeológico) e balanço hídrico do solo.....	43
Figura 3.5 – Canais de macro – drenagem no bairro Bessa.....	46
Figura 3.6 – Mapa de distâncias aos corpos hídricos no bairro Bessa e áreas de preservação permanente.....	50
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia.....	54
Figura 4.2 – Algoritmo de funcionamento do modelo de balanço hídrico do solo.....	55
Figura 4.3 - Representação gráfica do balanço hídrico do solo.....	57
Figura 4.4 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica e porosidade efetiva....	65
Figura 4.5 – Distribuição espacial dos piezômetros e isolinhas potenciais (maio de 1999).....	66
Figura 4.6 – Uso do solo no bairro Bessa	67
Figura 4.7 – Vias de acesso e permeabilidade do bairro Bessa.....	67
Figura 5.1 – Ocupação urbana e valores de CN do bairro Bessa.....	70
Figura 5.2 – Processo de sobreposição de mapas.....	71
Figura 5.3 – Funcionamento do modelo de balanço hídrico.....	73
Figura 5.4 – Recarga do CN 39, período de Nov/1998 a jul/1999.....	74
Figura 5.5 – Recarga do CN 51, período de Nov/1998 a jul/1999.....	74
Figura 5.6 – Recarga do CN 54, período de Nov/1998 a jul/1999.....	75
Figura 5.7 – Recarga do CN 57, período de Nov/1998 a jul/1999.....	75
Figura 5.8 – Recarga do CN 61, período de Nov/1998 a jul/1999.....	75
Figura 5.9 – Recarga do CN 72, período de Nov/1998 a jul/1999.....	76
Figura 5.10 – Recarga do CN 76, período de Nov/1998 a jul/1999.....	76
Figura 5.11 – Recarga do CN 77, período de Nov/1998 a jul/1999.....	76
Figura 5.12 – Recarga do CN 98, período de Nov/1998 a jul/1999.....	77
Figura 5.13 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 39.....	78
Figura 5.14 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 51.....	78
Figura 5.15 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 54.....	78
Figura 5.16 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 57.....	79
Figura 5.17 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 61.....	79
Figura 5.18 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 72.....	79
Figura 5.19 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 76.....	80
Figura 5.20 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 77.....	80
Figura 5.21 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 98.....	80
Figura 5.22 – Mapas georreferenciados: aquífero e espacialização do Bessa.....	82
Figura 5.23 – Geração dos níveis piezométricos – MODFLOW.....	83
Figura 5.24 – Níveis piezométricos referentes às medições de fevereiro e março de 1999.....	84
Figura 5.25 – Níveis piezométricos referentes às medições de maio e junho de 1999...	85
Figura 5.26 – Localização dos poços de sondagem.....	85
Figura 5.27 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 04 (m).....	87

Figura 5.28 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 06 (m).....	87
Figura 5.29 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 13 (m).....	88
Figura 5.30 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 18 (m).....	88
Figura 5.31 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 64 (m).....	89
Figura 5.32 – Mapa de comparação dos níveis piezométricos.....	90

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 3.1 – Problemas de drenagem devido a fatores naturais em planícies costeiras...	51
Quadro 3.2 – Problemas de drenagem+ devido à ação antrópica.....	52
Tabela 4.1 – Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	56
Tabela 4.2 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.....	60
Tabela 5.1 – Valores de CN para os lotes ocupados nos bairros.....	69
Tabela 5.2 – Valores de CN para as vias de acesso nos bairros.....	69

I INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional vem impulsionando o desenvolvimento urbano e algumas conseqüências, decorrentes deste fato, são observadas no âmbito dos recursos hídricos. A concentração da população nos grandes centros e o conseqüente aumento das atividades que potencialmente se apropriam do meio ambiente, agravam os conflitos pelo uso de recursos cada vez mais escassos, seja pelo crescimento da demanda, seja pela degradação de sua qualidade (FREIRE et al, 1999). Esse processo de urbanização, celerado e desordenado, interfere no controle do uso e da ocupação do solo e dificulta o acompanhamento por parte dos órgãos municipais competentes.

A maior parte da população mundial vive em zonas costeiras, ou seja, no espaço geográfico de interação entre o ar, a terra e o mar, incluindo ecossistemas e recursos naturais existentes em sua faixa terrestre, de transição e marinha, havendo ainda uma tendência permanente ao aumento da concentração demográfica nessas regiões. A saúde, o bem-estar e, em alguns casos, a própria sobrevivência da população, dependem da saúde e das condições dos sistemas costeiros, abrangendo áreas úmidas e regiões estuarinas, bacias de recepção e drenagem, águas interiores próximas à costa e o próprio sistema marinho.

O Estado da Paraíba, no Nordeste brasileiro, possui uma zona costeira agraciada por belas paisagens diversificadas e malhas urbanas constituídas de pequenas cidades e bairros da capital, João Pessoa, áreas de proteção ambiental, mata atlântica, planícies costeiras de baixas declividades, áreas de tabuleiro, entre outros. Como na maioria das cidades costeiras, a zona costeira de João Pessoa, sofreu uma ocupação desordenada, buscando-se o aproveitamento máximo da área em desconsideração à legislação vigente.

Problemas associados à drenagem pluvial são prováveis de ocorrer nas orlas urbanizadas ou em processo de urbanização. Um exemplo típico destas orlas urbanizadas é o bairro Bessa, em João Pessoa, que enfrenta sérios problemas recorrentes de alagamentos em períodos chuvosos, relacionados à topografia, às soluções ineficientes de drenagem superficial, à crescente urbanização e ao nível aflorante do lençol freático. O problema é agravado pela situação geográfica do bairro, localizado entre o mar e um rio na direção leste-oeste e entre uma área urbanizada e um manguezal na direção norte-sul. Tais fatores contribuem de forma bastante direta para que grande parte da água da chuva fique acumulada, sem a possibilidade de infiltração ou de escoamento superficial.

O aquífero freático do Bessa é muito sensível às perturbações naturais ou artificiais a ele impostas, respondendo rapidamente aos processos de recarga e de descarga com elevação e rebaixamento de níveis, respectivamente. Assim sendo, a Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP) solicitou à Universidade Federal da Paraíba (UFPB) um estudo do caso, na busca de soluções. A UFPB iniciou em 1998 um trabalho através de furos de sondagem do solo para avaliar os níveis do aquífero. Observou-se claramente uma interferência e influência do aquífero freático sobre a drenagem superficial e vice-versa, chegando-se à conclusão de que se tratava, principalmente, de um problema de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos.

Outro problema enfrentado pelo Bessa é a captação das águas subterrâneas do freático por poços, de forma descontrolada e crescente, podendo gerar, num futuro próximo, rebaixamento excessivo do lençol subterrâneo e intrusão salina. Devido esses fatores, várias pesquisas científicas vêm sendo desenvolvidas na tentativa de encontrar soluções que promovam uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos na área com o mínimo impacto para os moradores e/ou usuários do bairro.

Segundo Marques (2004), uma das alternativas para se resolver o caso acima citado é o manejo adequado do aquífero, de forma a promover uma exploração controlada e monitorada através da captação de água por poços. Para auxiliar na drenagem superficial, pois o bombeamento em diferentes pontos pode ajudar a rebaixar o nível do lençol freático e controlar boa parte das inundações. É necessário, para isso, conhecer as propriedades do aquífero, de modo a entender o seu comportamento natural e prever as suas reações às intervenções nele efetuadas, tais como a citada exploração por poços e também à drenagem por canais artificiais.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a implementação de um modelo hidrogeológico que, a partir de previsões meteorológicas e simulações do balanço hídrico do solo, permita estimar a recarga através do modelo Soil Conservation Service desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (United States Soil Conservation Service), utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Modelos Matemáticos de Fluxo Subterrâneo. Propõe-se estimar a recarga para simular os níveis piezométricos sob a hipótese de exploração do aquífero através de poços, para assim minimizar prováveis alagamentos, de maneira sustentável, com uma gestão e um manejo adequado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Implementar um modelo de simulação do balanço hídrico do solo capaz de estimar a recarga do aquífero freático em uma área urbana costeira visando à geração de cenários de gestão de recursos hídricos através de simulações em um modelo de fluxo subterrâneo, previamente calibrado para esta área.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Escolha de um modelo capaz de estimar a recarga em áreas urbanas costeiras.
- Parametrização deste modelo, de forma distribuída, considerando-se o tipo e o uso do solo.
- Integração do modelo de recarga a um modelo de fluxo subterrâneo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico climatológico é uma das várias maneiras de se monitorar e analisar a variação do armazenamento de água no solo. Fatores como a energia térmica solar, a força dos ventos que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e deslocamento das massas de água, impulsionam a dinâmica do ciclo hidrológico. Os vários processos que envolvem fluxos de água, isto é, infiltração, redistribuição, evaporação e absorção de água pelas plantas e solo, são processos interdependentes e, na maioria das vezes, ocorrem simultaneamente.

Para estudar o ciclo hidrológico (Figura 2.1) pode-se considerar o balanço hídrico, como sendo a somatória das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo (REICHARDT, 1985).



Figura 2.1 – Ciclo hidrológico.

Fonte: Chambel (2007).

O estudo do ciclo hidrológico é um tópico de grande relevância para a hidrologia. Através da contabilização do suprimento natural de água no solo, simbolizado pela precipitação (P), da evapotranspiração potencial (ETP) e da capacidade de água disponível (CAD), dada pela capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PM}), o balanço hídrico climatológico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), do armazenamento de água no solo (ARM) e da drenagem profunda (DP) ou recarga (Equação 2.1).

$$ARM_{(t)} = ARM_{(t-1)} - ETr_{(t)} + P_{(t)} + Ir_{(t)} - Dp_{(t)} \quad (2.1)$$

2.1.1 Precipitação

Segundo Tucci (2004), entende-se por precipitação a água proveniente do vapor d'água da atmosfera depositada na superfície terrestre de qualquer forma, como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. No entanto, é comum tratar a precipitação somente sob a forma de chuva por ser esta mais fácil de medir, por ser bastante incomum a ocorrência de neve em nosso continente e, também, porque as outras formas de precipitação pouco contribuem para a vazão dos rios. A água que escoar nos rios ou que está armazenada na superfície terrestre pode ser sempre considerada como um resíduo das precipitações.

Exprime-se a quantidade de chuva pela altura de água precipitada e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. Ela é avaliada por meio de medidas obtidas em pontos previamente escolhidos, utilizando instrumentos denominados pluviômetros ou pluviógrafos, conforme sejam simples receptáculos da água precipitada ou registrem essas alturas no decorrer do tempo (TUCCI, 2004).

2.1.2 Evaporação

Numa superfície vegetada ocorrem simultaneamente os processos de evaporação e de transpiração (evaporação pelas plantas). Evapotranspiração foi o termo utilizado por Thornthwaite para expressar essa ocorrência simultânea. A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica, e pelo suprimento de água do solo às plantas. A disponibilidade de energia depende, por exemplo, do local e da época do ano.

Evapotranspiração Potencial (ETP) - Este conceito foi introduzido por Thornthwaite e corresponde à água utilizada por uma extensa superfície vegetada, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, estando este bem suprido de umidade, ou seja, em nenhum instante a demanda atmosférica é restringida por falta d'água no solo. A ETP é um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da chuva (Thornthwaite et al., 1955), sendo expressa na mesma unidade de medida (mm). A comparação entre chuva e a ETP resulta no balanço hídrico climatológico, indicando excessos e deficiências de umidade ao longo do ano ou da estação de crescimento das culturas (PEREIRA et al., 1997).

Evapotranspiração Real (ETR) - é aquela que ocorre numa superfície vegetada, independente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo; portanto, é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno.

2.1.3 Irrigação

É através do solo que os vegetais fixam suas raízes e absorvem água e os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. A interferência dos organismos vivos presentes no solo e da ação das raízes das plantas, bem como dos animais, ocorre em maior intensidade

na superfície, acarretando uma diferenciação de suas camadas com características em profundidade, formando camadas com características distintas denominadas horizontes, e ao conjunto de horizontes ou camadas, chama-se perfil do solo (GATTO e WENDLING, 2002).

Assim, um solo com boa estrutura apresenta-se leve, solto, com boa capacidade de retenção de água e do ar, oferecendo condições adequadas ao desenvolvimento das plantas. Entretanto a umidade no solo, ou seja, a quantidade de água armazenada no solo disponível para as raízes das plantas é um dos fatores principais para o estudo da resposta da vegetação em condições de estresse-hídrico, bem como é importante para estudos de infiltração, de drenagem, de condutividade hidráulica e de irrigação, entre outros; além disso, a umidade no solo é determinante nos processos de troca entre o solo e a atmosfera (ROSSATO, 2001).

Uma grande variedade de sistemas de irrigação paisagística está disponível. Os produtos e sistemas são desde aspersores pressurizados a sofisticados controles computadorizados, todos projetados para alcançar a maior eficiência da irrigação. É necessário conhecer as necessidades específicas de cada área e do tipo de vegetação, para se ter eficiência com relação à água, determinando-se os dias em que serão irrigados e com que intensidade. Um método aplicado em muitos estudos deste tipo é o *balanço hídrico do solo*, que permite obter o consumo de água requerido por espécies de plantas e através dos princípios de conservação de massa, onde é possível determinar-se os componentes do ciclo hidrológico no sistema solo-planta.

Segundo Medeiros *et al.* (2007), o conteúdo de água no solo tem grande influência em diversos processos hidrológicos: afeta a partição da precipitação em infiltração e escoamento superficial; está diretamente relacionado com a disponibilidade de água para

as plantas, controlando a evapotranspiração; influi nos processos de erosão e carregamento de solutos, uma vez que determina o padrão de vazões.

Na prática, determinar a disponibilidade hídrica de um solo com vegetação não é uma atividade simples, dependendo das condições do local, nem sempre é possível efetua-la. Medeiros *et al.* (2007), em seus estudos acerca da calibração de Sondas de TDR em um Latossolo oriundo da bacia experimental do arroio Donato, no município de Pejuçara-RS, afirmam que, os atuais métodos para estimar o conteúdo de água no solo podem ser agrupados em: medição da unidade de campo, medição através de sensores remotos e estimação via modelos de simulação. Dentro do terceiro grupo encontram-se os *modelos de balanço hídrico do solo*, estes amplamente utilizados na simulação de eventos, na previsão de vazões e em balanços hídricos do longo período. Pieruccini (1997) afirma que as medidas feitas com o objetivo de estabelecer o balanço hídrico numa determinada área vegetada, em um dado intervalo de tempo, normalmente exige o emprego de equipamentos sofisticados e de mão-de-obra bastante especializada, o que torna tais medidas normalmente inacessíveis. Assim, estudos dessa natureza ficam restritos a pequenas áreas e se destinam à verificação de modelos matemáticos desenvolvidos com a finalidade de simular então o balanço hídrico.

2.1.4 Escoamento Superficial

A água que precipita nos continentes pode tomar vários destinos. Um deles é o escoamento superficial que ocorre sobre a superfície do terreno. A parte restante penetra no interior do solo, subdividindo-se em duas. Uma parcela se acumula na sua parte superior e pode voltar à atmosfera por evapotranspiração. Outra caminha em profundidade até atingir os lençóis freáticos e vai constituir o escoamento subterrâneo (TOMASELLA e ROSSATO, 2005).

2.1.5 Armazenamento de Água no Solo

Segundo Rossato (2001) o solo armazena e fornece água e nutrientes às plantas, de modo que, dependendo do conteúdo de água no solo, as plantas terão maior ou menor facilidade em extrair água e, portanto, de atender às suas necessidades. À medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorver água. Isso porque vai aumentando a força de retenção, enquanto diminui a disponibilidade hídrica no solo. Por isso, nem toda água que o solo consegue armazenar está disponível às plantas. A capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PM}) são considerados, respectivamente, como os limites máximo e mínimo de água disponível. A partir desses limites, pode-se determinar a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, considerando a profundidade do sistema radicular.

O fluxo e a velocidade das variações da umidade do solo decrescem com o tempo após o processo de infiltração. Verifica-se que o fluxo torna-se desprezível ou mesmo cessa, depois de alguns dias. A umidade do solo na qual a drenagem interna praticamente cessa, denominada capacidade de campo foi, por longo tempo, assumida universalmente como uma propriedade física, característica e constante para cada solo. Com o desenvolvimento das teorias do movimento da água no solo e com as técnicas experimentais mais precisas, o conceito de capacidade de campo, como originalmente definido, tem sido considerado arbitrário e não uma propriedade intrínseca do solo, independente do modo como seja determinado (Reichardt, 1985). Veihmeyer e Hendrickson (1949), apud Reichardt (1985), definiram a capacidade de campo como “a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem de seu excesso, quando a velocidade do movimento descendente praticamente cessa, o que usualmente ocorre dois a três dias após a chuva ou irrigação, em solos permeáveis e de estrutura e textura uniformes”.

As plantas, de uma maneira geral, absorvem centenas de gramas de água para cada grama de matéria seca produzida e têm suas raízes mergulhadas no reservatório de água do solo e as folhas sujeitas à ação da radiação solar e do vento, obrigando-a a transpirar incessantemente. Para crescer adequadamente, ela precisa possuir uma “economia de água”, tal que a demanda feita sobre ela pela atmosfera seja balanceada pelo seu abastecimento por parte do solo. O problema é que a demanda por evaporação devido à atmosfera é praticamente constante, ao passo que os processos que adicionam água ao solo, como a chuva, ocorrem apenas ocasionalmente e, geralmente, com irregularidade. Para sobreviver nos intervalos entre períodos sem chuvas a planta precisa contar com a reserva contida no solo (Reichardt, 1985). Essa reserva está diretamente relacionada com o “ponto crítico” entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

2.1.6 Drenagem Profunda ou Recarga

A drenagem profunda é o movimento de água livre contida no solo que escoar pela ação da gravidade. A água em excesso ou “que se perde” por drenagem profunda, é aquela que vai reabastecer os mananciais de água, como os rios, lagos, açudes e também o lençol freático. A drenagem profunda expressa o excesso de água que penetrou no volume através das chuvas ou irrigação (Tomasella e Rossato, 2005). Em outras palavras, a água proveniente das chuvas pode tomar três caminhos distintos: uma parte escoar, outra permanece sobre a superfície do solo ou fica retida em sua camada superior, estando sujeita à evaporação e a outra infiltra no solo (que seria a drenagem profunda ou recarga) podendo formar lençóis subterrâneos. Estes dependem das variações de condições que tornam os solos mais – ou menos – permeáveis, sendo tais condições função de clima, topografia e natureza do solo.

Define-se recarga de águas subterrâneas como a quantidade de água que é acrescentada à zona saturada de água subterrânea. Esta recarga vai provocar o aumento do armazenamento de água da zona saturada, sendo, portanto um fator determinante nos estudos hidrogeológicos e na gestão das extrações de água subterrânea, tendo em vista a definição de um valor de extração seguro em termos de manutenção, a longo prazo, da quantidade e da qualidade da água (Oliveira, 2004). A recarga das águas subterrâneas pode ser definida no senso geral como o fluxo d'água descendente que alcança o nível d'água de um aquífero livre, formando uma reserva de água adicional para as águas subterrâneas. Segundo a ABAS (2007) - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios.

A recarga das águas subterrâneas pode ocorrer de maneira direta ou indireta. Diz-se que a recarga é direta quando ocorre através das precipitações que se infiltram diretamente no aquífero, através de suas áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. Pode-se dizer que nos aquíferos livres a recarga sempre é direta, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Quando o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem superficial das águas, pela ação antrópica (através de atividades de irrigação e de urbanização) ou, ainda, pelo fluxo subterrâneo indireto, a recarga é dita indireta. No presente trabalho, foi considerado apenas a recarga direta, haja vista que o aquífero em estudo é do tipo não confinado, ou seja, livre.

2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Águas subterrâneas são todas as águas que ocorrem abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas.

falhas e fissuras das rochas compactas, que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenham um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos. As águas subterrâneas cumprem uma fase do ciclo hidrológico, uma vez que constituem uma parcela da água precipitada (ABAS, 2007).

A percolação da água varia de intensidade em função das características do solo encontrado em seu caminho. Algumas formações geológicas apresentam vazios relativamente permeáveis e contínuos facilitando o fluxo. Entretanto, se encontrar camadas menos permeáveis, a água será retida e, eventualmente, preencherá todos os interstícios da região sobrejacente, formando zonas saturadas. Quando uma formação geológica for suficientemente porosa para admitir quantidade considerável de água e permitir seu escoamento em condições favoráveis para a utilização, recebe o nome de aquífero (PINTO et. al, 1976, apud MARQUES, 2004).

Um aquífero é uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectadas para armazenar e transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos naturais. A expressão "quantidades significativas" refere-se à utilização que se pretenda dar à água subterrânea (Figura 2.2), isto é, às vazões que possam ser exploradas. As formações geológicas de baixa permeabilidade que armazenam água, mas não permitem extração econômica, chamam-se aquíferos, também conhecido como aquícluído, (DEPRN/ DUSM, 2007).

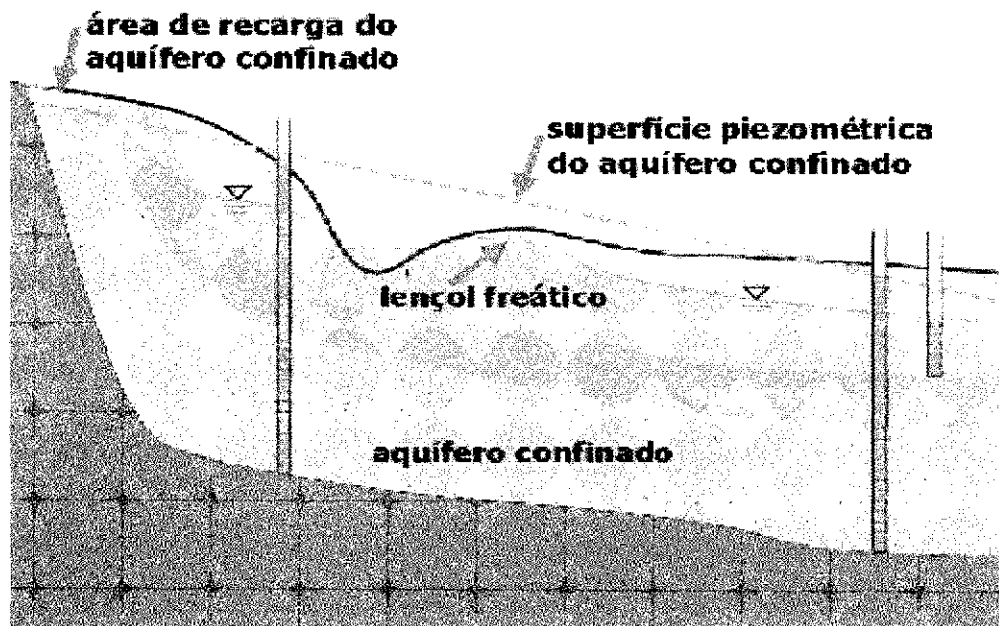


Figura 2.2 – Água subterrânea.

Os aquíferos formam verdadeiros reservatórios de água subterrânea e sofrem variações de volume que podem ser facilmente acompanhadas pela medida dos níveis do lençol freático em poços ou sondagens piezométricas. A partir da litologia, ou seja, da sua constituição geológica, pode-se classificar os aquíferos quanto à porosidade e à pressão a qual está submetido.

Segundo a ABAS (2007), quanto à porosidade, existem três tipos aquíferos:

- Aquífero poroso ou sedimentar – é aquele formado por rochas sedimentares, podendo armazenar grandes volumes de água, visto que costuma ocorrer em áreas extensas. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia.

- Aquífero fraturado ou fissural – é aquele formado a partir de rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a circulação da água se faz nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico. Ao contrário do aquífero poroso, a capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação. portanto, poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora.

- Aquífero cárstico (Karst) – Tem sua formação a partir da dissolução do carbonato pela água em rochas calcáreas ou carbonáticas. A circulação de água acontece nas fraturas ou descontinuidade das rochas. São, portanto, aquíferos heterogêneos, com ocorrências variadas de pequenas e grandes dimensões, podendo, em alguns casos, haver formação de verdadeiros rios subterrâneos.

Quanto à pressão, os aquíferos podem ser (ABAS, 2007):

- Confinado ou artesianiano – Diz-se que um aquífero é confinado quando a camada saturada transmissora de água, constituída por uma formação geológica permeável, se encontra entre camadas impermeáveis ou semipermeáveis, sob pressão maior que a atmosférica. Dependendo da situação e das características locais, os poços perfurados nesses aquíferos podem ser jorrantes. Nesse tipo de aquífero a recarga se faz, geralmente, de maneira indireta e, no caso de bacias sedimentares, onde ocorrem rochas sedimentares profundas, através das chuvas (preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície). Os aquíferos artesianos ou confinados são formações permeáveis intercaladas por camadas impermeáveis.

- Não-confinado – Também chamado de aquífero livre ou freático, ocorre quando a zona saturada apresenta uma superfície livre, exposta a pressão atmosfera. É constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua

extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação, (ABAS, 2007).

- **Semi-confinado** – o aquífero semi-confinado, é aquele que se encontra limitado na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água se dá ao longo da camada aquífera. Secundariamente, esse fluxo se dá através das camadas semi-confinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada aquífera e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semi-confinadas subjacentes, ou vice-versa. Zonas de fraturas ou falhas geológicas poderão, também, constituir-se em pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada.

2.3 CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS

2.3.1 Porosidade

Pode-se definir a porosidade de um solo como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total do mesmo. Tal relação pode ser expressa em fração decimal ou em percentagem. O valor da porosidade é obtido pela equação 2.2.

$$N = (V_t - V_s)/V_t = V_v/V_t \quad (2.2)$$

Em que:

N = porosidade como uma fração decimal,

\bar{V}_T = volume total da amostra de solo ou rocha,

V_s = volume de sólidos na amostra,

V_v = volume de vazios.

Na hidrogeologia a porosidade é importante, pois indica a máxima quantidade de água que poderá ser acumulada num solo. Entretanto, apenas uma parte desta água está disponível para suprir um poço ou nascente. Este percentual da porosidade que disponibiliza a água para escoar em poços ou nascente é chamado de porosidade efetiva. A porosidade efetiva também chamada de produção específica ou porosidade drenável é a relação entre o volume drenável e o volume total (Caicedo, 2000). Para o manejo e estudo do fluxo hidráulico no solo essa é uma propriedade de grande importância, sendo vital à modelagem do aquífero e na drenagem propriamente dita.

Define-se coeficiente de armazenamento como a quantidade de água que pode ser drenada naturalmente de um aquífero, por unidade de área do mesmo, quando a queda de nível de água for unitária. Nos aquíferos livres, a porosidade efetiva corresponde ao coeficiente de armazenamento (MARQUES, 2004).

2.3.2 Condutividade Hidráulica

Pode-se dizer que a condutividade hidráulica é a habilidade de um solo saturado permitir a passagem da água, observando-se uma estreita relação com a porosidade, textura e estrutura do solo. Sua determinação é uma forma de avaliar a permeabilidade de diversos horizontes do solo.

Inadvertidamente chamada de permeabilidade, a condutividade hidráulica é um parâmetro que se relaciona, não somente com as propriedades do esqueleto sólido, mas também, com propriedades do fluido. A determinação da condutividade hidráulica é uma tarefa muito complicada, já que pequenas variações na litologia e na granulometria determinam alterações da permeabilidade. Além disso, o meio aquífero, normalmente heterogêneo, apresenta variação segundo as direções de fluxo. Assim sendo, os melhores métodos de avaliação são os de campo, que fornecem valores médios, cuja validade se limita à espessura saturada da área de influência do teste. Os métodos de campo mais empregados são ensaios de bombeamento, ensaios com piezômetros e ensaios com traçadores químicos, radioativos ou não. (RÊGO e ALBUQUERQUE, 2004).

2.3.3 Carga Hidráulica

Segundo Rêgo e Albuquerque (2004), qualquer processo de escoamento só se estabelece quando existe uma diferença ou gradiente de potencial entre pontos de um sistema de fluxo. Conseqüentemente, cada ponto de um sistema de escoamento de água subterrânea em meios porosos é dotado de um potencial de fluxo. O “potencial de fluxo” para fluxos através de meios porosos é a “energia mecânica por unidade de massa de fluido” e a carga hidráulica “*h*” é a energia por unidade de peso. Assim, o fluxo se dá nos sentidos dos pontos de maior para os de menor carga hidráulica. Rêgo e Albuquerque (2004) citam que, na experiência de Darcy¹, o potencial e a carga hidráulica satisfazem essas condições em que:

$$H = z + \rho g \quad (2.3)$$

Sendo a carga hidráulica, a soma das duas componentes: a carga de elevação ou cota de posição (*z*) e a carga de pressão (ρg).

¹ Lei que marca o surgimento da Hidrologia Subterrânea como uma ciência quantitativa, de que Darcy é o fundador.

2.4 MODELOS

Em processos ambientais, costuma-se utilizar modelos espaciais, descritos como uma combinação de conjuntos de dados de entrada através de uma função, gerando um novo dado de saída.

$$\text{Saída} = g(\text{dados de entrada})$$

A função “g” pode assumir várias formas, mas os relacionamentos por ela expressos são baseados no conhecimento teórico que leva em consideração os processos ambientais ou empíricos, baseados em dados observados ou baseados no conhecimento de especialistas (SILVA, 2004).

Os modelos empíricos, na sua essência, possuem três componentes, do tipo configuração inicial, função de mudança e configuração de saída. A configuração inicial de um modelo dinâmico pode ser obtida através de dados históricos do fenômeno em estudo, chamados de séries temporais. Neste caso, equações diferenciais (totais ou parciais) que incluem pelo menos um termo derivado no tempo podem ser utilizadas para representar o modelo e o processo é classificado como determinístico. Quando variáveis aleatórias são utilizadas para explicar um sistema o processo é classificado como estocástico-probabilístico. Modelos empíricos são caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Estes modelos são eficientes em fazer previsões, embora apresentem limitações em abordar a evolução espacial e identificar os aspectos causais do sistema (PEDROSA, 1983).

O fluxo de águas subterrâneas é governado por equações diferenciais parciais não lineares e os modelos numéricos baseados na substituição de uma equação diferencial parcial por uma equivalente de diferenças finitas, que é resolvida por cálculos aritméticos repetidos, processo conhecido como interação. Existem vários métodos para discretização

das equações diferenciais, sendo os de diferenças finitas o mais empregado na hidrogeologia. O processo numérico consiste em sobrepor ao aquífero uma malha com limites conhecidos. Para iniciar o cálculo, assumem-se para todos os pontos da malha, cargas hidráulicas estimadas, a partir das quais são calculadas novas cargas, de maneira sistemática, por um algoritmo numérico definido. Após obter uma carga calculada para cada ponto da malha, é feita a comparação com a estimativa revisada de cargas, processo repetido para todo aquífero. Cada série sucessiva de cálculos reduz a diferença entre cada carga estimada e calculada. Finalmente, quando as diferenças tornam-se desprezíveis, os valores resultantes representam as cargas piezométricas desejadas sobre o aquífero (MARQUES, 2004).

2.4.1 Modelos Urbanos

Para Briassoulis (2000), mudança de uso do solo "... significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo...". Ela pode envolver: a) conversão de um uso em outro, ou b) modificação de certo tipo de uso, tais como mudanças de áreas residenciais de alto para baixo padrão (sem alteração física ou quantitativa dos edifícios), etc.

Em relação ao termo "modelo", pode-se entendê-lo como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, etc., e segundo uma ou mais teorias (NOVAES, 1981).

Os modelos urbanos podem ser classificados em vista de seus aspectos metodológicos e funcionais em estatísticos ou econométricos; modelos de interação espacial; modelos de otimização (que incluem programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear, assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multi-critérios de tomada de decisão); modelos integrados (modelos de gravidade, de simulação e de entrada-

saída); modelos baseados em ciências naturais e modelos baseados em SIG (ALMEIDA et al., 2005).

No tocante ao planejamento urbano esses modelos podem ser utilizados como ferramentas auxiliares ao acompanhamento da evolução urbana, em análises de qualidade ambiental, na visualização dos impactos de novos edifícios e na construção de cenários (MOURA e LOCH, 2006).

2.4.2 Modelo Atmosférico

Os prognósticos ou previsões dos fenômenos do tempo local, principalmente daqueles fenômenos associados ao tempo severo, como tempestades, ventanias, rajadas, pancada de chuva, granizo, etc. são muito importantes para uma vasta gama de atividades humanas e para o entendimento das transformações rápidas do ambiente. Por exemplo, nas grandes cidades os fenômenos meteorológicos mais críticos acabam por definir as condições de salubridade e a qualidade ambiental a qual está sujeita a população. Entre esses fenômenos listam-se as inundações, as estiagens e a disponibilidade de água potável, as condições críticas de temperaturas extremas, em geral associadas a baixos valores de umidade relativa do ar, os eventos críticos de poluição do ar, associados à concentrações de poluentes atmosféricos acima de valores aceitáveis à saúde humana, animal e vegetal, etc. A população mundial das cidades tem hoje uma percepção crescente quanto a sua vulnerabilidade aos riscos ambientais (WIKIPEDIA, 2007).

Os modelos atmosféricos consistem de sistemas de equações diferenciais parciais que descrevem os fenômenos físicos envolvidos, a partir de variáveis de estado como velocidade do vento, pressão, temperatura e outras. A resolução destes sistemas exige grande capacidade de processamento, o que faz com que a modelagem atmosférica esteja entre as primeiras áreas de aplicação a utilizar supercomputadores. A utilização de

modelos cada vez mais detalhados com resolução cada vez maior faz com que a necessidade de processamento destes modelos esteja sempre um passo à frente do hardware disponível. Os modelos atmosféricos podem ser divididos, de acordo com sua área de abrangência, em modelos regionais e globais.

Num modelo global de circulação atmosférica, as equações de escoamento são formuladas utilizando um sistema global em coordenadas esféricas. Estes modelos são utilizados não somente para previsão atmosférica, mas também para estudos climáticos de escala global como a ação de poluentes na camada de ozônio ou a influência do fenômeno El Niño no clima global. Como modelos regionais trabalham sobre uma área geográfica menor, podem trabalhar com uma resolução maior, o que permite levar em conta fatores locais como a topografia e a hidrografia. Apesar disto, são similares aos modelos globais, pois resolvem as mesmas equações que governam o movimento atmosférico (com uma formulação diferente) e são operacionalmente dependentes destes, utilizando, como condições de fronteira, dados obtidos de um modelo global (DORNELLES e RIZZI, 1998).

Para a gestão em recursos hídricos, a utilidade da informação de previsão atmosférica está na capacidade de prever eventos extremos como inundações e períodos de seca e que causam transtornos sociais e econômicos à população (OLIVEIRA, 2006).

2.4.3 Modelo Hidrológico

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Há uma estreita relação entre a modelagem hidrológica, a biológica e a ecológica, pois o transporte de materiais pela água é influenciado por atividades biológicas que podem aumentar ou diminuir a quantidade desses materiais na água, e o regime do fluxo de

água pode afetar diversos habitats. Além disso, a hidrologia está estreitamente relacionada às condições climáticas e, portanto, modelos hidrológicos e atmosféricos deveriam estar acoplados, sendo que, na prática, um estreito acoplamento torna-se bastante dificultado, uma vez que modelos atmosféricos trabalham com resoluções espaciais muito maiores que as utilizadas na modelagem hidrológica (MAIDMENT, 1993).

A concepção dos modelos hidrológicos conceituais de uso tradicional na engenharia é adequada para os problemas na escala em que a hidrologia encontrou seus desafios. Para a sua utilização, é interessante incluir uma etapa de avaliação de desempenho nas tarefas as quais se destina. Esta avaliação consiste de testes em que se verifica o quanto os resultados previstos com o modelo se aproximam da realidade observada. De maneira geral, os modelos hidrológicos são calibrados com dados de um período de tempo e verificados com dados de outro período (*split sample test*). Quando a qualidade dos resultados não se reduz substancialmente, o modelo é considerado, verificado e suficientemente bom para ser aplicado (COLLISCHONN, 2001).

2.4.4 Modelo Hidrogeológico

A elaboração de modelos hidrogeológicos se torna complexa considerando-se que devem exprimir os processos naturais que compõem o ciclo hidrológico em subsuperfície. De modo geral, os modelos matemáticos são subsidiados pelos conceituais sugeridos a partir de observações locais. No entanto, as condições de ocorrência da água subterrânea são extremamente variáveis, em função da diversidade das características dos aquíferos, clima, tipos de solos, condições estruturais, dentre outras. Exprimir todas essas condições de contorno não é simples, contudo, os modelos conceituais podem ser testados com a utilização de técnicas específicas, tornando-os uma representação factível das condições hidrogeológicas naturais. O objetivo da modelagem matemática, computacional ou

conceitual, é a representação mais próxima possível das reais condições de ocorrência e modo de circulação da água subterrânea. Os modelos conceituais têm importância adicional, uma vez que são as bases para a elaboração dos modelos matemáticos e computacionais, em geral, mais robustos e complexos. Por exemplo, se um aquífero confinado é tratado como um sistema livre, os valores dimensionais como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e transmissividade obtidos de modelos matemáticos serão incorretos e poderão trazer prejuízos na gestão da exploração do referido aquífero (LOUSADA e CAMPOS, 2005).

2.5 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A água é considerada um recurso ambiental, natural e um bem econômico, por ser finita, vulnerável e essencial à conservação da vida e ao meio ambiente. Portanto, deve ser preservada para que não sofra alterações, visto que a degradação da qualidade ambiental afeta, direta ou indiretamente, a saúde, a segurança e o bem-estar da população. No âmbito nacional, a primeira experiência na tentativa de preservar tal recurso surgiu a partir da aplicação da gestão de recursos hídricos e teve início em 1934, com o Código de Águas. Porém, só a partir da edição da nova Constituição Federal de 1988 e da Conferência da ONU sobre o Desenvolvimento Sustentável no Rio de Janeiro, intitulada ECO-92, observou-se avanço nas questões legais referentes às águas.

A partir de 08 de janeiro de 1997, instituiu-se no Brasil a Lei 9.433, com o objetivo de implementar o Plano Nacional e o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Essa Lei, também conhecida como *Lei das Águas*, abrange o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, os Comitês de Bacia e as Agências de Água, considerando como unidade de gestão e planejamento a bacia hidrográfica, além dos seguintes instrumentos de gestão: outorga de direitos, cobrança pelo

uso da água, sistema de informações, planos diretores e enquadramento dos corpos de água.

A gestão da água tornou-se uma das principais prioridades dos governos em todo o mundo, objetivando manter a sustentabilidade do desenvolvimento. No Brasil seu início se verificou a partir da Lei 9.433 da Política Nacional de Recursos Hídricos, que teve como pontos-chave a exigência de um plano de gestão por bacia hidrográfica e a implantação dos instrumentos de outorga e cobrança. O objetivo maior da Lei é assegurar que as águas superficiais e subterrâneas, essenciais à sobrevivência humana e ao desenvolvimento sócio-econômico, possam ser controladas e utilizadas de forma racional e dentro de parâmetros de qualidade desejáveis (FREIRE, 1999).

Deverão ser cobrados todos os usos da água que sejam objetos de outorga, a fim de reconhecê-la como bem econômico, dando ao usuário uma indicação do seu real valor, incentivar a racionalização do uso e obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos (Lei 9.433 - Art. 20). As cobranças estão previstas em casos de captação e lançamentos, através do princípio usuário-pagador, visto que em ambos os casos, escassez ou poluição, há aumento do custo da água.

De acordo com a Lei 9.433/97 o licenciamento ambiental, também é objeto de cobrança, o que torna a utilização dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos passíveis de cobrança, por ser objeto de licenciamento ambiental e outorga pelo poder público. A cobrança deverá considerar as peculiaridades das bacias hidrográficas levando-se em consideração, para a captação, a disponibilidade hídrica local, a vazão captada e seu regime de variação, o consumo efetivo e a finalidade a que se destina.

2.5.1 Gestão em Áreas Urbanas Costeiras

Segundo Silva (2004), as planícies costeiras contam com um meio natural diverso do estuário marinho, com mangues que são de formação típica de litorai, e estão sob ação direta das marés. Os mangues abrigam grande variedade de espécies da fauna brasileira, garantindo alimento e proteção para a reprodução de inúmeras espécies marinhas e terrestres devido ao acúmulo de material orgânico, característica importante desse ambiente. Nas planícies costeiras existe também a dinâmica marinha entre as águas superficiais doces, águas subterrâneas e a água marinha, ou seja, onde ocorre o encontro e equilíbrio das águas. Nesse contexto, tendo-se em vista a necessidade da correlação entre o meio ambiente e as áreas de crescimento urbano, observa-se claramente que alguns problemas típicos, comuns a várias planícies costeiras em processo de urbanização, demandam ações de gestão urgentes, como pode ser observado nas situações que se seguem:

- o Ainda há uma grande migração de pessoas para estas áreas, seja por interesses econômicos (no caso de grandes cidades), ou interesses turísticos ou de lazer (no caso de pequenas cidades litorâneas que recebem periodicamente um grande número de visitantes ou moradores temporários);
- o Nem sempre há instrumentos reguladores, como o plano diretor de drenagem, ou no plano diretor urbanístico, quando existem, vários aspectos da drenagem não são contemplados;
- o Na maioria das vezes, o poder público não consegue oferecer a infra-estrutura necessária no mesmo ritmo em que ocorre o processo de urbanização, propiciando o agravamento dos problemas e da poluição ambiental;

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

- O processo de urbanização muitas vezes ocorre sem a observância de restrições ambientais como a preservação de estuários ou a dinâmica marinha, com degradação quase que total destes ambientes;
- A poluição de rios e aquíferos ocorre devido a diversas fontes urbanas poluidoras;
- De uma forma mais emergencial as autoridades procuram aumentar a oferta de água para atender à crescente demanda, ou a picos de demanda (no caso de áreas turísticas) e, na maioria das vezes, procuram facilitar o escoamento das águas indesejáveis (esgotos, águas pluviais, etc.) sem o planejamento adequado;
- A excessiva exploração de água subterrânea gera problemas de intrusão salina;
- O baixo gradiente topográfico das áreas costeiras normalmente dificulta o escoamento superficial, o que, aliado ao afloramento do lençol freático em períodos chuvosos, e à crescente impermeabilização do solo devido à urbanização, pode provocar inundações.

O encontro das questões ambientais e o crescimento urbano dessas áreas costeiras, demanda a interação de diversos conhecimentos e interdisciplinaridades, bem como políticas de interesse público que possuem características peculiares distintas, apesar de estarem inter-relacionadas, e devem ser consideradas na realização da gestão de recursos hídricos nestes ambientes. Algumas dessas interdisciplinaridades podem ser citadas como:

- ✓ A relação água superficial e água subterrânea.
- ✓ Qualidade da água provocada por poluição urbana.
- ✓ A relação preservação do meio ambiente e crescimento do meio urbano.
- ✓ A relação regime hidrológico e a drenagem urbana.

- ✓ Planejamento urbano e satisfação da qualidade de vida da população relacionada à moradia e uso dessas regiões.

Vale salientar que um dos problemas específicos da área costeira ocorre devido à falta de informação dos planejadores para a ocupação do solo urbano costeiro, visto que os loteamentos são liberados, na maioria das vezes, sem se considerar os processos que ocorrem na dinâmica marinha. Essa ausência de informações é também uma das barreiras que devem ser superadas para implantação de processos sustentáveis nesses ambientes.

A gestão costeira brasileira é orientada pelas Políticas Nacionais de Gerenciamento Costeiro, de Meio Ambiente, de Recursos Hídricos e Patrimoniais, além das ações relacionadas à defesa nacional e à navegabilidade comercial e turística. Já a Política Nacional de Meio Ambiente, PNMA, está apresentada na Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, apresentando os instrumentos de gestão descritos a seguir, tais recomendações foram descritas por Rosso (2007) em seus estudos acerca da Gestão Integrada em Bacias Hidrográficas Costeiras:

- a) estabelecimento de padrões de qualidade ambiental;
- b) zoneamento ambiental;
- c) avaliação de impactos ambientais;
- d) licenciamento e a revisão de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras;
- e) incentivos à produção e instalação de equipamentos e a criação ou absorção de tecnologia, voltados para a melhoria da qualidade ambiental;
- f) criação de espaços territoriais especialmente protegidos pelo Poder Público federal, estadual e municipal, tais como áreas de proteção ambiental, de relevante interesse ecológico e reservas extrativistas; (Redação dada pela Lei nº 7.804, de 18.07.89);

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

- g) Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente;
- h) Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumento de Defesa Ambiental;
- i) penalidades disciplinares ou compensatórias pelo não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental;
- j) instituição do Relatório de Qualidade do Meio Ambiente, a ser divulgado anualmente pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (inciso incluído pela Lei nº 7.804, de 18.07.89);
- k) garantia da prestação de informações relativas ao Meio Ambiente, obrigando-se o Poder Público a produzi-las, quando inexistentes (inciso incluído pela Lei nº 7.804, de 18.07.89);
- l) Cadastro Técnico Federal de atividades potencialmente poluidoras ou que utilizam recursos ambientais (inciso incluído pela Lei nº 7.804, de 18.07.89).

Em caráter específico, a Política Nacional de Gerenciamento Costeiro, instituída pela Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988, cria o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, PNGC, visando à utilização racional dos recursos naturais nessa região e, conseqüentemente, contribuindo para elevar a qualidade de vida de sua população e a proteção do seu patrimônio natural, histórico, étnico e cultural. São instrumentos de gestão do PNGC:

- a) Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro, PEGC;
- b) Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro, PMGC;
- c) Sistema de Informações de Gerenciamento Costeiro;
- d) Sistema de Monitoramento Ambiental da Zona Costeira, SMA-ZC;

- e) Relatório de Qualidade Ambiental da Zona Costeira;
- f) Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro, ZEEC;
- g) Plano de Gestão da Zona Costeira.

2.5.2 Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas

Segundo Freire et al (1999), o crescimento populacional vem impulsionando o desenvolvimento urbano e algumas conseqüências decorrentes deste fato são observadas no âmbito dos recursos hídricos. A concentração da população nos grandes centros e a conseqüente concentração das atividades que potencialmente se apropriam do meio ambiente, agravam os conflitos pelo uso de recursos cada vez mais escassos, seja pelo crescimento da demanda, seja pela degradação de sua qualidade. Devido ao aumento da poluição nos corpos d'águas superficiais o problema da escassez de água torna-se nacional e a degradação ambiental gera encarecimento dos custos de suprimento das demandas de água nas grandes cidades e busca de novos mananciais de abastecimento d'água devido a deterioração da qualidade das águas superficiais.

Nota-se, com isso, um aumento significativo na importância das águas subterrâneas e do seu entendimento técnico, seja como reserva estratégica para o suprimento de grandes centros ou como alternativa de suprimento para regiões semi-áridas, como é o caso do Nordeste brasileiro, tornando-se necessário adotar uma estratégia de proteção e um monitoramento mais constante da qualidade da água. Devido a esses fatores, a água subterrânea, assim como a superficial, deve ser considerada como bem público que deve ser regulamentado objetivando a sua preservação qualitativa e quantitativa para as futuras gerações ou, até mesmo, para as atuais.

Na maioria dos sistemas hidrológicos os componentes da água superficial e subterrânea estão intrinsecamente ligados, especialmente em áreas de baixo nível altimétrico como as áreas costeiras e em aquíferos rasos. Entretanto, a modelagem de água superficial e subterrânea é normalmente estudada de forma separada. Um número grande de trabalhos e pesquisas tem sido desenvolvido no sentido de integrar os componentes de fluxo superficial e subterrâneo no processo de modelagem (GEHERELS, 2001).

São várias as interligações entre água subterrânea e superficial. A água superficial pode transformar-se em água subterrânea através da infiltração da água de chuva, do excesso de água de irrigação, da percolação proveniente de rios, canais e lagos, como também através da recarga artificial. Por outro lado, água subterrânea pode transformar-se em água superficial através de descarga de base de rios, escoamento em fontes e drenagem agrícola. Um rio pode alimentar um aquífero subterrâneo ou ser alimentado por ele (RUFINO, 2004).

Na tentativa de facilitar o escoamento das águas indesejáveis em áreas urbanas, vários rios têm sido retificados em forma de canais o que tem gerado um problema ambiental muito grave. Cabral et al. (2001) afirma que este procedimento além de causar uma série de prejuízos ao meio ambiente por descaracterizar totalmente o habitat natural, provoca o início de uma cadeia de problemas decorrentes, a exemplo, de favorecimento de ligações de esgotos clandestinos, ocupação das margens e das áreas de expansão de cheias e problemas de enchentes à jusante. Outro agravante é devido ao *isolamento da conexão hidráulica* entre o aquífero e o rio (RUFINO, 2004).

Segundo Prusky et al., (2001), o manejo adequado da água, buscando reduzir o escoamento superficial por meio do aumento da infiltração de água no solo e, conseqüentemente, reabastecimento do lençol freático, representa uma prática fundamental

para melhorar o aproveitamento das chuvas, minimizando os picos de vazões e reduzindo o déficit de água nos períodos de estiagem, além de minimizar os custos da drenagem.

2.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Um SIG – Sistema de Informação Geográfica (do inglês: GIS – Geographical Information Systems) pode ser analisado como uma ferramenta utilizada para gerenciar, manipular, armazenar e visualizar um grande número de dados cuja referência espacial é conhecida. Rufino (2004) afirma que em um SIG a principal proposta é a combinação de dados espaciais, com o objetivo de descrever e analisar interações, para fazer previsões através de modelos, e fornecer apoio nas decisões tomadas por especialistas, gestores, técnicos, etc. Para isso, utilizam-se técnicas de análise espacial, chamadas inferências espaciais, que permitem a produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Entretanto, deve-se saber que diferentes métodos de inferência podem gerar dados em diferentes formatos e com diferentes níveis de confiabilidade.

Segundo Silva (2004), a estrutura de um SIG é funcionalmente composta por quatro componentes: dados de entrada, armazenamento e gerenciamento de dados, manipulação e análises de dados, e dados de saída (Figura 2.3), proporcionando a manipulação espacial de dados através de ferramentas de análises, organização, edição, armazenamento, análise, localização e informação de atributos de dados geográficos.

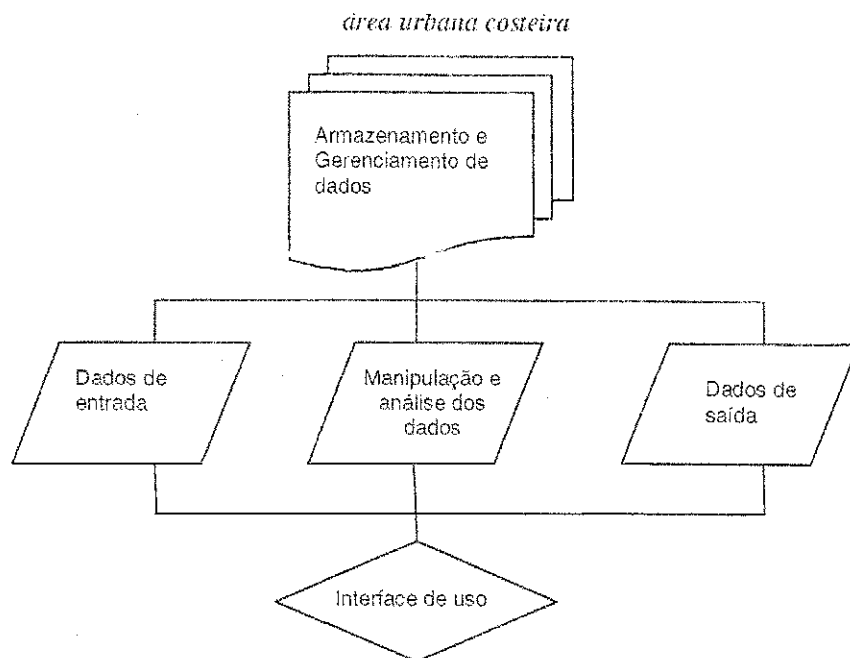


Figura 2.3 – Estrutura de um SIG

Fonte: Adaptado de Silva (2004).

Um SIG pode ser considerado um sistema que possui um banco de dados digitais para fins específicos. Estes sistemas são relacionados a outras aplicações de banco de dados, mas com uma diferença importante: toda a informação em um SIG é vinculada a um sistema de referência espacial. Outras bases de dados podem conter informação locacional (como endereços de rua ou códigos de endereçamento postal), mas uma base de dados de SIG usa georeferências como o meio primário de armazenar e acessar a informação.

2.7. SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO ESPACIAIS

Sistemas de Apoio à Decisão – SAD é uma classe de Sistemas de Informação ou Sistemas baseados em Conhecimento. Refere-se simplesmente a um modelo genérico de tomada de decisão que analisa um grande número de variáveis para que seja possível o posicionamento a uma determinada questão (Wikipédia, 2007). SAD ainda é definido, de um modo geral, como “um sistema computacional que auxilia o processo de tomada de decisão”. Os Sistemas de Suporte à Decisão Espaciais (do inglês: SDSS – Spatial Decision Support Systems) se desenvolveram de forma semelhante aos SAD também conhecidos

por Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), a partir da necessidade de ampliação dos recursos dos SIG na solução de problemas espaciais de decisão.

Segundo Rufino (2004), algumas vezes o problema a ser solucionado exige uma decisão que depende diretamente das características espaciais das informações envolvidas. Em outros momentos, a decisão a ser tomada é por si só um dado espacial como, por exemplo, uma localização espacial mais adequada/mais apropriada para a instalação de certo equipamento, ou de uma grande obra. Dentro deste contexto, o problema principal na utilização de um SIG como SAD é a “formalização do conhecimento” de maneira que estas técnicas analíticas incorporadas à maioria dos sistemas atuais possam efetivamente auxiliar na tomada de decisão.

As principais características dos SAD são:

- Possibilidade de desenvolvimento rápido, com a participação ativa do usuário em todo o processo;
- Facilidade para incorporar novas ferramentas de apoio à decisão, novos aplicativos e novas informações.
- Flexibilidade na busca e manipulação das informações;
- Individualização e orientação para a pessoa que toma as decisões, com flexibilidade de adaptação ao estilo pessoal de tomada de decisão do usuário;
- Real pertinência ao processo de tomada de decisão, ajudando o usuário a decidir através de subsídios relevantes;
- Usabilidade, ou seja, facilidade para que o usuário o entenda, use e modifique de forma interativa.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

Portanto, pode-se dizer que SAD são fundamentais em qualquer processo de tomada de decisão a partir de dados e modelos, na tentativa de solucionar problemas estruturados, com o auxílio de computadores.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo abrange três bairros: Aeroclub, Bessa e Jardim Oceania, mas será apresentada apenas como bairro Bessa, por ser assim anteriormente conhecido. Encontra-se na região litorânea de João Pessoa, possuindo uma área de 6,4 km² e perímetro de 11,9 km. Sua extensão é de 4,5 km na direção Norte-Sul, variando na direção Leste-Oeste próximo de 1,8 km. É limitada a Oeste pela BR-230, a Leste pelo Oceano Atlântico e a Norte com a foz do antigo curso do rio Jaguaribe (Figura 3.1). Faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraíba, localizando-se em seu baixo curso.



Figura 3.1 – Limite Municipal de João Pessoa, localização do bairro Bessa.
Fonte: Rufino (2002).

3.1.1 Aspectos Físicos

A área de estudo está localizada na cidade de João Pessoa, cuja precipitação média anual e de aproximadamente 1.700 mm e evaporação média anual em tanque classe A de 1.310 mm. Seu clima pode ser classificado como tropical úmido, apresentando verão seco, sendo a variação da temperatura média mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível. A área da cidade é de 210 km², com população recenseada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000) de 597.934 habitantes, representando 15,3% da população estadual. Constitui, portanto, a maior concentração populacional do Estado da Paraíba. O município apresenta um índice de urbanização bastante alto, não dispondo de zona rural. Os vazios urbanos correspondem praticamente a áreas de preservação (porções de mata atlântica, manguezais, restingas, espelhos d'água, etc.) e loteamentos ainda não ocupados (SILVA et al, 2002).

A situação do Estado, próximo ao Equador, com alta radiação solar, determina um clima quente com temperatura média anual de 26°C e poucas variações intra-anuais. A distribuição espacial das temperaturas mostra uma dependência acentuada do relevo, com pouca variação de temperatura durante todo o ano, resultando em médias anuais elevadas, em torno de 22°C a 26°C. Esta baixa amplitude térmica se justifica pela localização em baixa latitude. A umidade relativa do ar encontra-se em torno de 80% (NÓBREGA, 2002).

A cidade possui duas unidades de relevo predominantes, os Baixos Planaltos Costeiros (tabuleiros costeiros) e a Planície Costeira. As regiões elevadas, correspondentes aos tabuleiros, dominam maiores extensões (Figura 3.2). São platôs sub-horizontais, com leve declividade no sentido do litoral. Apresentam-se em alguns setores drasticamente dissecados pelo ciclo erosivo, dando origem a vertentes íngremes e vales fortemente encaixados, com acentuado declive nas cabeceiras. Exemplos destes são os vales dos rios

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

Mumbaba, Marés, Cabelo, Timbó, Jacarapé, Camaço e Tambaí, os vales dos riachos Tibiri, Camurupim, Sanhauá, Taquarituba, Mussuré e do Meio e os vales das cabeceiras dos rios Jaguaribe, Cuiá e Boa Água. Os tabuleiros conseguem, entretanto, chegar até a costa, formando aí as denominadas falésias, que atingem duas ou três dezenas de metros de altura. As regiões elevadas são constituídas pelos sedimentos da Formação Beberibe e do grupo Barreiras. Grande parte da cidade de João Pessoa, bem como seu distrito industrial, encontra-se assentes sobre tabuleiros (RUFINO, 2004). O litoral é extremamente recortado, formando enseadas protegidas por recifes e interrompido, em alguns trechos, pelos estuários dos rios e maceiós², onde ocorrem os mangues que estão sob permanente influência das marés, apresentando-se em alguns momentos como áreas emersas, na maré baixa, e em outros, submersas, na maré alta (NÓBREGA, 2002).

Já as regiões deprimidas coincidem com as planícies de inundação de vales maiores, com as baixadas litorâneas, representando interrupções do relevo elevado e sendo constituídas pelos depósitos mais recentes (aluviões e depósitos praiais). Os vales dos rios Gramame, Prazeres, Mangabeira, Cuiá, Sanhauá, Paroeira, Preto e baixo e médio cursos do rio Jaguaribe, todos na área da Grande João Pessoa, correspondem a regiões baixas. Igualmente relacionadas com estas últimas estão as baixadas litorâneas, que, do Cabo Branco para o sul, na mesma área, constituem apenas uma estreita franja costeira. Do Cabo Branco em direção ao norte esta franja vai paulatinamente se alargando, até integrar-se na restinga de Cabedelo, onde se localiza o município homônimo (LUMMERTZ, 1977, citado por RUFINO, 2004).

² Lagoeiros, no litoral, formados pelas águas do mar nas grandes marés, e também pelas águas da chuva

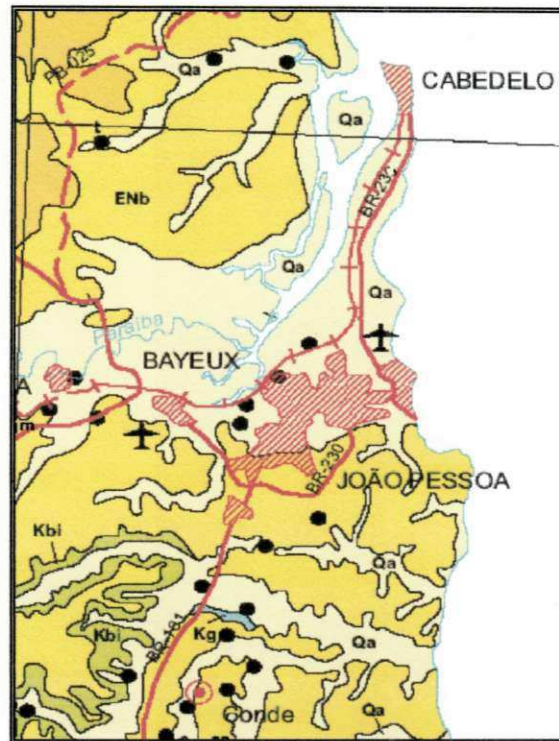


Figura 3.2 – Modelo digital de elevação da cidade de João Pessoa – PB.
Fonte: Rufino (2004).

3.1.2 Hidrogeologia

Segundo Rufino (2004), ao longo de toda a costa da capital paraibana ocorre dois tipos essenciais de depósitos recentes: as coberturas e as aluviões. As coberturas são depósitos arenosos inconsolidados que capeiam ora a superfície dos sedimentos do Grupo Barreiras, ora a dos materiais da Formação Beberibe, ou ainda o topo das praias elevadas (Figura 3.3). O grupo Barreiras é um sistema livre de água doce superficial que tem profundidade que vai de um metro a algumas dezenas de metros de espessura. Nesta região costeira é comum a invasão da cunha de água salgada do oceano tornando a água salobra em determinados pontos. A Formação Beberibe é a mais importante da região. É um aquífero do tipo confinado que apresenta boa qualidade de suas águas e que tem sido explorado de forma crescente para fins de abastecimento humano na Grande João Pessoa.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira



		FORMAÇÕES SUPERFICIAIS		BACIAS SEDIMENTARES	
IDADE (Ma)		CONTINENTE		BACIA PEPE	
CENOSÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	Qa Aluviões e Sedimentos de Praia	Kg Formação Gramame	
		PLEISTOCENO	Ql Coberturas Lateríticas	Qe Coberturas aluvio-coluviás	Ki Vulcânica Félsica Itapororoca
	NEÓGENO		ENb Grupo Barreiras	ENcn Formação Campos Novos	Kb Formação Beberibe/Itamaracá
		PALEÓGENO	ESm Formação Serra do Martins		

Figura 3.3 – Mapa geológico da grande João Pessoa.

OESA (1976), citado por Rufino (2004), descreve que as aluviões ocupam extensões consideráveis em toda a faixa sedimentar costeira, aparecendo nos vales e terraços dos rios atuais, assim como nas praias e nos terraços costeiros. Nos vales dos rios, distribuem-se essencialmente nas proximidades de suas desembocaduras, onde se espalham em vastas superfícies formando as chamadas planícies costeiras de inundação. Em locais mais distantes da costa, predominam depósitos areno-argilosos de granulação em geral média a

fina, ocasionalmente grosseira e até conglomerática (sedimentos fluviais). Nas zonas mais próximas da costa, os depósitos recebem a influência das marés, tornam-se mais siltico-argilosos, apresentam coloração cinza-escuro e constituem os sedimentos de mangue.

Na área da Grande João Pessoa, as aluviões aparecem em extensões consideráveis. Constituem toda a restinga de Cabedelo, bem como os vales dos rios de grande e médio porte que sulcam a área, a saber: o rio Paraíba ao norte e o rio Gramame ao sul (Figura 3.1). A espessura das aluviões pode atingir normalmente 15 a 20 metros, excepcionalmente mais, como acontece na porção nordeste da restinga de Cabedelo, aonde chega a alcançar cerca de 75 metros. As aluviões constituem geralmente bons aquíferos livres. Sua permeabilidade está na razão inversa do conteúdo de silte mais argila. Encontram-se bem distribuídos na área da Grande João Pessoa ocupando notadamente os vales dos rios e riachos, bem como constituindo depósitos litorâneos de um modo geral. Ao longo dos anos, estes aquíferos têm sido explorados para o abastecimento de algumas pequenas indústrias, de incipientes sistemas de irrigação e abastecimentos domésticos em áreas localizadas, principalmente, na faixa litorânea. A taxa de infiltração nas aluviões é, em geral, bastante elevada, dada à boa permeabilidade que costumam apresentar tais sedimentos (LUMMERTZ, 1977, apud RUFINO, 2004).

Os terrenos sedimentares são o estofa do município, representados pelos sedimentos mesoceno-zóicos do Grupo Paraíba, compostos das formações Beberibe e Gramame, pertencentes à bacia sedimentar costeira denominada Pernambuco-Paraíba, além de exposições terciárias, constituídas do Grupo Barreiras e Quaternárias, formadas por aluviões, dunas e sedimentos de praia, tais como recifes e mangues (Silva et al, 2002). Os sistemas aquíferos Beberibe e Barreiras, sendo o primeiro do tipo confinado (mais importante) e o segundo um sistema livre de água doce superficial, presente na formação do mesmo nome.

Nesta região costeira é comum a invasão da cunha de água salgada do oceano tornando a água salobra em determinados pontos. Por esse motivo, faz-se necessário um gerenciamento adequado do manejo dos recursos hídricos. Uma exploração controlada e monitorada do aquífero freático através da captação de água por poços pode auxiliar, por exemplo, na drenagem superficial na medida em que o bombeamento em diferentes pontos pode ajudar a rebaixar o nível do lençol freático e controlar inundações que por vezes causam inúmeros problemas para a população em geral.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A cidade de João Pessoa, localizada no Estado da Paraíba, como a maioria dos grandes centros urbanos costeiros, vem enfrentando problemas devido ao processo de urbanização acelerado e desordenado. Um caso específico é o bairro Bessa, ambiente de planície costeira em processo de urbanização, que enfrenta sérios problemas de alagamentos provenientes da deficiência da drenagem pluvial, bem como dos afloramentos do lençol freático.

No Bessa, como foi dito anteriormente, existe problemas recorrentes de inundações devido ao alto nível do lençol subterrâneo em certas épocas do ano. Por outro lado, a captação das águas subterrâneas por poços, proposta por Rufino (2004) e Silva (2004) como alternativa de gestão, se ocorrer de forma descontrolada e crescente, pode gerar rebaixamento excessivo do lençol subterrâneo e intrusão salina. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de balanço hídrico, a nível de solo, e seu emprego na estimativa da recarga do lençol freático, buscando alternativas que minimizem esses problemas. Tais alternativas caracterizam-se pelo rebaixamento adequado e controlado do lençol através do bombeamento de poços, visto que o afloramento em períodos chuvosos é um dos fatores que favorecem a ocorrência de alagamentos.

Nos estudos de Rufino (2004), Silva (2004) e Rêgo (2004) a recarga foi estimada através de cenários, ou seja, hipoteticamente, utilizando um modelo de fluxo subterrâneo devidamente calibrado para a região e, com isso, tornando possível a simulação da extração de água subterrânea através de poços, estrategicamente localizados, com utilização e implantação justificadas para rebaixamento do lençol freático. A Figura 3.4 mostra uma representação esquemática dos modelos atmosférico e hidrogeológico e de balanço hídrico do solo, utilizados no contexto desta pesquisa.

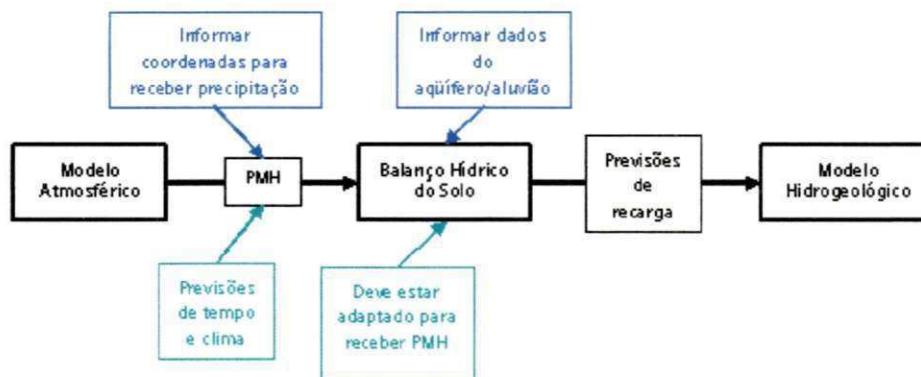


Figura 3. 4 – Modelos (atmosférico + hidrogeológico) e balanço hídrico do solo.

Para uma maior aproximação da realidade, torna-se necessária uma estimativa da recarga baseada em um modelo de balanço hídrico do solo. A idéia é que a partir de previsões meteorológicas (tempo e chuvas) obtenha-se a recarga, possibilitando a simulação da melhor taxa de extração, ou seja, a maior vazão de bombeamento possível sem que haja o risco de rebaixamento excessivo do lençol freático ou de intrusão salina.

Para se estimar recarga de aquíferos é fundamental que se tenha um conhecimento Hidrogeológico da região e dados referente à precipitação e evapotranspiração. Conhecida a recarga, torna-se possível prever o volume de recursos hídricos subterrâneos renováveis. A determinação da recarga é, portanto, um importante suporte ao planejamento e à gestão integrada dos recursos hídricos.

3.2.1. Alagamentos Frequentes

Os problemas decorrentes da urbanização das cidades brasileiras têm certa semelhança entre si, apresentando leves variações de região para região, de acordo com as especificidades de cada uma destas. As questões de drenagem não fogem à regra. No entanto, a drenagem de áreas planas e costeiras que além de estarem sujeitas aos problemas comuns às outras regiões, como regime de chuvas; educação da população; falta de consciência dos tomadores de decisão quanto aos problemas relacionados ao tema; preparo de técnicos quanto às relações da drenagem com o meio ambiente etc.; na zona costeira ainda se verifica a pressão da ocupação dos terrenos marinhos sem a observância das limitações à ocupação na linha de costa, entre outros condicionantes especiais. Nota-se, às vezes, a ausência de integração nos projetos da drenagem urbana com outros setores/áreas da gestão municipal. Ao contrário, os problemas vão surgindo como consequência do uso e ocupação do solo e são resolvidos de forma pontual e fragmentada. Este tipo de ação traz prejuízos a médio prazo, e não resolve os problemas advindos da pluviosidade, tornando os micro-sistemas de drenagem implantados problemáticos e inadequados em pouco tempo de uso (NÓBREGA, 2002).

O Bessa, como outras áreas urbanas localizadas em planícies costeiras, apresenta alagamentos frequentes que, por sua vez, geram problemas ambientais, sociais e econômicos, consequentes da deficiência da drenagem pluvial aliada ao afloramento do lençol freático em determinados pontos que, no período chuvoso, chegam a ficar completamente cobertos pela água acumulada, com dificuldades de infiltração. Por ser uma área totalmente plana, nota-se um aumento da dificuldade de esgotamento das águas pluviais e das águas servidas com relação aos demais bairros da orla. O bairro constitui a área mais larga da planície costeira de João Pessoa, com quase dois quilômetros de largura, sendo ainda o início da restinga que forma o município de Cabedelo.

Em seus estudos, Nóbrega (2002) argumenta que os loteamentos no bairro do Bessa foram traçados e lançados no terreno natural com a premissa de aproveitamento máximo da área para a implantação de quadras e lotes. Durante o desenho destes loteamentos não foram considerados os pequenos córregos e lagoas sazonais, pois os mesmos só acumulam água na época chuvosa. Quando os lotes foram vendidos, seus proprietários aterraram as pequenas depressões dos terrenos que são na verdade as lagoas e córregos citados, com a total desinformação do que representam no conjunto ambiental do loteamento. Conseqüentemente o fluxo natural de escoamento das águas de chuva foi interrompido, provocando alagamentos pós-ocupação.

3.2.2. Drenagem Superficial

Em regiões costeiras, faz-se necessário um estudo prévio do comportamento do aquífero freático acompanhado de um planejamento adequado que forneça subsídios para projetos eficientes de drenagem superficial, tendo-se em vista que medidas como essas podem apontar qual a melhor configuração para o traçado dos canais de drenagem e o grau de interferência entre os mesmos e o meio ambiente.

Nóbrega (2002) descreve que, em uma área plana, com o agravante da superficialidade do lençol freático, cujas áreas apresentam maior dificuldade ao uso de soluções tradicionais para o encaminhamento das águas de chuva, o mais lógico seria tirar proveito do terreno natural e distribuir os lançamentos para as lagoas e córregos sazonais, respeitando as áreas alagadas de expansão das cheias, resolvendo o problema na fonte. Desta forma, com o planejamento e a consciência de equipe multidisciplinar atuando criteriosamente, desde o traçado do loteamento, pode-se fazer economia de gastos futuros desnecessários com grandes obras de drenagem, além de evitar prejuízos para a população que ali se instala. Porém, no bairro Bessa, o projeto de drenagem superficial não

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

contemplou estudos hidrogeológicos, ou seja, não foi levado em conta, por exemplo, qual seria a influência da construção de canais de drenagem sobre o lençol freático e vice-versa. O órgão estadual responsável pelo controle ambiental, preocupado que tal construção pudesse causar uma elevação indesejável dos níveis do lençol freático, exigiu que estudos pertinentes fossem realizados.

De acordo com o projeto, as águas coletadas são encaminhadas para os canais da seguinte forma (Figura 3.5):

- (i) Canal 1: tem o lançamento no Canal 4;
- (ii) Canal 2: tem o lançamento no Canal 4;
- (iii) Canal 3: tem o lançamento no Maceió do Clube dos Médicos;
- (iv) Canal 4: tem o lançamento dividido entre o rio Jaguaribe e a antiga foz do rio Jaguaribe em Intermares.

O ponto de divisão fica próximo ao lançamento do Canal 2. As águas provenientes dos Canais 1 e 2 correm em direção ao rio Jaguaribe.

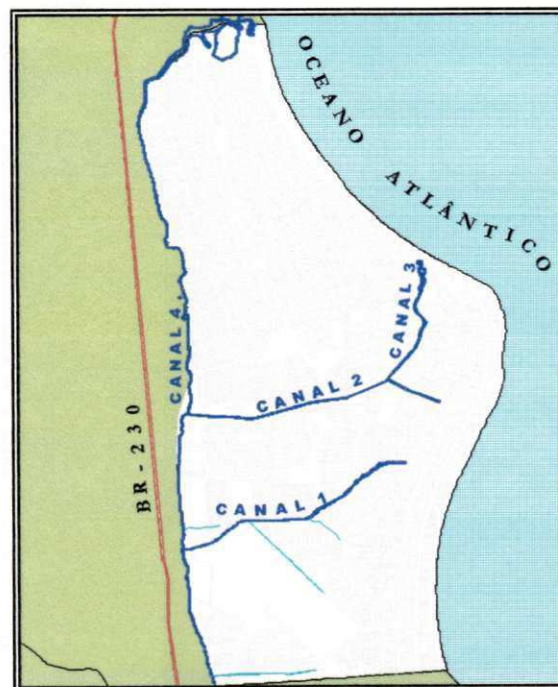


Figura 3.5 – Canais de macro – drenagem no bairro Bessa.
Fonte: Nóbrega (2002).

Estudos realizados pela UFPB/ ATECEL (1999) incluíram a execução de sondagens para conhecimento da litologia e medições do nível do lençol freático em diferentes períodos de marés (as medições feitas pela manhã, com maré baixa, foram repetidas à tarde, com maré alta), além de testes de permeabilidade para a determinação dos parâmetros hidráulicos com vistas à quantificação do escoamento natural do lençol. Algumas conclusões foram obtidas a partir destes estudos. Duas situações, extremas e opostas, poderiam ser esperadas da relação entre os canais e o lençol subterrâneo no bairro do Bessa (Vieira et al., 2001). Uma delas seria o funcionamento do canal como uma barreira artificial interposta ao fluxo subterrâneo natural, provocando a elevação do nível freático, a qual teria início junto às paredes do canal e se propagaria por grande extensão do aquífero, alterando completamente o seu estado natural.

Nesse caso, o canal, mesmo conduzindo as águas escoadas superficialmente, iria contribuir para a formação de zonas alagadas, com características pantanosas, devidas ao transbordamento do aquífero, supersaturado pela elevação do nível. Os picos de escoamento superficial seriam também exacerbados pela impossibilidade de infiltração da água de chuva no aquífero, cujo nível freático se encontrava previamente elevado; além de outras conseqüências ecológicas e econômicas desta situação.

A outra situação esperada de relação entre os canais e o aquífero seria oposta à anterior, isto é, que os canais funcionassem como drenos subterrâneos perfeitos, contribuindo para o rebaixamento do lençol em torno deles e, por extensão, em vasta área do aquífero. As conseqüências seriam também opostas às da situação anterior, indo favorecer a drenagem geral do bairro, melhorando as suas condições de habitabilidade. Por outro lado, a vegetação ciliar que dependia dos níveis altos do lençol próximo aos riachos e baixadas, tenderia a desaparecer.

Rufino (2004) afirma que neste caso, conforme se depreende dos estudos realizados, não acontecem quaisquer dessas situações extremas. Os novos canais construídos, se não funcionam a contento como drenos subterrâneos, tampouco funcionam como barreiras impermeáveis. O fluxo subterrâneo pode alcançar o canal, em quantidades razoáveis, através das juntas de dilatação das paredes e do fundo dos canais. Na realidade, esta situação decorre do fato de que estes canais não foram dimensionados como drenos subterrâneos, sendo as suas juntas de dilatação planejadas para serem condutos de alívio de sub-pressão e o próprio canal como drenos das águas pluviais.

Pode-se considerar que esses estudos concluíram que os canais podem desempenhar a função de dreno subterrâneo, com conseqüências benéficas, na dependência de uma operação adequada e eficiente. No entanto, a falta de manutenção regular dos canais pode levar às conseqüências opostas, como a obstrução dos canais por entulhos ou obstrução das juntas por cimentação ou crescimento de vegetação. De forma preocupante, essa falta de manutenção pode culminar, inclusive, com uma inversão do fluxo, passando o canal a alimentar o aquífero e com isso, agravando o problema.

Os estudos revelaram, ainda, que o aquífero é bastante sensível às intervenções antrópicas, o que pôde ser concluído pela extensão dos rebaixamentos do lençol freático, provocados por poços em operação em alguns pontos do bairro, visível em todos os mapas de redes de fluxo. Os poços chegam mesmo a interferir na função drenante de alguns dos canais construídos. Esta condição mostra-se particularmente vantajosa para a obtenção de rebaixamentos de níveis freáticos com o objetivo de melhorar as condições de drenagem no bairro (RUFINO, 2004).

3.2.3. Gestão x Alagamento

No que diz respeito à gestão e distribuição de equipamentos urbanos na área, apenas no final da década de 90, após todo o processo de expansão urbana ser consolidado, é que foram implantados os primeiros equipamentos urbanos como a pavimentação da principal via de acesso entre Bessa e Poço, a expansão do sistema de abastecimento d'água e o início da construção dos canais de drenagem do Bessa, como meio de solucionar os problemas frequentes de alagamento na área. Acontece que a maior parte dos loteamentos foi aprovada e liberada no final da década de 70 e durante toda a década de 80, o que demonstra que o aspecto legal parece ter sido "desconsiderado" na realização das obras.

O parcelamento urbano, a nível federal, é objeto da Lei nº 6.766 de 19/12/1979, onde são estabelecidas algumas exigências básicas para a permissão de um parcelamento, destacados por Rufino (2004):

"Art 3º. Somente será admitido o parcelamento do solo para fins urbanos em zonas urbanas ou de expansão urbana, assim definidas por lei municipal.

Parágrafo único - Não será permitido o parcelamento do solo:

I - em terrenos alagadiços e sujeitos a inundação, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;

(...)

IV - em terrenos onde as condições geológicas não aconselham a edificação;

V - em áreas de preservação ecológica ou naquelas onde a poluição impeça condições sanitárias suportáveis, até a sua correção."

Segundo Rufino (2004) a representação de restrições de ocupação urbana estabelecidas em Lei referentes à área em estudo se configura em dois planos de

informação. O primeiro deles diz respeito às faixas marginais aos corpos hídricos existentes e o segundo, extraído diretamente do plano diretor, diz respeito às zonas especiais de preservação (ZEP) inseridas no bairro do Bessa (Figura 3.6).

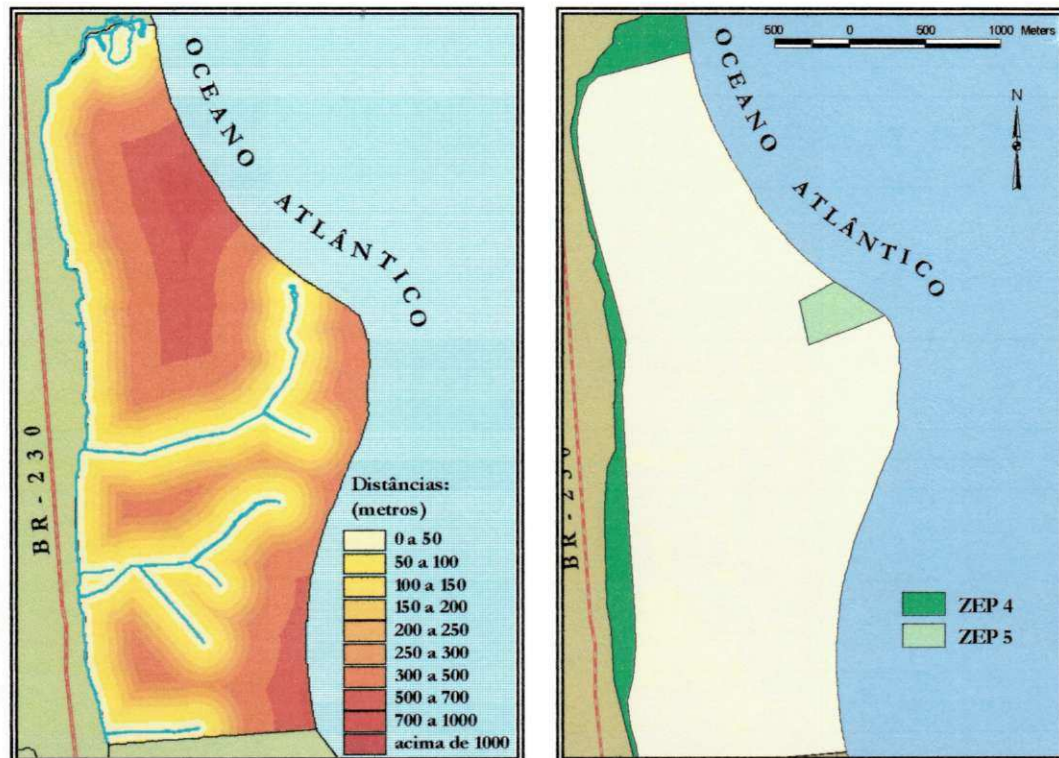


Figura 3.6 – Mapa de distâncias aos corpos hídricos no bairro Bessa e áreas de preservação permanente.
Fonte: Rufino (2004).

Tendo-se em vista que o bairro apresenta limitações impostas pela geografia local, a ocupação do solo e a organização do espaço urbano não atenderam às exigências Legais. O bairro está limitado pela foz do antigo curso do rio Jaguaribe e pelo Oceano Atlântico. No entanto, a sua ocupação se deu sem uma análise adequada dos problemas envolvidos, como a questão da macrodenagem e consideração da bacia hidrográfica como unidade de planejamento. Inevitavelmente as conseqüências desse fato são os alagamentos recorrentes, causando transtornos à população em geral.

O Quadro 3.1 apresenta uma síntese dos problemas de drenagem devido a causas naturais em planícies costeiras.

FATORES NATURAIS
Baixas cotas do terreno em relação ao nível do mar
Baixo gradiente topográfico – áreas planas
Baixa densidade de drenagem natural (em João Pessoa)
Lençol freático aflorante na estação chuvosa
Variação de níveis das marés

Quadro 3.1 – Problemas de drenagem devido a fatores naturais em planícies costeiras.

Fonte: Nóbrega (2002).

Observa-se a ausência de integração nos projetos da drenagem urbana com outras áreas da gestão municipal. Nóbrega (2002) apresenta em seus estudos problemas de origem antrópica que influenciam nas questões de drenagem em centros urbanos costeiros, como mostrado no Quadro 3.2.

Os problemas surgem como consequência do uso e ocupação desordenada do solo e são resolvidos de forma pontual e fragmentada, trazendo prejuízos a médio ou longo prazo. Os micro-sistemas de drenagem implantados são, portanto, problemáticos e inadequados, o que comprova a urgente necessidade de um sistema eficiente de gestão.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

AÇÃO ANTRÓPICA	PROBLEMA	POSSÍVEIS SOLUÇÕES /ATENUAÇÃO
Traçado dos loteamentos desconsiderando a rede de drenagem natural.	Interrupção do escoamento natural.	Projetos de loteamentos feitos por equipe multidisciplinar (NE).
Implantação da rede viária com represamento da drenagem natural.	Habitções construídas em cotas abaixo do greid da via.	Implantação da infraestrutura antes da ocupação (E).
Ocupação urbana na linha de costa.	Lançamentos de galerias sujeitos à ação das marés.	Ordenamento Urbano que considere a dinâmica marinha (NE).
Implantação de drenagem de forma fragmentada.	Sistemas implantados inadequados e problemáticos.	Plano Diretor de Drenagem Urbana (NE).
Canalização de rios e córregos.	Isolamento do aquífero; Prejuízos ao meio ambiente; Enchentes a jusante; Favorecimento às ligações clandestinas de esgoto.	Renaturalização de rios canalizados integrado com os demais planos municipais (E).
Estações Elevatórias de Esgoto sem grupo gerador de energia e sem manutenção, com extravasor ligado para galeria pluvial.	Poluição das praias que têm lançamentos de galerias pluviais.	Obrigatoriedade do uso de geradores nas EEE e manutenção sistemática (E) e (NE).
Estações Elevatórias de Esgoto implantadas no Sub-solo dos passeios públicos.	Dificuldade de identificação da fonte poluidora nas praias receptoras de lançamentos de galerias.	Obrigatoriedade de reserva de espaços destinados às EEE nos loteamentos aprovados (NE) e (E).
Lixo nas ruas e terrenos baldios (plásticos, garrafas PET, etc.).	Entupimento de galerias e canais.	Grelhas nas entradas das bocas de lobo. Conscientização da população. Eficiência da coleta de lixo (NE) e (E).

Quadro 3.2 – Problemas de drenagem devido à ação antrópica.

4 METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Como já foi apresentado, este trabalho está inserido no contexto de trabalhos anteriores que buscam alternativas úteis para minimizar os problemas referentes à gestão de recursos hídricos em áreas urbanas costeiras, através da observação sistemática de uma equipe de gestão responsável pelos processos decisórios em uma área urbana costeira escolhida como estudo de caso.

A busca por processos sustentáveis é cada vez maior, com a procura de novas visões holísticas e interligadas do conhecimento e das ações humanas e suas conseqüências. É preciso reconhecer a necessidade de um novo avanço científico, de conceitos e visões, a fim de incorporar processos sustentáveis (SILVA, 2004).

Diante disso, a abordagem metodológica dessa pesquisa, mostrada no fluxograma da Figura 4.1, baseia-se na implementação de um modelo hidrológico de balanço hídrico, a nível de solo, capaz de estimar a recarga do lençol freático para áreas urbanas costeiras, através do conhecimento hidrogeológico da região estudada. Para tanto, utilizou-se o Sistema de Informações Geográficas, que possibilitou a consulta automática ao banco de dados relativos aos diversos usos do solo, de maneira espacializada.

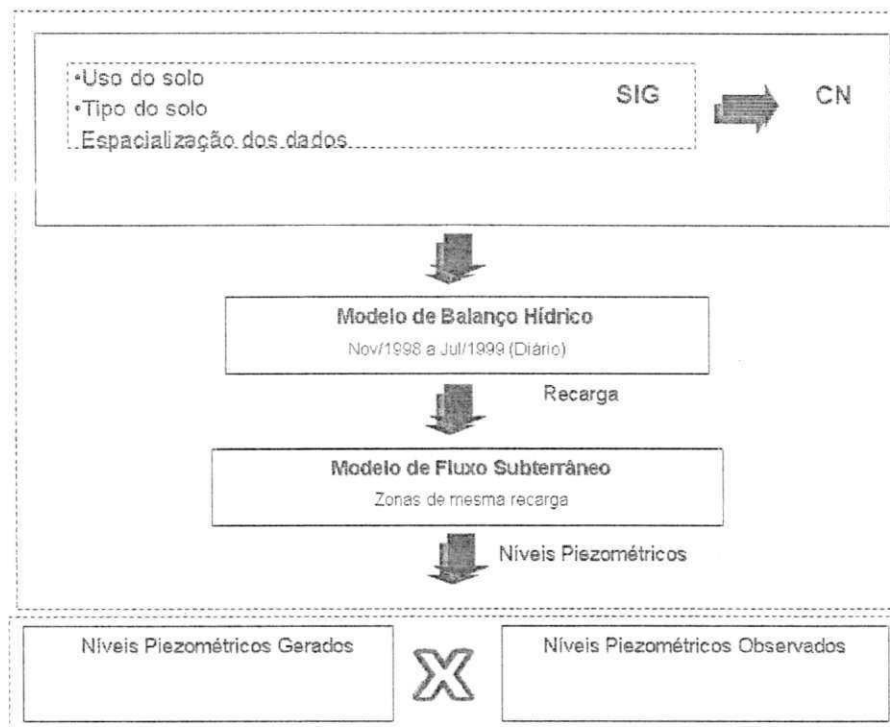


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia.

4.2 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO

O modelo de balanço hídrico utilizado nesta pesquisa segue o modelo de Thornthwaite e Mather, usado por Back (1997). Trata-se de um modelo, desenvolvido em plataforma Excel, que tem por função o cálculo da recarga do aquífero da área estudada, desenvolvido a nível diário, para um período compreendido entre novembro de 1998 e julho de 1999, como mostra o algoritmo geral do modelo de balanço hídrico do solo (Figura 4.2). Os resultados obtidos permitem analisar o comportamento do aquífero, baseado na recarga e, com isso, propõem-se a auxiliar na tomada de decisões relativas à gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas costeiras, buscando-se um uso eficiente desses recursos.

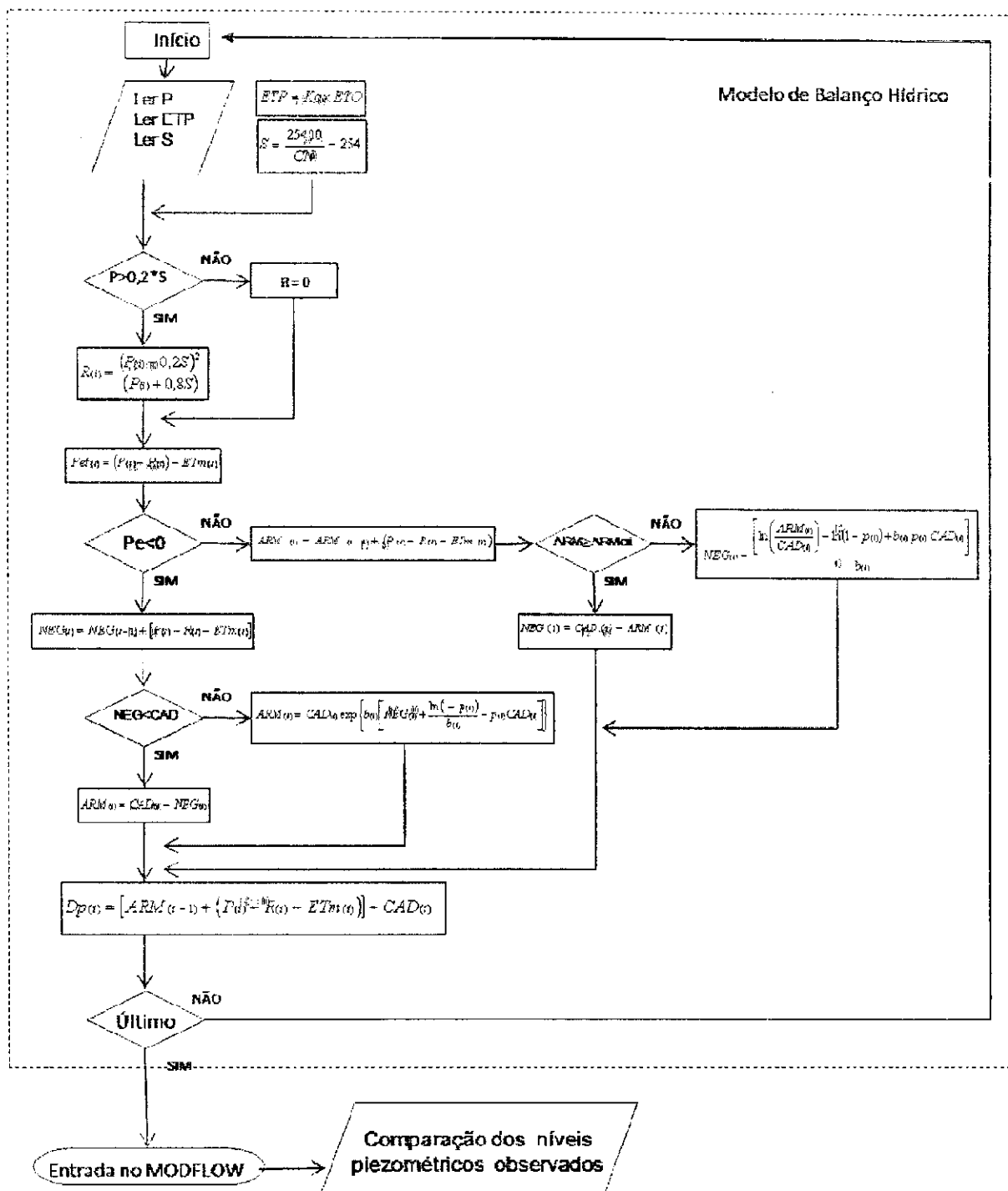


Figura 4.2 – Algoritmo de funcionamento do modelo de balanço hídrico do solo.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) constitui um importante parâmetro na estimativa da recarga e pode ser obtido através da quantidade de água contida na capacidade de campo (θ_{CC}) e quantidade de água contida no ponto de murcha permanente (θ_{PM}). A capacidade de campo é a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem do seu excesso, quando a velocidade do movimento descendente praticamente cessa, o que usualmente, ocorre dois a três dias após a chuva ou irrigação. O ponto de murcha

permanente é a umidade do solo na qual uma planta murcha não se restabelece mesmo quando colocada em atmosfera saturada. A FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (1998) estabelece a capacidade de campo e ponto de murcha permanente conforme a textura do solo (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Textura do solo	Capacidade de campo	Ponto de Murcha Permanente
Areia	0,07 a 0,17	0,02 a 0,07
Areia franca	0,11 a 0,19	0,03 a 0,10
Franco arenoso	0,18 a 0,28	0,06 a 0,16
Franco	0,20 a 0,30	0,07 a 0,17
Franco siltoso	0,22 a 0,36	0,09 a 0,21
Silte	0,28 a 0,36	0,12 a 0,22
Franco argiloso siltoso	0,30 a 0,37	0,17 a 0,24
Argila siltosa	0,30 a 0,42	0,17 a 0,29
Argila	0,32 a 0,40	0,12 a 0,20

Fonte: FAO (1998).

Para a elaboração do Modelo de Balanço hídrico do solo, há necessidade de se definir o armazenamento máximo no solo, definido como a capacidade de água disponível (CAD), ter dados hidrológicos como a série de precipitação e a estimativa da evapotranspiração potencial em cada período a ser analisado. O modelo permite deduzir a evapotranspiração real, o total de água retido no solo e a deficiência hídrica.

De acordo com a representação gráfica do balanço hídrico do solo, na Figura 4.3, considera-se somente o movimento vertical de água dentro do volume de solo analisado, conforme a equação 4.1.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

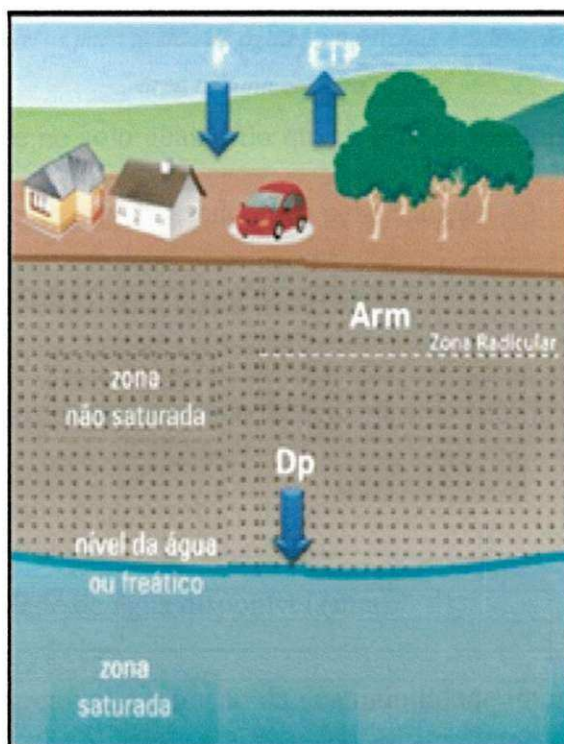


Figura 4.3 - Representação gráfica do balanço hídrico do solo.

$$ARM_{(i)} = ARM_{(i-1)} - ETp_{(i)} + P_{(i)} + Ir_{(i)} - Dp_{(i)} \quad (4.1)$$

onde:

ARM = armazenamento de água no solo no período i (mm);

ETp = evapotranspiração potencial (mm);

P = precipitação (mm);

Ir = irrigação (mm);

Dp = recarga (mm).

Para representar as relações entre evapotranspiração real e armazenamento de água no solo utilizou-se a metodologia descrita por Back (1997), segundo a qual, a evapotranspiração real (ETr) é igual à evapotranspiração máxima (ETm) quando o armazenamento de água se encontra acima do limite crítico de umidade. O limite que

A capacidade máxima de armazenamento de água no solo é descrita por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.5)$$

onde: S = capacidade de armazenamento (mm);

CN = coeficiente de escoamento (adimensional).

Verifica-se que, em média, as perdas iniciais representam 20% da capacidade máxima $I_a = 0,2S$. De forma que a equação de R(i) é válida para $P > 0,2S$. Quando $P < 0,2S$, $Es(i) = 0$.

Segundo Tucci (2004) o parâmetro "CN" (Curva Número) retrata as condições de cobertura e solo, considerando o grau de umidade antecedente na descrição da potencialidade de geração de escoamento superficial, variando desde uma cobertura muito impermeável (limite inferior) até uma cobertura completamente permeável (limite superior), levando-se em consideração os diferentes tipos de solo e cobertura:

solo A – são solos que produzem baixo escoamento e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila;

solo B – solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o do tipo A e com permeabilidade superior à média;

solo C – solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;

solo D – solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com baixíssima capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

Para a área em estudo utilizaram-se os valores de CN apresentados na Tabela 4.2, sugeridos por Tucci (2004).

Tabela 4.2 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Baldios - boas condições	39	61	74	80
Zonas Residenciais				
Lotes de (m ²)				
% média impermeável				
L < 500	65	77	85	90
500 < L < 1000	38	61	75	83
1000 < L < 1300	30	57	72	81
1300 < L < 2000	25	54	70	80
2000 < L < 4000	20	51	68	79
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais.	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Os dados de uso do solo da área estudada foram obtidos a partir de Rufino (2004), sendo classificados em três categorias distintas, a saber: área referente aos lotes ocupados, área referente aos lotes não ocupados e área referente às vias de acesso do bairro. Para todas as áreas em estudo o solo foi considerado do tipo "A" (Tucci, 2004), ou seja, solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração e solos arenosos profundos com pouco silte e argila.

Os valores de CN na Tabela 4.2 referem-se a condições médias de umidade antecedente. Tucci (2004) apresenta correções aos valores tabelados para situações diferentes da média. As condições consideradas são as seguintes: AMC I – situação em que os solos estão secos. No estágio de crescimento, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm; AMC II – situação média em que os solos correspondem a umidade da capacidade de campo; AMC III – situação em que ocorrem precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, maiores que 53 mm.

Se os valores de $Pet^{(i)}$ apresentarem valores negativos, são considerados como negativos acumulados, representando a perda potencial de água, que pode ocorrer em virtude da precipitação não atender à demanda imposta pela evapotranspiração (BACK, 1997). Os valores de negativo acumulado são obtidos pelo somatório dos valores negativos seqüenciais, quando a evapotranspiração supera a precipitação, na equação abaixo:

$$NEG^{(i)} = NEG^{(i-1)} + [P^{(i)} - Es^{(i)} - ETm^{(i)}], \quad \text{quando } Pet^{(i)} < 0 \quad (4.6)$$

Quando o valor do negativo acumulado for menor que a água facilmente disponível (AFD) dada por $AFD = p \times CAD$, o valor do armazenamento de água no solo é estimado pela equação 4.7:

$$ARM^{(i)} = CAD^{(i)} - NEG^{(i)} \quad (4.7)$$

E quando o valor do negativo acumulado for maior que a água facilmente disponível, o armazenamento é definido pela equação 4.8:

$$ARM^{(i)} = CAD^{(i)} \exp \left\{ b^{(i)} \left[NEG^{(i)} + \frac{\ln(1 - p^{(i)})}{b^{(i)}} - p^{(i)} CAD^{(i)} \right] \right\} \quad (4.8)$$

Onde: b = coeficiente angular da função entre armazenamento e negativo acumulado.

No cálculo do parâmetro b foi utilizada a expressão ajustada por Cardoso (1995), conforme a equação 4.9:

$$b = 6.895 \cdot 10^{-5} + 7.149 \cdot 10^{-7} CAD - \frac{1.025}{CAD} \quad (4.9)$$

Quando Pet for positiva, isto é, a precipitação que infiltra supera o valor de ETm , interrompendo a seqüência de valores negativos, o valor do armazenamento é encontrado na equação 4.10:

$$ARM_{(i)} = ARM_{(i-1)} + (P_{(i)} - Es_{(i)} - ETm_{(i)}) \quad (4.10)$$

E o valor do negativo acumulado é calculado em função do armazenamento. Se o valor do armazenamento foi maior ou igual ao armazenamento crítico, utiliza-se a equação 4.11:

$$NEG(i) = CAD(i) - ARM(i) \quad (4.11)$$

E se o armazenamento for menor que o armazenamento crítico utiliza-se a seguinte equação 4.12:

$$NEG_{(i)} = \frac{\left[\ln \left(\frac{ARM_{(i)}}{CAD_{(i)}} \right) - \ln(1 - p_{(i)}) + b_{(i)} p_{(i)} CAD_{(i)} \right]}{b_{(i)}} \quad (4.12)$$

Considerando que o armazenamento máximo é limitado pela *CAD* e que a diferença, quando esse valor é superado, é considerada como sendo a drenagem profunda, pode-se calcular esse valor através da equação 4.13:

$$Dp = [ARM_{(i-1)} + (P_{(i)} - Es_{(i)} - ETm_{(i)})] - CAD_{(i)} \quad (4.13)$$

Considerou-se a drenagem profunda, ou seja, a parcela de água que infiltra até a zona de aeração, como sendo a própria recarga do aquífero subterrâneo, tendo-se em vista que a área estudada possui baixo gradiente hidráulico, o que dificulta o escoamento superficial, e que o solo característico da região é arenoso, condições estas favoráveis à infiltração. Uma vez calculadas as recargas diárias, os seus respectivos valores foram exportados para um modelo de fluxo subterrâneo para geração dos níveis piezométricos do aquífero.

4.3 MODELO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

Os modelos de fluxo subterrâneo são utilizados com a finalidade de representar, de maneira apropriada, aspectos complexos dos aquíferos subterrâneos, calculando resultados de processos ocorridos no interior dos mesmos. Por se tratarem de modelos numéricos requerem uma quantidade relativamente grande de informações e experiência do modelador para que seja confiável.

Dentre os modelos numéricos de fluxo de águas subterrâneas que tem tido uma aceitação mundial excepcional o de MODFLOW (desenvolvido pela USGS) para o qual foram desenvolvidos pré e pós-processadores (VISUAL MODFLOW PRO, PMWIN, GMS, etc.).

MODFLOW é um modelo numérico de águas subterrâneas tridimensional baseado na metodologia de diferenças finitas, contendo diversos módulos para representar poços, drenos, rios, evapotranspiração, infiltração, etc. Este modelo simula condições estacionárias e transientes de fluxo para aquíferos livres confinados ou semi-confinados. As condutividades hidráulicas, coeficientes de armazenamento e transmissividades atribuídos às diversas camadas podem ter distribuição isotrópica ou anisotrópica. O MODFLOW pode ser utilizado para simular condições de contorno do tipo nível de água e fluxo especificados ou fluxo dependente dos níveis de água no exterior da área modelada.

MODFLOW foi desenvolvido para simular fluxos de águas subterrâneas na zona saturada em aquíferos porosos, sendo tanto a temperatura como a densidade do líquido uniformes por toda área modelada. Este modelo não pode ser utilizado para simular fluxos dependentes de densidade, ondas de calor ou fluxo multifásico (por exemplo: DNAPL+Água, Vapor+Água, etc.).

4.3.1 Entrada dos Valores de Recarga no Modelo de Fluxo Subterrâneo

Utilizou-se um modelo de fluxo subterrâneo georreferenciado com as coordenadas geográficas da região de estudo onde o aquífero está representado por células de 5x5 (metros) formando uma malha de 150 colunas x 250 linhas, dando um total de 37.500 células. O processo numérico consiste em sobrepor ao aquífero um mapa também georreferenciado referente aos valores de CN atribuído por zonas.

4.3.1.1 Parâmetros Hidrogeológicos

Os parâmetros hidrogeológicos utilizados no modelo de fluxo subterrâneo foram a condutividade hidráulica e a porosidade eficaz, já calibrados (UFPB/ATECEL, 1999). De acordo com os dados obtidos pela UFPB na área em estudo, o mês de maio de 1999 foi o que teve o monitoramento mais completo, isto é, foram observados praticamente todos os poços distribuídos em toda a área do Bessa. Desta forma, o modelo foi calibrado inicialmente para este mês, assim pode-se obter a configuração da condutividade hidráulica horizontal que melhor representa as características do solo. Após obter uma calibração satisfatória para este período, o modelo foi então calibrado para o mês inicial da campanha de medição (novembro de 1998), mantendo-se os parâmetros obtidos na calibração para maio de 1999 e variando as cargas hidráulicas.

A Figura 4.4 apresenta os valores dos parâmetros hidrogeológicos, na qual se observa que a condutividade hidráulica (K) sofreu variação de $1,0 \times 10^{-5}$ a 8×10^{-5} m/s e a porosidade eficaz (n) de 0,10 a 0,17. As áreas representadas com a mesma cor apresentam valores iguais de condutividade (K) e de porosidade efetiva (n).

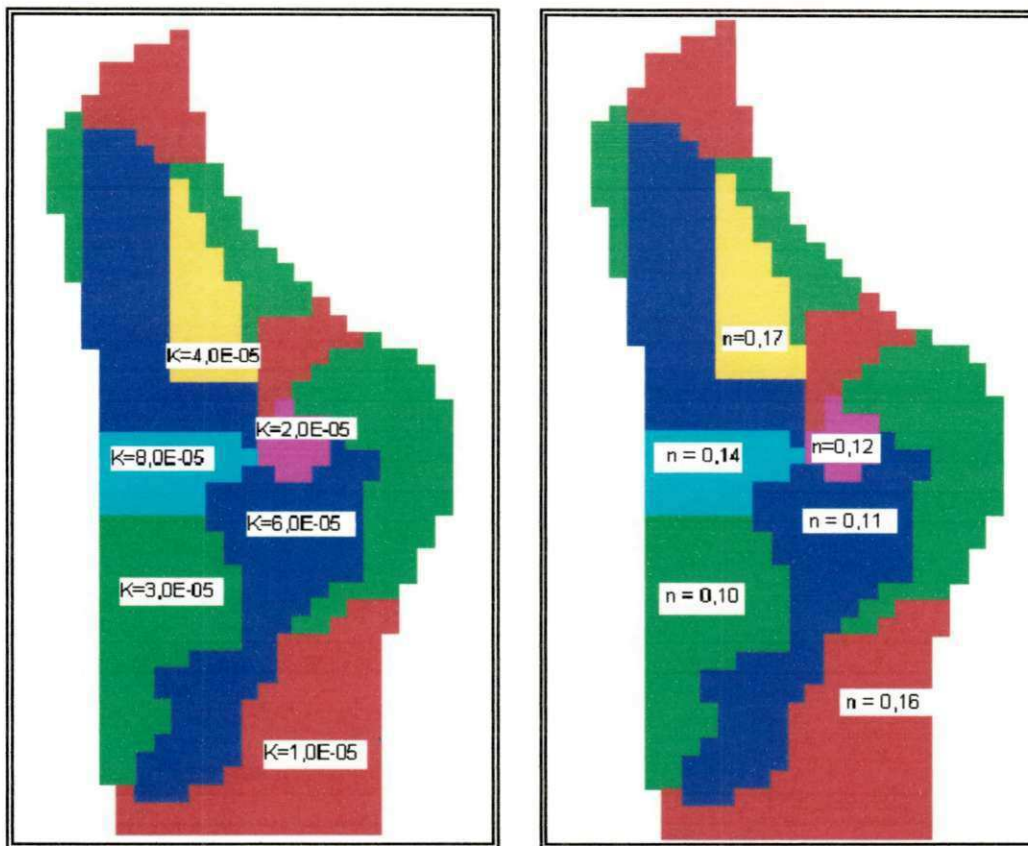


Figura 4.4 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica e porosidade efetiva.
Fonte: Rufino (2004).

4.3.1.2 Profundidade do Aquífero

As medições dos níveis do aquífero foram feitas mediante a perfuração de aproximadamente 82 poços de sondagens, transformados em piezômetros, onde periodicamente foram colhidos valores do nível de água. As sondagens atingiram níveis que variaram entre 2,00 e 6,00 metros de profundidade, todos atingindo um mínimo de 1,50 metros abaixo do nível freático, não havendo necessidade de sondagens mais profundas, já que a litologia da região apresenta características aproximadamente uniformes, com material arenoso fino a médio.

Os estudos realizados pela UFPB contemplaram duas campanhas de medições, sendo a primeira compreendida no período de novembro de 1998 a julho de 1999 e a segunda de

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

novembro de 2001 a dezembro de 2002. As Tabelas 1 e 2 (Anexos 1 e 2) apresentam esses valores. Para a calibração do modelo foram utilizados apenas os dados da primeira campanha de medições (Tabela 1 do Anexo 1).

Como pode ser observado nas Tabelas 1 e 2 (Anexos 1 e 2), o mês de maio de 1999 teve o monitoramento mais completo, motivo pelo qual o modelo foi calibrado no regime permanente, ou seja, para um único período, obtendo-se a distribuição da condutividade hidráulica horizontal que melhor representasse as características do solo. Após obter uma calibração satisfatória para este período (maio de 1999), o modelo foi então calibrado para o mês inicial da campanha de medição (novembro de 1998) mantendo a condutividade hidráulica e ajustando as cargas hidráulicas fixas.

A Figura 4.5 apresenta a distribuição espacial dos piezômetros na área de estudo, bem como as isolinhas potenciais referentes às medições de maio de 1999, utilizadas nesta pesquisa.

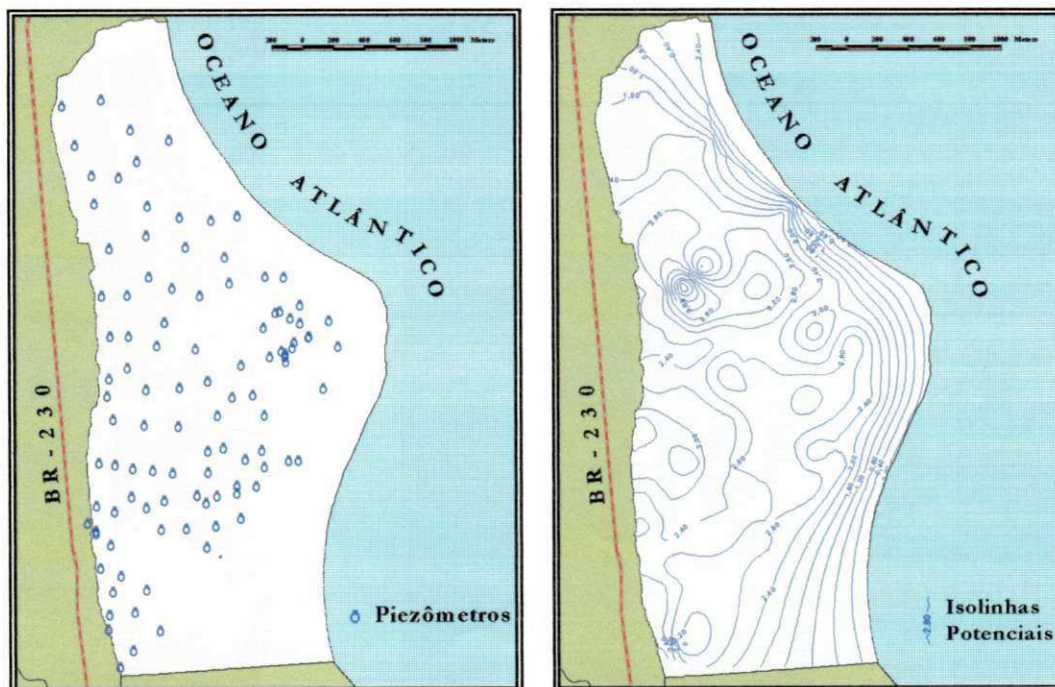


Figura 4.5 – Distribuição espacial dos piezômetros e isolinhas potenciais (maio de 1999). Fonte: Rufino (2004).

4.3.1.3 Uso do Solo

A identificação do uso do solo urbano foi obtida e adaptada através de Rufino (2004) com o auxílio do ArcView (SIG) Figuras 4.6 e 4.7.

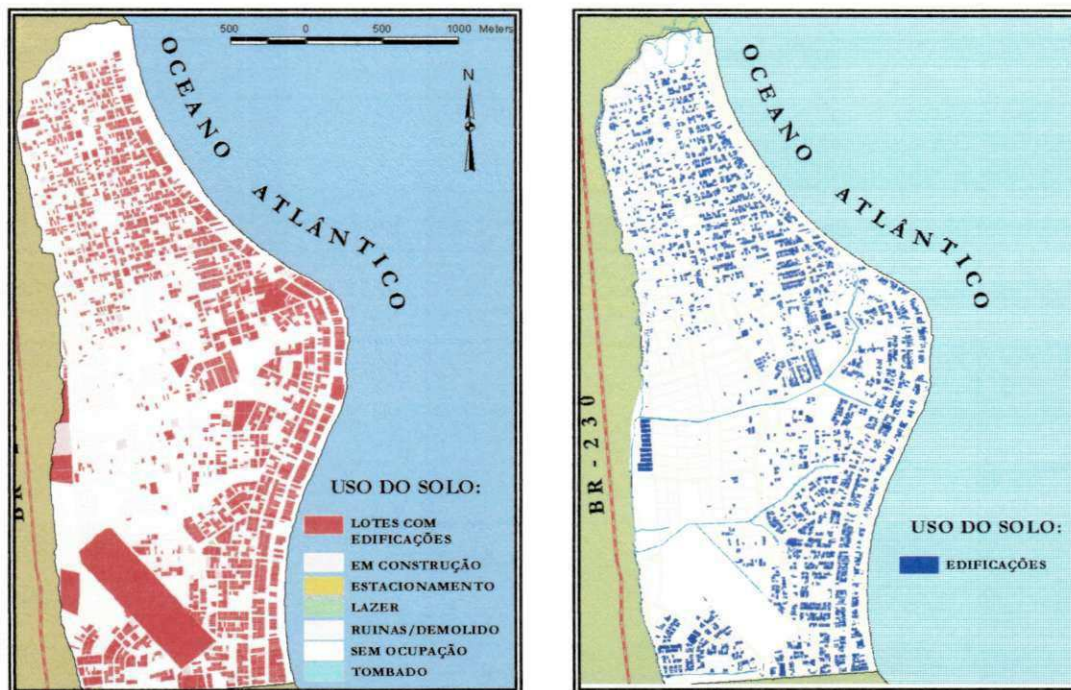


Figura 4.6 – Uso do solo no bairro Bessa.
Fonte: SEPLAN (2000), apud Rufino (2004).

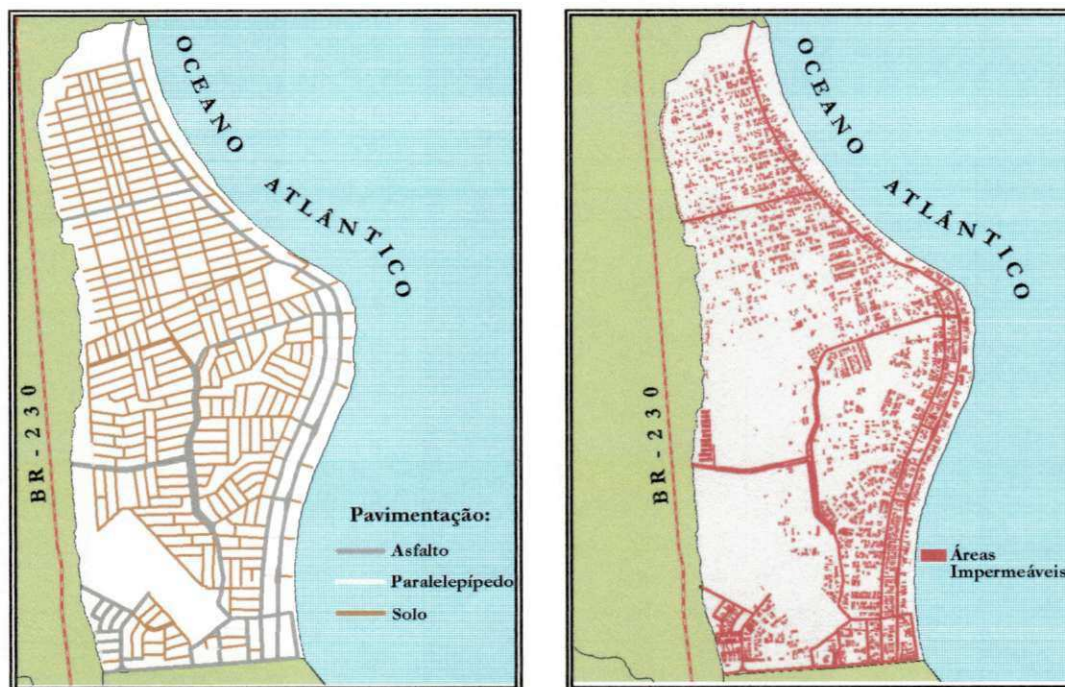


Figura 4.7 – Vias de acesso e permeabilidade do bairro Bessa.
Fonte: Rufino (2004).

Para iniciar o cálculo, utilizando-se o Modelo de Fluxo Subterrâneo, assumem-se para todas as células da malha os respectivos valores diários de recarga, calculados através do Modelo de Balanço Hídrico do Solo. Além disso, verificou-se a compatibilidade dos formatos de entrada dos dados entre o ArcView (SIG) e o MODFLOW para evitar problemas na implementação. Com a entrada compatível dos valores de recarga, foram obtidos os níveis piezométricos referentes aos valores diários da recarga distribuída.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 OBTENÇÃO DOS VALORES DE CN

Foram obtidos os valores de CN (Tucci, 2004) a partir de operações de análise espacial utilizando-se Sistema de Informação Geográfica (SIG) no tratamento das informações espacializadas do bairro. Através dos recursos disponíveis no SIG, os lotes com ocupação comprovada no cadastro oficial da Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP), disponível em Rufino (2004), foram agrupados de acordo com a sua área e a estes atribuídos seus respectivos valores de CN, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de CN para os lotes ocupados nos bairros.

Quantidade de lotes encontrada	CN atribuído	Área máxima dos lotes
1983	77	<500
775	61	500 < L <1000
131	57	1000 < L <1300
103	54	1300 < L <2000
84	51	2000 < L <4000

Quanto às vias de acesso, o cadastro multifinalitário da PMJP as classifica como solo, paralelepípedo e asfalto. Deste modo usando a metodologia de Tucci (2004) e os recursos do SIG, as vias foram agrupadas segundo a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de CN para as vias de acesso nos bairros.

Quantidade de vias	Tipo de vias	CN atribuído
50	Asfalto	98
12	Paralelepípedo	76
237	Solo	72

A área referente às vias de acesso foi estimada a partir da sua extensão em metros e de uma largura atribuída de acordo com o tipo de pavimentação (larguras padrões de vias em áreas urbanas) já que no ambiente SIG estas vias são representadas costumeiramente por linhas e no cadastro oficial da PMJP não há um valor estimado para estas áreas.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

Para toda a área restante do bairro (lotes desocupados, áreas verdes, áreas de mangue, aeroclube, canteiros, etc.) o valor de CN considerado foi de 39 (Tabela 4.1, Capítulo IV). Esta área pode ser observada a partir da Figura 5.1. Cabe ressaltar que todos os dados são referentes a uma situação de ocupação observada em 2000 (data da coleta dos dados de uso por uma equipe da PMJP) e devido à dinâmica urbana, estas condições podem se apresentar de forma bastante variada. O cálculo desta área foi obtido pela diferença entre a área total dos bairros (calculada pelo SIG) e as áreas ocupadas por lotes e vias de acesso.



Figura 5.1 – Ocupação urbana e valores de CN do bairro Bessa.

A Figura 5.2 mostra um esquema da sobreposição do mapa com os valores de CN. A espacialização dos dados urbanos da área se deu através do SIG, que possibilitou o cálculo das áreas, utilizando os valores sugeridos por Tucci (2004) de acordo com o tipo do solo e suas respectivas ocupações.

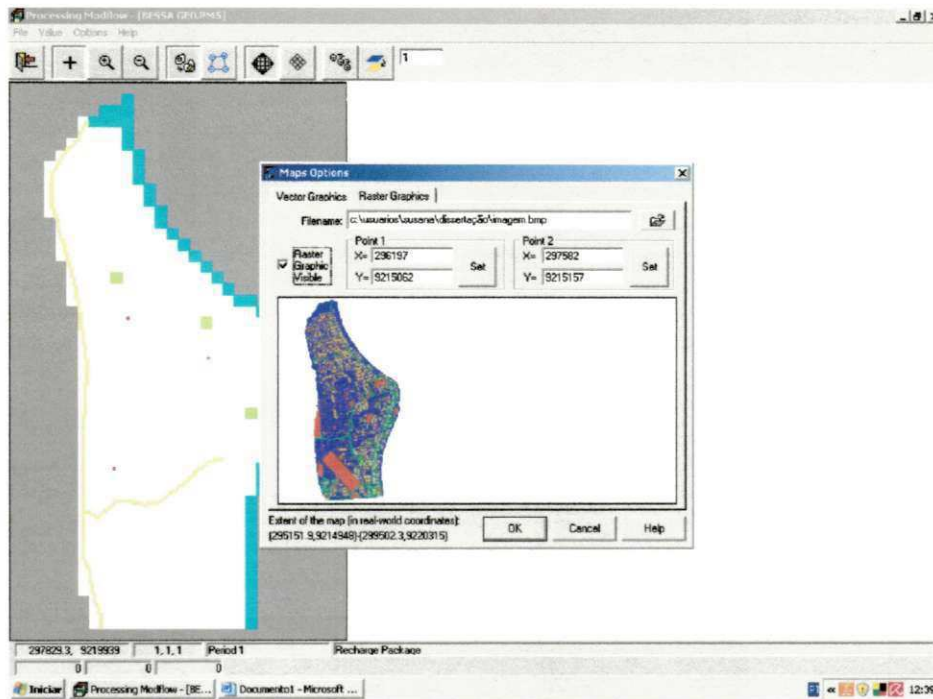


Figura 5.2 – Processo de sobreposição de mapas.

5.2 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE BALANÇO HÍDRICO

Para implementação do Modelo Hidrológico de Balanço Hídrico foi necessário se fazer um levantamento da espacialização da área de estudo, considerando-se a ocupação do solo. Para tanto, utilizou-se o banco de dados cadastrais da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de João Pessoa, mapas fornecidos pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado, teses e dissertações desenvolvidas com dados gerados sobre a área e dados referentes a sondagens levantados em campo pela UFPB/ATECEL (1999). De posse desse banco de dados e com o auxílio da ferramenta SIG foi possível a classificação da ocupação espacial do bairro.

O SIG permitiu a identificação dos lotes ocupados de acordo com a sua área máxima. As vias de acesso também foram divididas em tipologias (asfalto, paralelepípedo e solo) estimadas a partir da sua extensão em metros e de uma largura atribuída de acordo com o tipo de pavimentação (larguras padrões de vias em áreas urbanas) já que no ambiente SIG

estas vias são representadas costumeiramente por linhas e no cadastro oficial da PMJP não há um valor estimado para estas áreas e o restante da área considerou-se como lotes desocupados, como pode ser observado nas Tabelas 5.1 e 5.2 do item anterior. Essa espacialização possibilitou uma análise distribuída da capacidade de infiltração da água no solo, necessária à aplicação do modelo.

Simultaneamente, considerou-se o tipo de solo (arenoso profundo com pouco silte e argila, produzindo baixo escoamento superficial e alta infiltração) e seus respectivos parâmetros, como a capacidade de campo e o tempo de murcha permanente, que têm influência direta na capacidade de armazenamento de água no solo.

A Figura 5.3 mostra o funcionamento do balanço hídrico, simulado em plataforma Excel, ocorrido diariamente, avaliando-se tanto os dias em que houve precipitação, como também os dias de estiagem no cálculo da recarga do aquífero da área estudada para um período compreendido entre novembro de 1998 e julho de 1999.

De posse das informações relativas ao tipo e uso do solo e com base no modelo SCS, foram considerados nove tipos diferentes de CN.

Para cada valor de CN, confeccionou-se uma planilha no qual o funcionamento está especificado no item 4.2 do Capítulo IV, sendo os resultados obtidos referentes aos valores diários de recarga do aquífero subterrâneo, indicados como Dp.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

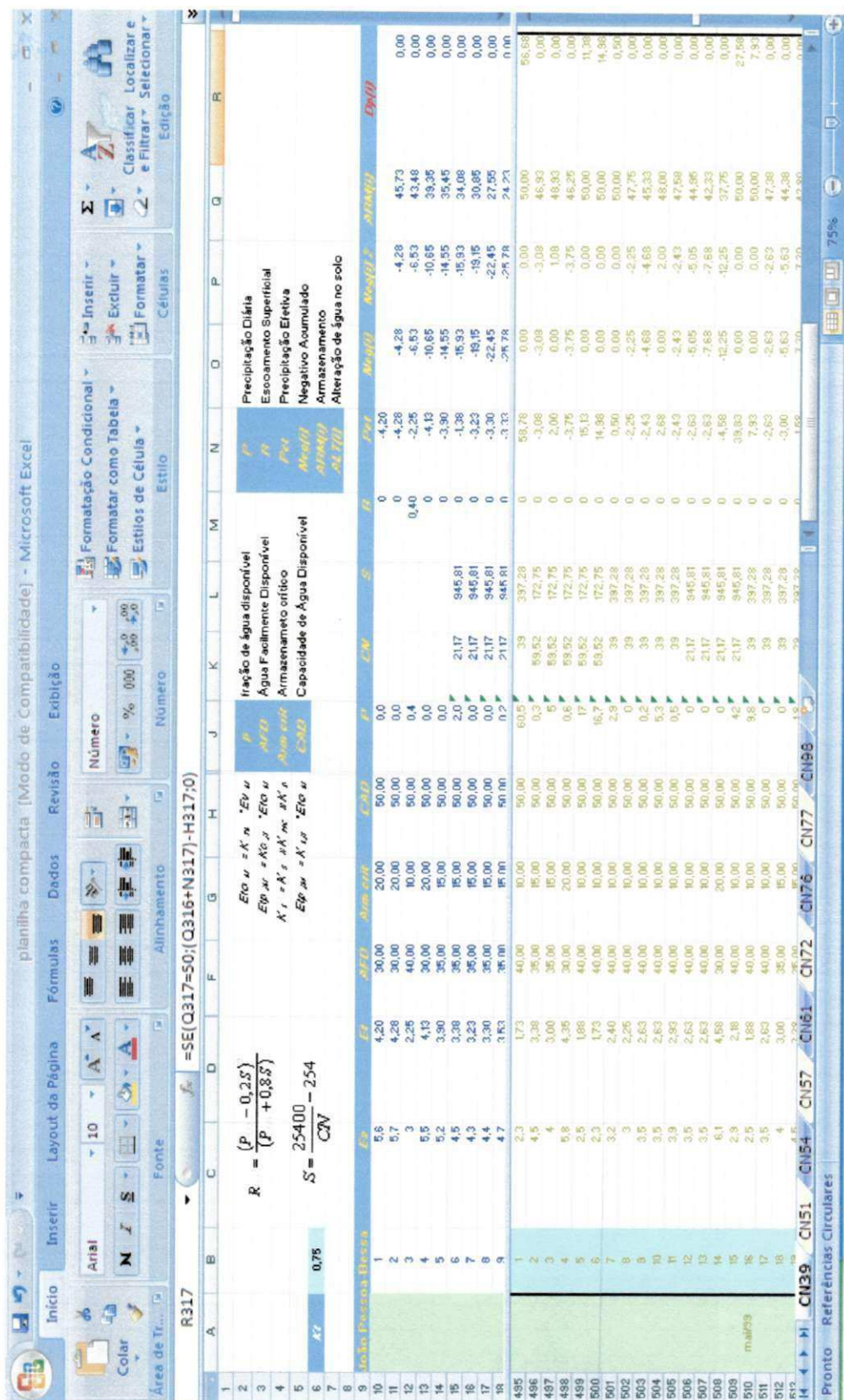


Figura 5.3 – Funcionamento do modelo de balanço hídrico.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

Das figuras 5.4 a 5.12 estão representadas graficamente a ocorrência de recarga ao longo do período estudado (novembro de 1998 a julho de 1999).

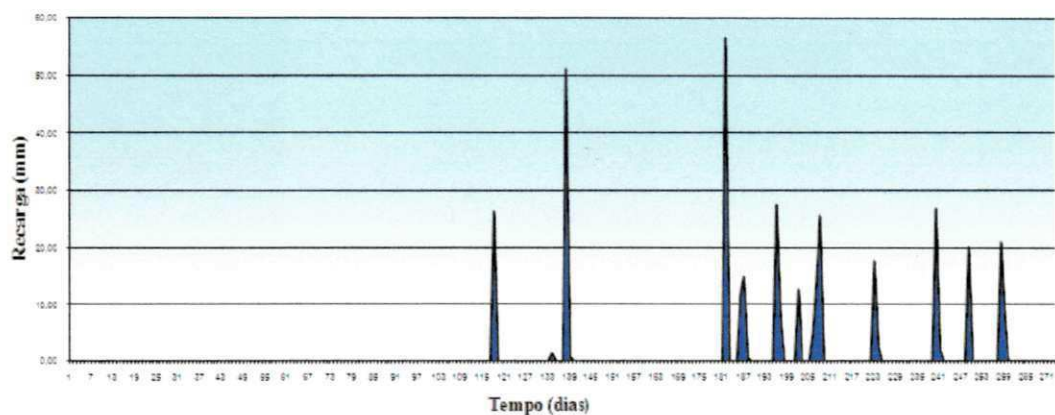


Figura 5.4 – Recarga do CN 39, período de Nov/1998 a jul/1999.

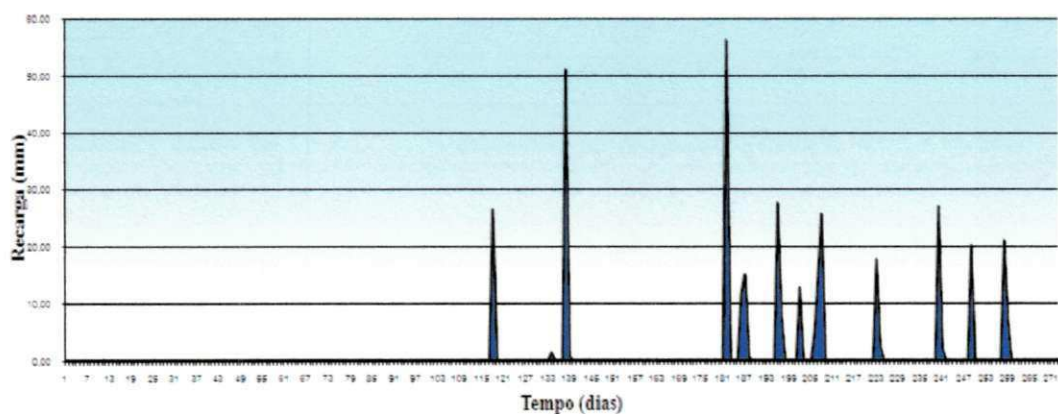


Figura 5.5 – Recarga do CN 51, período de Nov/1998 a jul/1999.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

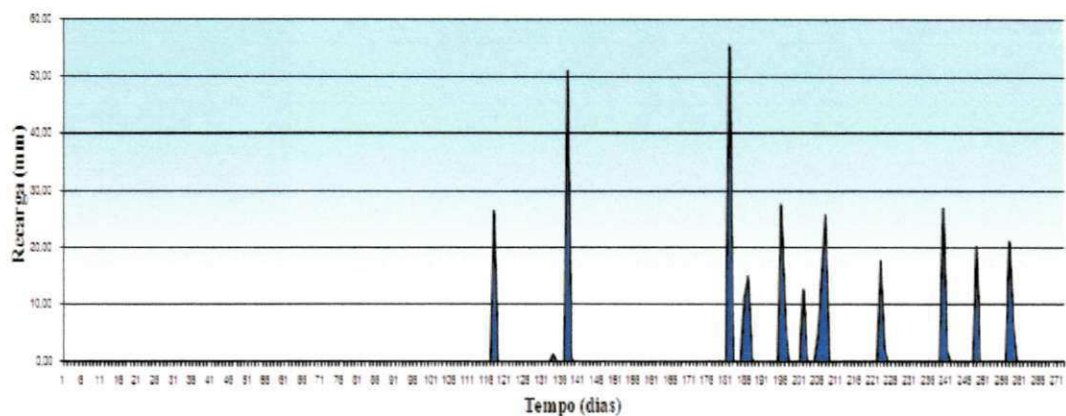


Figura 5.6 – Recarga do CN 54, período de Nov/1998 a jul/1999.

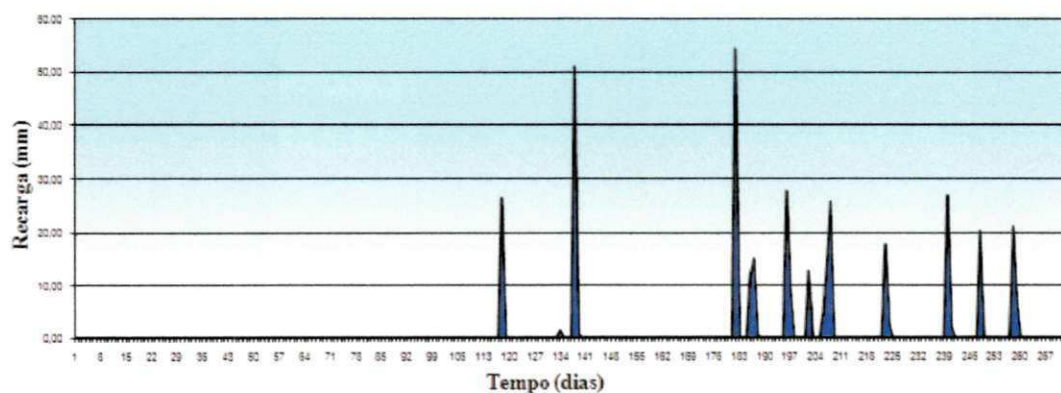


Figura 5.7 – Recarga do CN 57, período de Nov/1998 a jul/1999.

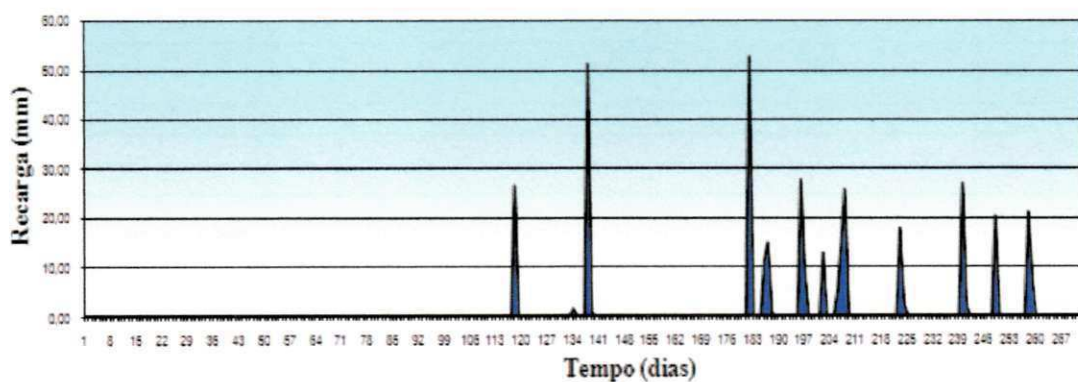


Figura 5.8 – Recarga do CN 61, período de Nov/1998 a jul/1999.

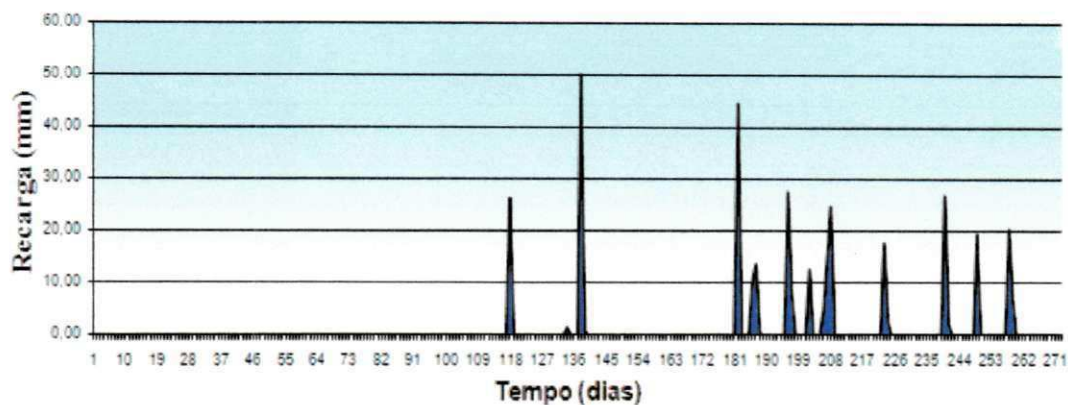


Figura 5.9 – Recarga do CN 72, período de Nov/1998 a jul/1999.

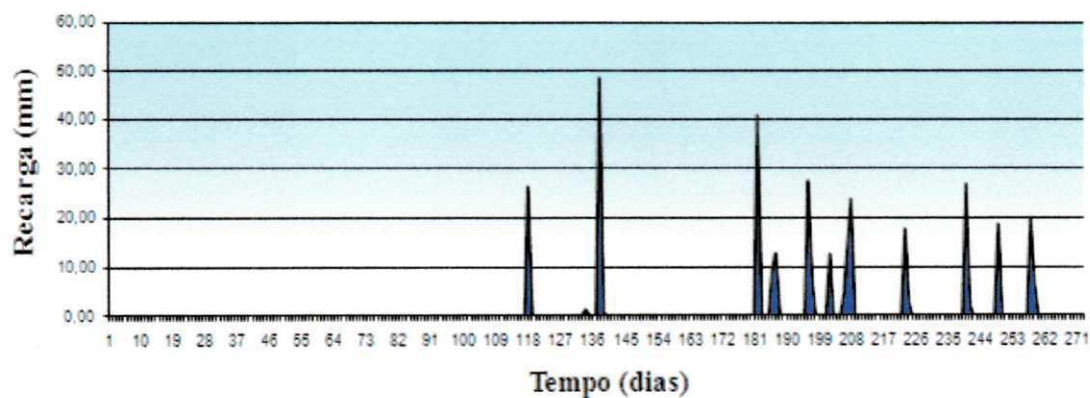


Figura 5.10 – Recarga do CN 76, período de Nov/1998 a jul/1999.

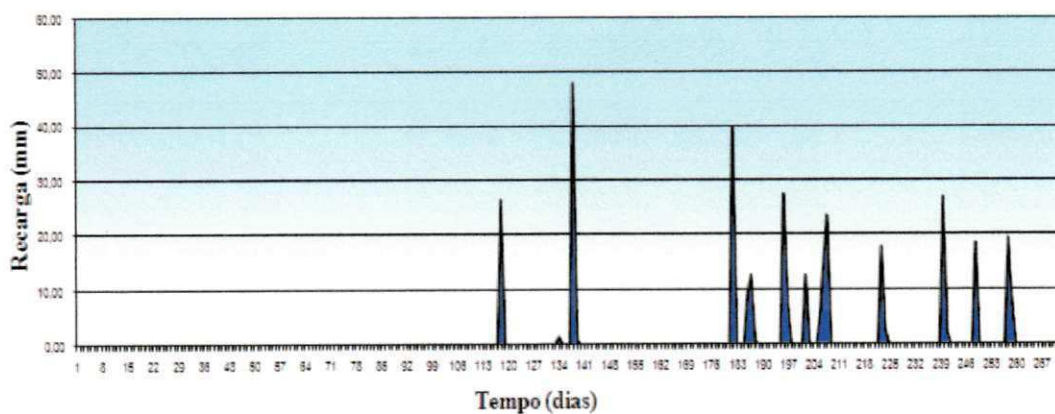


Figura 5.11 – Recarga do CN 77, período de Nov/1998 a jul/1999.

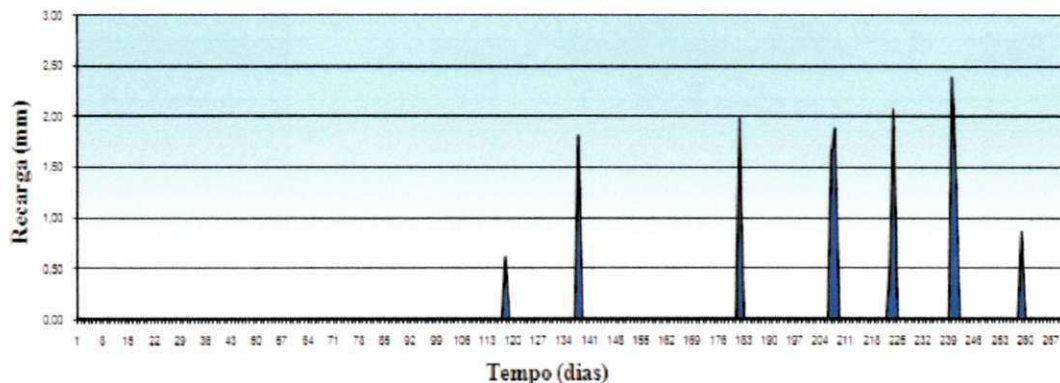


Figura 5.12 – Recarga do CN 98, período de Nov/1998 a jul/1999.

Pode-se observar que os resultados são semelhantes para quase todos os CN's, com exceção do CN 98 por se tratar de áreas consideradas como vias de acesso asfaltadas.

Isto significa que para esse uso (CN 98) verifica-se uma permeabilidade mínima e, portanto, baixíssima infiltração. Os demais CN's apresentam pouca variação com relação ao uso do solo (Tabela 4.1), como é o caso do CN's 39 a 61 e 72 a 77, o que justifica a ocorrência de valores de recarga equivalentes.

Observou-se ainda que em grande parte do período considerado os valores de recarga foram nulos devido ao baixo índice de precipitação. O primeiro valor gerado de recarga (26,43 mm) refere-se à chuva ocorrida no 117º dia do período analisado, dia 26 de fevereiro de 1999, que foi de 37,40 mm, somada aos valores acumulados dos cinco dias anteriores, comprovando que o modelo considera a umidade antecedente. Os meses que apresentaram recarga foram os compreendidos entre fevereiro e julho de 1999, período caracterizado como chuvoso. Os gráficos das Figuras 5.13 a 5.21 apresentam uma relação da Precipitação x Recarga ao longo do período estudado.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

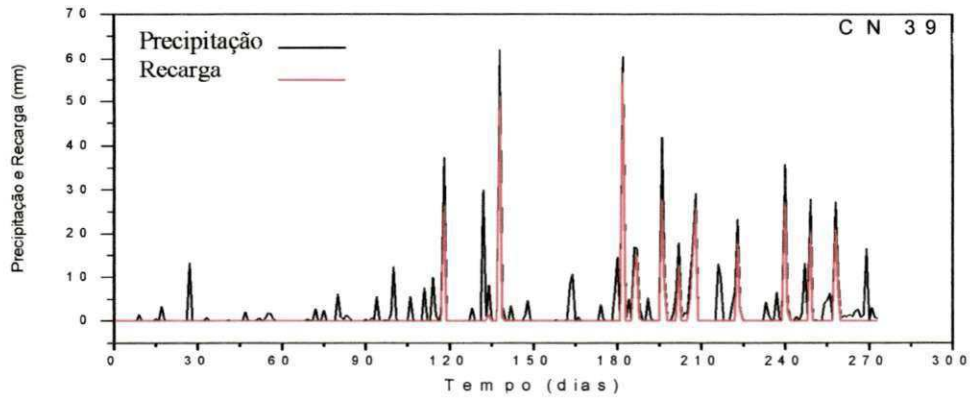


Figura 5.13 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 39.

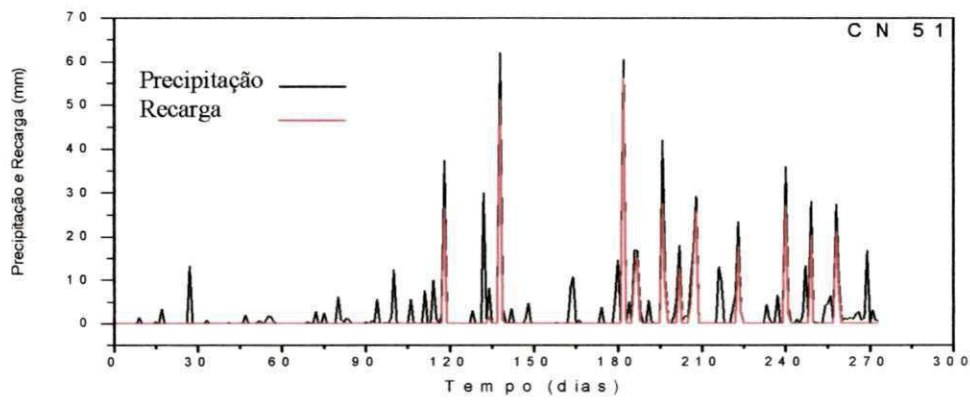


Figura 5.14 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 51.

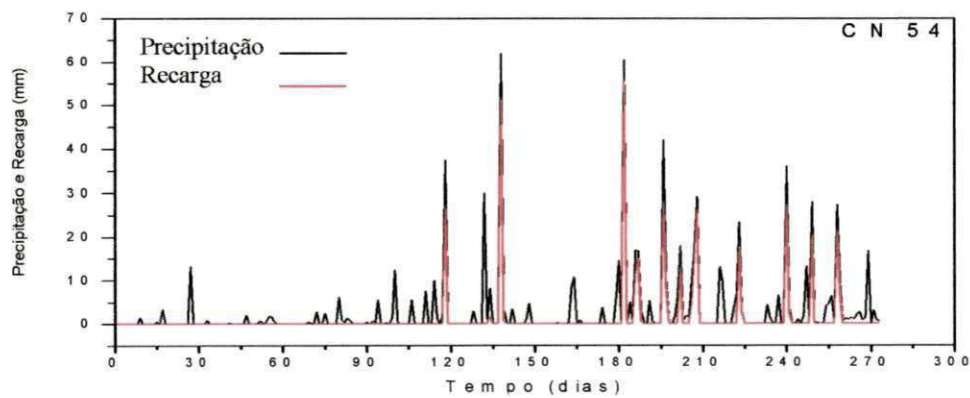


Figura 5.15 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 54.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

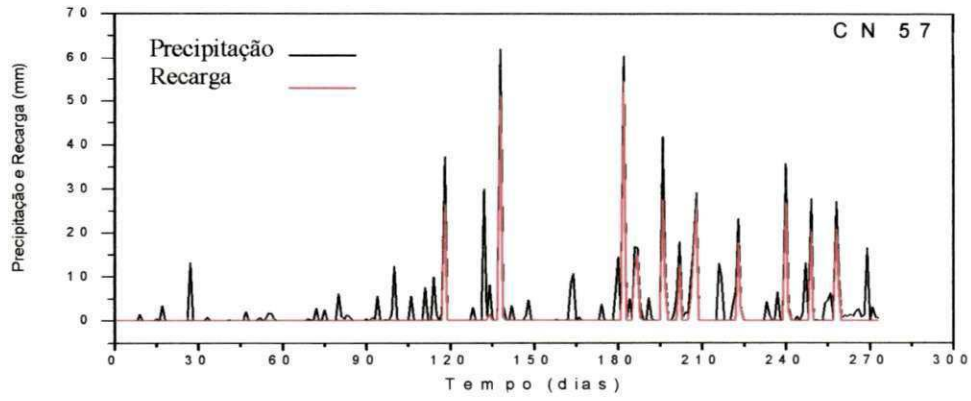


Figura 5.16 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 57.

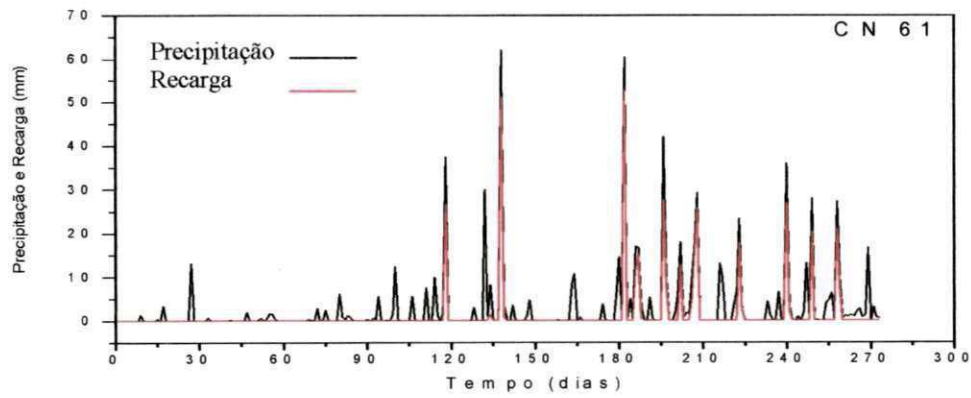


Figura 5.17 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 61.

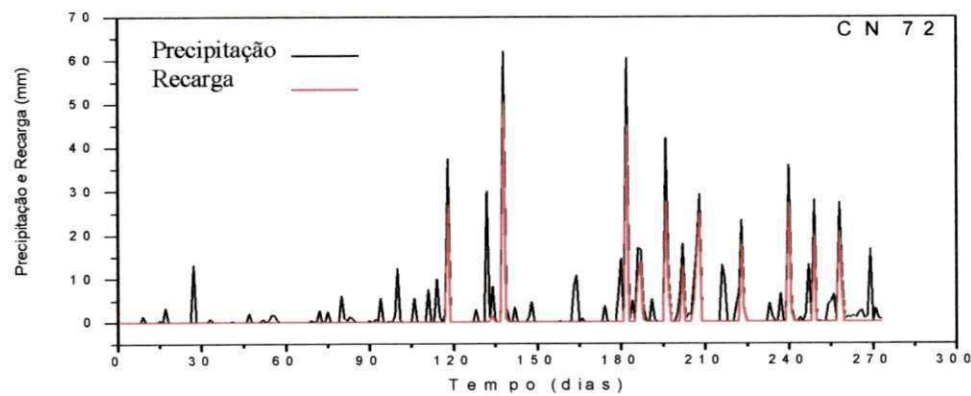


Figura 5.18 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 72.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

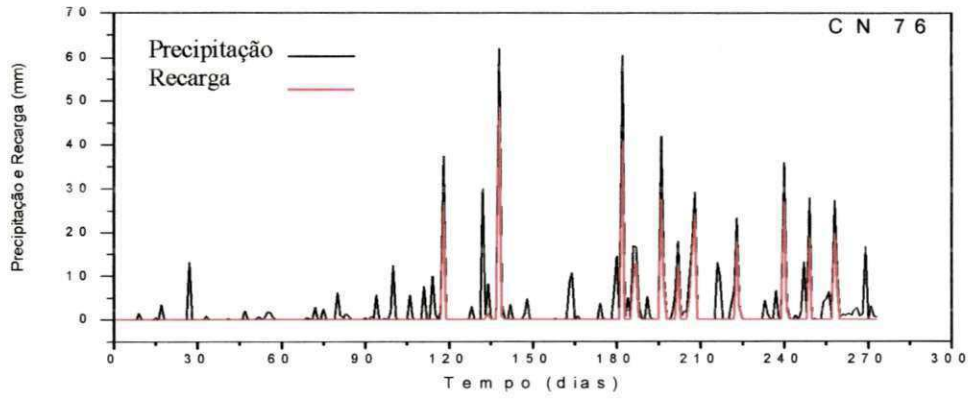


Figura 5.19 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 76.

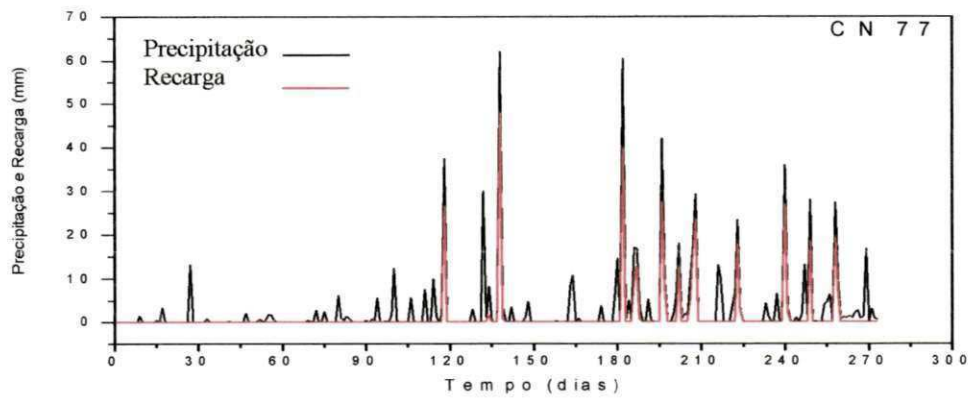


Figura 5.20 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 77.

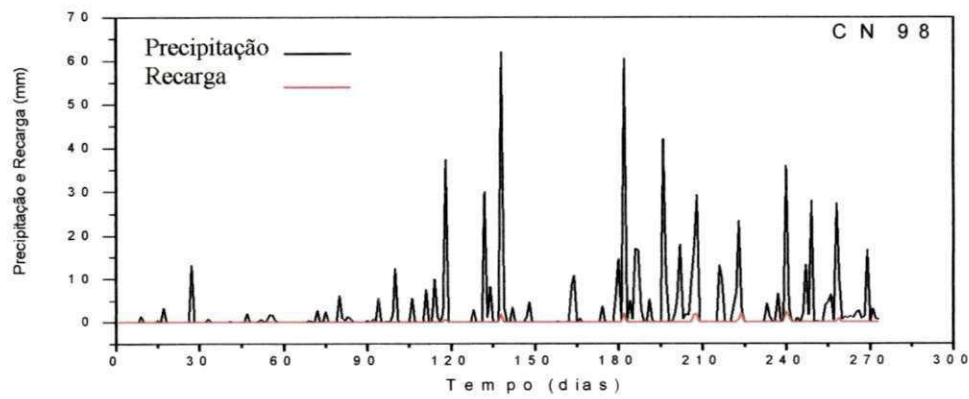


Figura 5.21 – Precipitação x Recarga ao longo do tempo, para o CN 98.

De maneira análoga, observa-se que o CN 98 é o único resultado que apresenta alterações em seus valores, pelo mesmo motivo já explicado anteriormente. A Figura 5.21 representa claramente a diferença entre a precipitação e a recarga nesse caso.

Por fim, com os valores estimados da recarga através do Modelo de Balanço Hídrico do Solo, puderam-se introduzir os referidos resultados em um Modelo de Fluxo Subterrâneo (MODFLOW) permitindo analisar o comportamento do aquífero, através da representação dos níveis piezométricos.

5.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

Como foi dito no Capítulo IV, item 4.3, utilizou-se um modelo de fluxo subterrâneo georreferenciado com as coordenadas geográficas da região de estudo para simulação dos níveis piezométricos referentes à recarga estimada através do Modelo distribuído de Balanço Hídrico do Solo. O processo numérico considerou os valores de CN atribuídos célula a célula, pela sobreposição do mapa com os dados referentes ao tipo e uso do solo, confeccionado a partir do SIG, ao mapa do aquífero, ambos georreferenciados, como mostra a Figura 5.22.

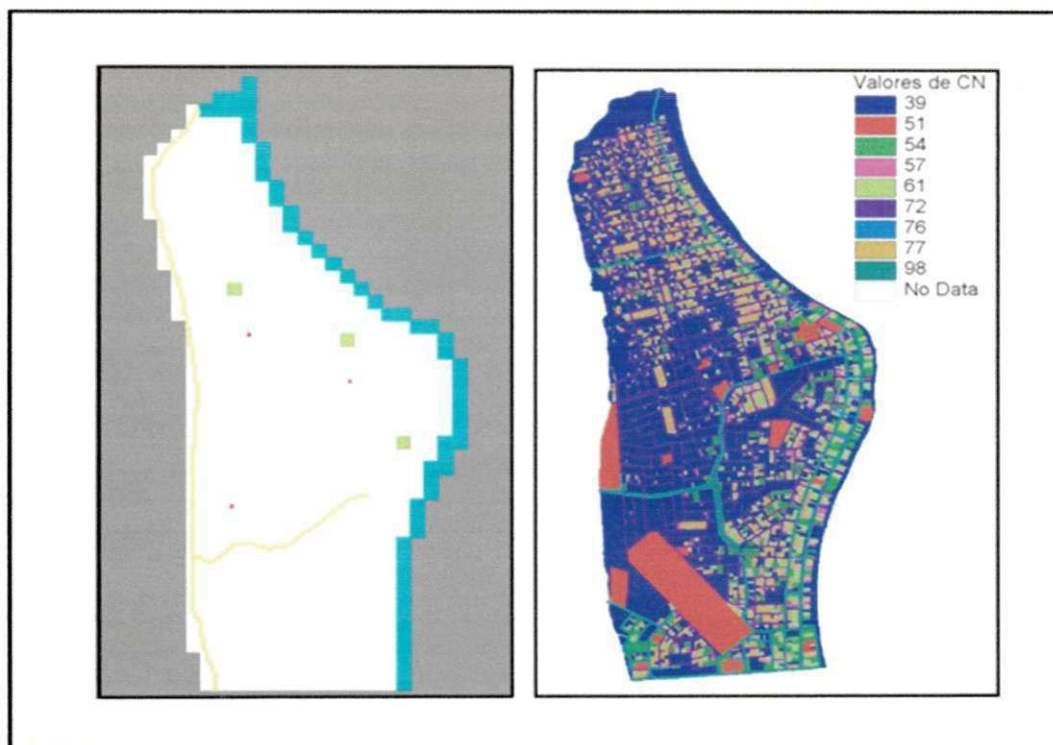


Figura 5.22 – Mapas georreferenciados: aquífero e espacialização do Bessa.

A Figura 5.2, citada anteriormente, mostra um esquema da sobreposição dos mapas feita no sistema computacional MODFLOW. Esse processo permitiu a simulação do comportamento do aquífero, para a área do Bessa em escala diária. Os pontos destacados (quadrados verdes) na Figura 5.22 caracterizam uma condição de contorno que limita o nível piezométrico entre 2,3m e 2,8m, aproximadamente. Essa condição de contorno foi utilizada na calibração do modelo.

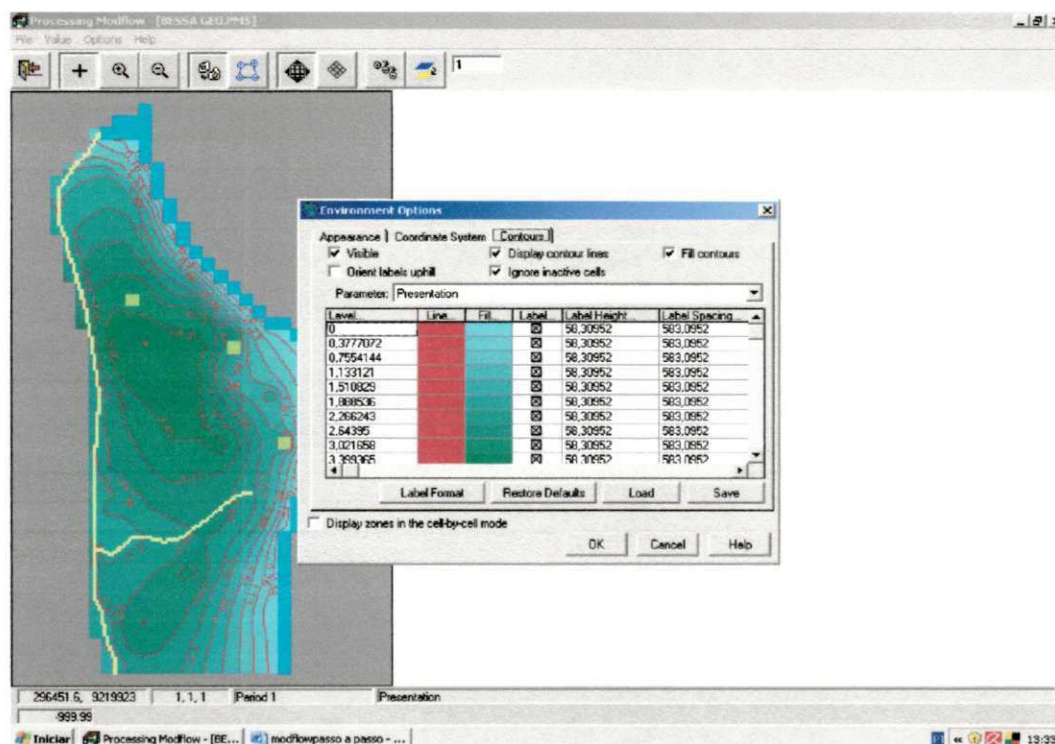


Figura 5.23 – Geração dos níveis piezométricos – MODFLOW.

Os níveis, considerados nesse trabalho como “Níveis Calculados”, serviram como parâmetro de comparação com os níveis considerados como “Níveis Observados”, fornecidos pela UFPB/ATECEL (1999), obtidos através de seis campanhas de medição ocorridas nos seguintes períodos: novembro de 1998, fevereiro de 1999, março de 1999, maio de 1999, junho de 1999 e julho de 1999, como mostrados.

As Figuras 5.24 e 5.25 mostram o comportamento dos níveis piezométricos durante as medições de fevereiro, março, maio e junho de 1999 e a Figura 5.26, a localização dos poços de sondagem. Consta no quarto relatório parcial do estudo desenvolvido pela UFPB/ATECEL, o resultado observado na parte superior do mapa que indica alterações significativas na sua configuração, provavelmente pela influência da proximidade ao oceano e ao rio morto. Nesse trecho confirma-se a existência de uma grande concentração em torno do piezômetro 65, cuja causa mais provável possa ser um bombeamento. O

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

relatório enfatiza ainda que na parte inferior, ao contrário, essas alterações se traduziram, principalmente, pela elevação do nível do lençol freático nos piezômetros 11, 13, 15, 16, 31, 32, 33 e 72 e, também nos piezômetros 1, 2 e 3, devido à proximidade dos canais.



Figura 5.24 – Níveis piezométricos referentes às medições de fevereiro e março de 1999.

Fonte: UFPB/ATECEL (1999).

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

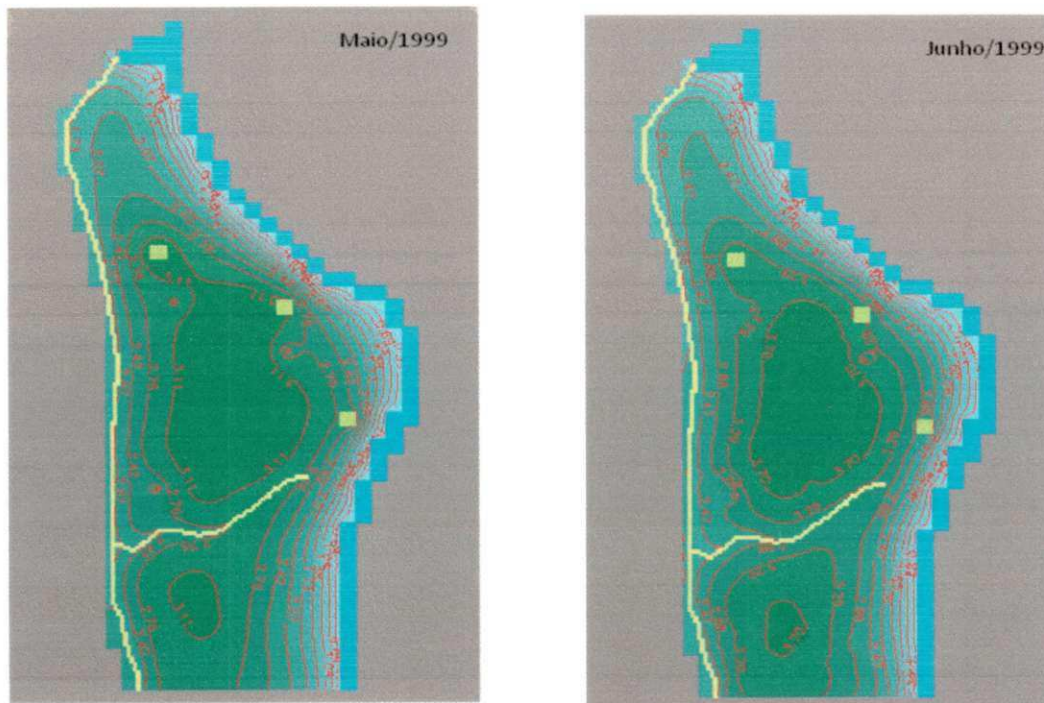


Figura 5.25 – Níveis piezométricos referentes às medições de maio e junho de 1999.
Fonte: UFPB/ATECEL (1999).

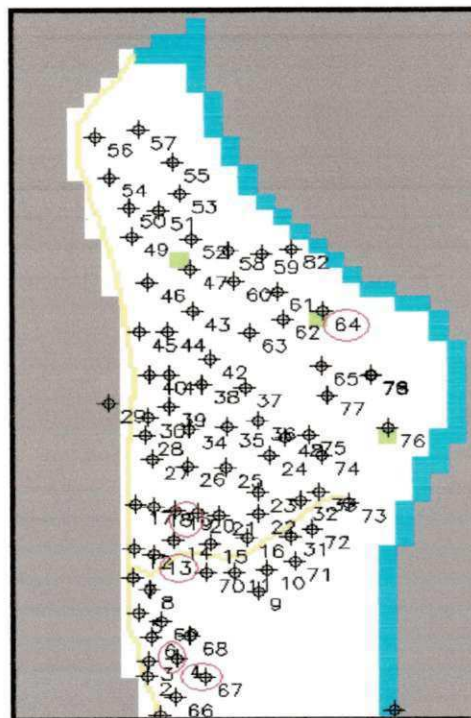


Figura 5.26 – Localização dos poços de sondagem.
Fonte: UFPB/ATECEL (1999).

5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a validação do Modelo de Estimativa da Recarga, fez-se uma comparação entre os níveis piezométricos obtidos com a simulação do Modelo Distribuído de Balanço Hídrico e os níveis obtidos através do MODFLOW pelo estudo da UFPB/ATECEL. Os gráficos de comparação entre os “Níveis Calculados” e os “Níveis Observados” podem ser vistos na seqüência de Figuras 5.27 a 5.31.

A escolha dos piezômetros para comparação dos níveis se deu em função das zonas críticas, já comentadas anteriormente, tendo em vista que nas demais zonas o comportamento do aquífero apresenta poucas variações. Os poços utilizados para a validação do modelo foram os de número 04, 06, 13, 18 e 64, destacados na Figura 5.26. Observa-se, pelos gráficos, que os resultados foram satisfatórios, onde a diferença de cota piezométrica entre os níveis calculados e os observados varia entre 0,02 a 0,92 metros. O piezômetro 64 no estudo da UFPB/ATECEL (1999) também apresentou comportamento anômalo, cujas causas não puderam ser diagnosticadas.

Como o período utilizado pelo Modelo de Fluxo Subterrâneo é mensal, considerando-se 5 (cinco) meses e o período utilizado para o Modelo de Balanço Hídrico do solo é diário, com total de 270 dias, verifica-se uma instabilidade no comportamento dos gráficos, a partir do 180º dia, que apresentam picos correspondentes às chuvas. Porém, este fato não altera os resultados obtidos com o Modelo de Balanço Hídrico que são considerados satisfatórios, o que torna o Modelo adequado para representar a recarga do aquífero na área de estudo.

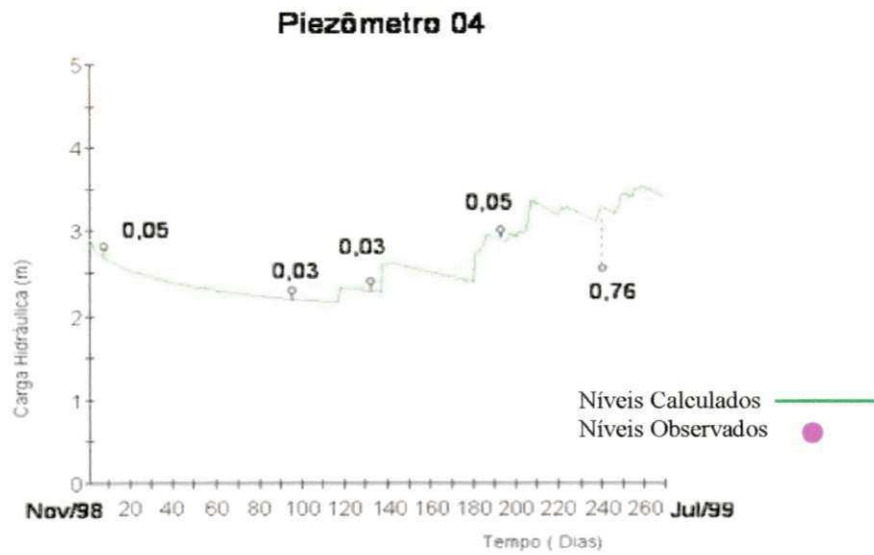


Figura 5.27 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 04 (m).

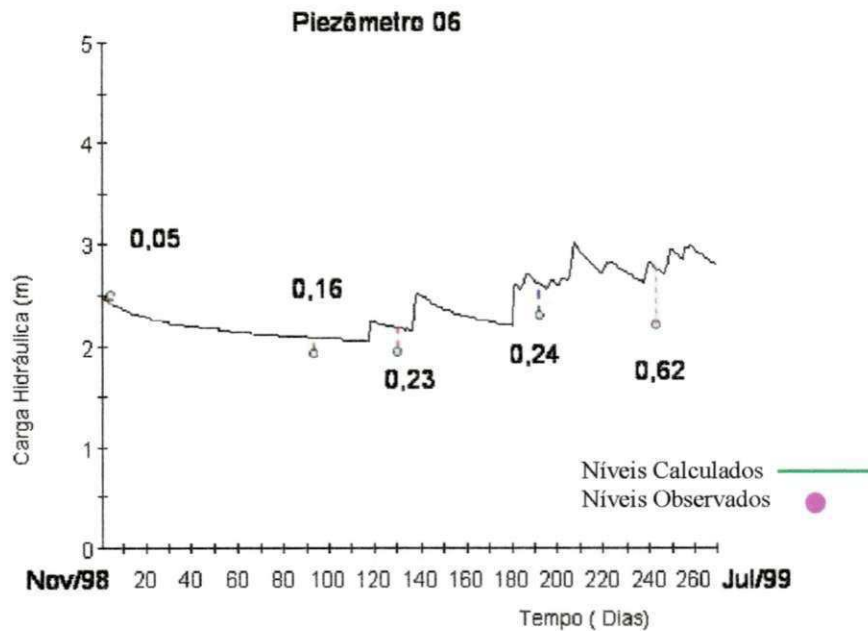


Figura 5.28 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 06 (m).

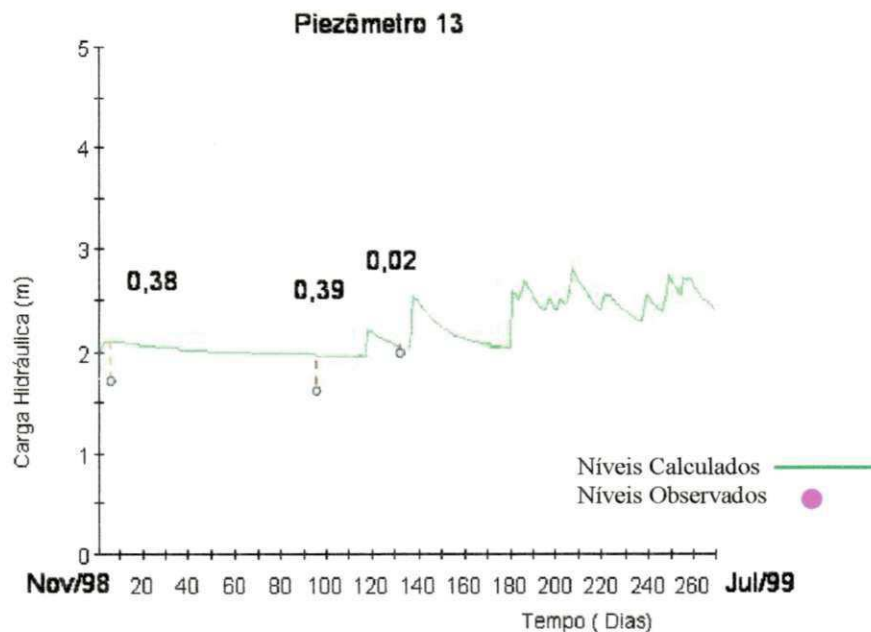


Figura 5.29 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 13 (m).

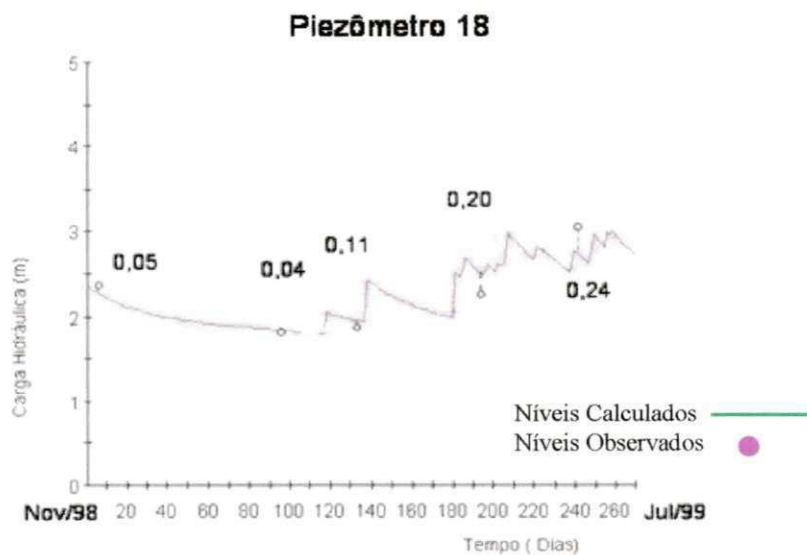


Figura 5.30 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 18 (m).

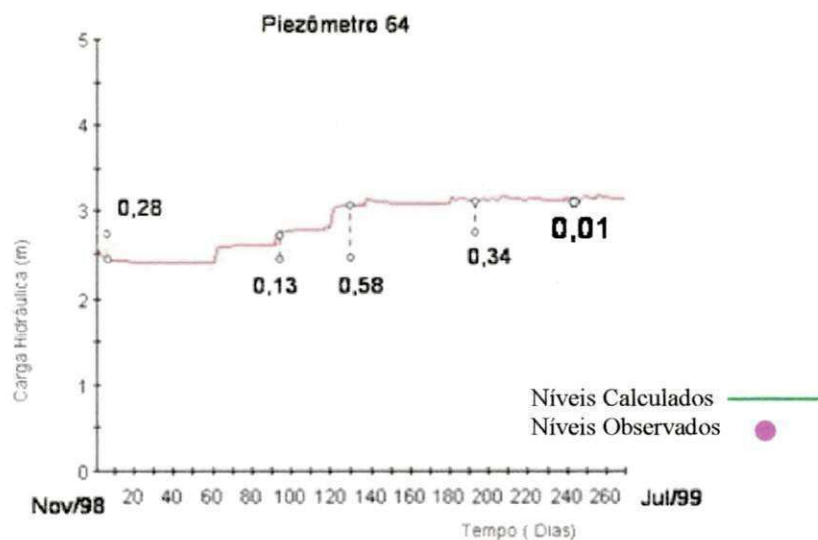


Figura 5.31 – Diferença entre cotas piezométricas calculadas e observadas do piez. 64 (m).

Os mapas dos níveis observados e calculados são apresentados na Figura 5.32, respectivamente, para a campanha de medição realizada em maio de 1999. Esta campanha é considerada a de dados observados mais confiáveis, sendo também utilizada no trabalho de Rufino (2004). Pode-se observar, comparando os dois mapas, que os níveis espacializados apresentam semelhanças nos valores dos níveis piezométricos, o que favorece a validação do modelo.

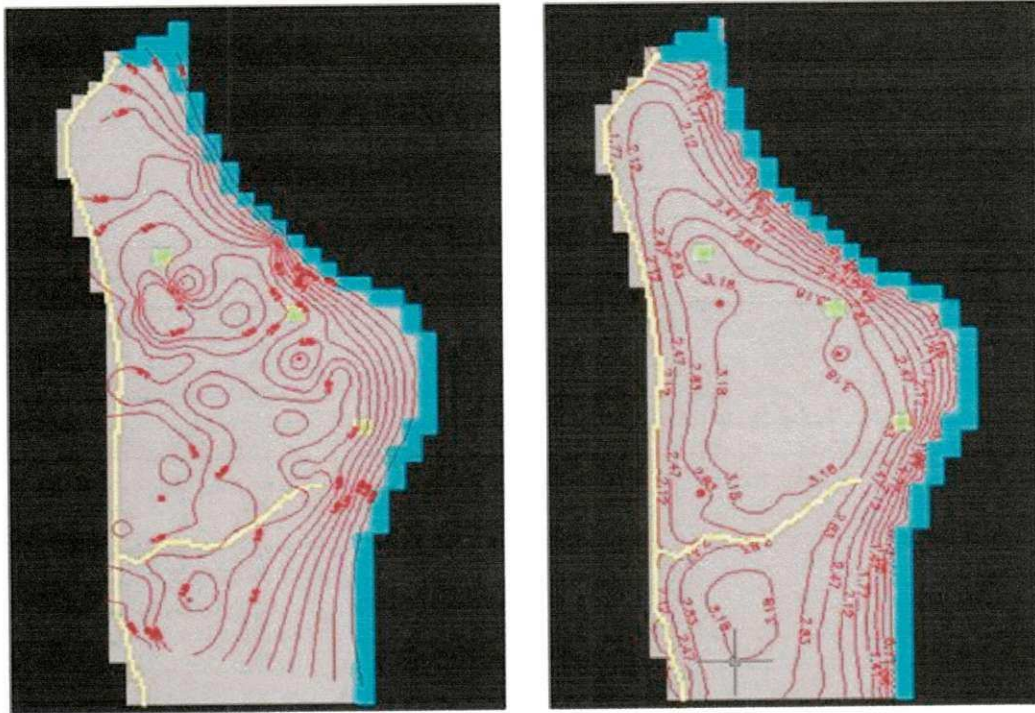


Figura 5.32 – Mapa de comparação dos níveis piezométricos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho objetivou a implementação de um modelo de balanço hídrico capaz de estimar a recarga do aquífero em uma área urbana costeira para subsidiar a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, tendo como desafios:

- Parametrizar um modelo distribuído de balanço hídrico a nível de solo, para cálculo da recarga, utilizando dados cadastrais da Prefeitura Municipal, sondagens do solo e dados pluviométricos do local;
- Integrar os resultados da recarga distribuída a um modelo de fluxo subterrâneo;
- Validar o modelo de recarga através da comparação entre os níveis piezométricos do aquífero calculados pelo modelo e os níveis gerados a partir da observação em campo.

Estes desafios foram superados e os resultados das simulações indicam que o modelo de balanço hídrico e sua parametrização são adequados para representar a recarga do aquífero. Conclui-se, portanto, que o conjunto de modelos, nele incluso o de recarga implementado nesse trabalho, podem ser utilizados operacionalmente para dar suporte à gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas na área de estudo.

Diante dos resultados obtidos pode-se afirmar que, através da estimativa da recarga e das previsões meteorológicas, é possível que se faça uma exploração controlada e monitorada do aquífero freático através da captação de água por poços, auxiliando para que o bombeamento, em pontos considerados estratégicos, possa ajudar a rebaixar o nível do lençol freático e controlar inundações e alagamentos, sem que haja risco de escassez do recurso subterrâneo, nem ocorrência de intrusão salina. É importante ressaltar que as decisões a serem tomadas para uma efetiva gestão dos recursos hídricos em áreas costeiras devem considerar aspectos inerentes às águas superficiais e subterrâneas, de forma que se

faça um manejo integrado e gerenciado desses recursos, pois existe uma forte interligação entre ambas. As águas superficiais podem se transformar em águas subterrâneas através de infiltração, percolação e recarga e as águas subterrâneas, por sua vez, podem se transformar em águas superficiais pela descarga de base dos corpos hídricos. Portanto, os problemas de planejamento e gestão dos recursos hídricos precisam ser analisados e destacados nos projetos de planejamento urbano.

Como sugestões para futuras pesquisas, visto que este trabalho considerou apenas a recarga direta, recomenda-se:

- Atualização dos dados referentes à espacialização do solo;
- Estimativa da recarga indireta para áreas urbanas costeiras;
- Estudo da influência de vazamentos provenientes da rede de abastecimento urbano, rede de esgoto sanitário e fossas;
- Simulação de rebaixamento do lençol freático, através do bombeamento dos poços, utilizando o modelo de balanço hídrico do solo para estimativa da recarga.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. DISPONÍVEL ON-LINE EM <WWW.ABAS.ORG.BR/CURIOSO.HTM>. ACESSO EM 19 DE ABRIL DE 2007.
- ALMEIDA, C. M. et al. Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas. In: **Anais... XI ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR**. Salvador, maio de 2005.
- BACK, A. J. **Determinação da Precipitação efetiva para a irrigação suplementar pelo balanço hídrico horário: Um caso de estudo em Urussanga, SC**. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 132p.
- BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Tese (Doutorado). University of Aegean, Lesvos, Grécia, 2000. Disponível em <www.rrl.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>. Acessado em dezembro de 2007.
- CABRAL, J. et. al. **A problemática da drenagem urbana em áreas planas costeiras no Nordeste Brasileiro**. In: Villanueva, A. et. Al. (org) **Soluções para a Drenagem Urbana em Países da América Latina**. Ed. ABRH, Porto Alegre, 2001.
- CAICEDO, N. L. (2000). **Água Subterrânea**, In: Tucci, C. E. M, (org.). **Hidrologia Ciência e Aplicação**, Ed. Universidade, UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- CARDOSO, C. O. **Avaliação de demanda hídrica de algumas culturas sujeitas à alteração climática na Bacia do Rio Uruguai**. UFRGS – Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, 1995. 251p.

CJIAMBEL, S. Sacos de Plástico Amigos do Ambiente. Disponível em: <www.ideiasambientais.com.pt/index>. Acesso em novembro de 2007.

COLLISCHONN W. (2001) *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias* - Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

DEPRN / DUSM - Aquíferos subterrâneos. Equipe Técnica de Mogi das Cruzes, disponível em <sigam.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em novembro de 2007.

DORNELLES, R.; RIZZI, R. *Modelagem Atmosferica* (1998). UFRGS/Instituto de Informática/Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Disponível em: <www.inf.ufrgs.br/proccpar/disc/emp134/trabs/T2/981/Atmos/Atmos.html> Acesso em dezembro de 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1979. 212p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the united Nation). **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements – FAO - Irrigation and drainage**. ISBN 92-5-1042105. 1998. 56p.

FREIRE, C. C.; RIBEIRO, M. M. R.; PEREIRA, J. S. **Aspectos legais da gestão das águas subterrâneas em Pernambuco - Brasil**. In: II ENCONTRO DAS ÁGUAS: FORUM INTERNACIONAL DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1999, Montevideo. II ENCONTRO DAS ÁGUAS, 1999.

FREIRE, C.C. **Água Subterrânea: Cobrança e Outorga**. In: II ENCONTRO DAS ÁGUAS: FORUM INTERNACIONAL DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1999, Montevideo. II ENCONTRO DAS ÁGUAS, 1999.

- GATTO, A.; WENDLING, I. **Solo, planta e água na formação da paisagem**. Coleção jardinagem e paisagismo – Série Implantação de jardins. Volume 1. Aprenda Fácil Editora. Viçosa – MG, 2002. 144p.
- GEHRELS, H. (2001). **Preface**. In: IAHS – International Association Hydrological Sciences Publication. Número 269. IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK.
- IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** (2000). Disponível on-line em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em janeiro de 2007.
- LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. In: **Revista Brasileira de Geociências**. 35(3):407-414, setembro de 2005.
- LUMMERTZ, F. B. **Aspectos de Hidráulica Subterrânea na área da grande João Pessoa-PB**. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Geociências, UFPE, Recife, PE. 1977.
- MAIDMENT, D.R. **GIS and hydrologic modeling**. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, Cap. 14, p. 147-167. 1993.
- MARQUES, J. G **Modelagem Espacial do Processo Decisório na Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros**. 2004.
- MEDEIROS, J. D. F.; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T. Variabilidade Espacial do Conteúdo de Água no Solo numa Pequena Bacia Rural: 1. Análise dos Fatores Ambientais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 12. n 1, 29-41, 2007.

- MOURA, M. C.; LOCH, C. **Geração de Modelos digitais de Áreas urbanas.** CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO UFSC. Florianópolis, Outubro 2006.
- NÓBREGA, T. M. Q. **A problemática da drenagem em áreas urbanas planas: O caso da planície costeira da cidade de João Pessoa.** Dissertação de Mestrado, UFPB/CCEN, João Pessoa, PB. 2002.
- NOVAES, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.
- OLIVEIRA, K. F. **Previsão de vazão em uma bacia do semi-árido usando previsões climáticas numéricas de precipitação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. 2006.
- OLIVEIRA, M. M. – **Aplicação de dois métodos diferentes para a estimativa da recarga de águas subterrâneas numa área de Estarreja.** 7º CONGRESSO DA ÁGUA, março de 2004.
- PEDROSA, J. B. **Arborização de cidades e rodovias.** Belo Horizonte – MG, 1983.
- PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PIERUCCINI, J. T. **Modelagem agrohidrológica.** A água em revista, Belo Horizonte, v.5, n.8, p.45-57. 1997.
- PINTO, N.L.S. et al. **Hidrologia Básica.** Ed. EDGARD BLÜCHER LTDA, SÃO PAULO, SP. 1976.
- PRUSKY F. F. et. al. (2001). **Sistema Especialista para o manejo integrado dos recursos hídricos.** UFV, Viçosa. URL:<http://www.iica.org.br/aguas>.

- RÊGO, J.C., ALBUQUERQUE, J.P.T. (2004) **Hidrogeologia aplicada**. Campina Grande: UFCG/UNESCO (Gestão de Recursos Hídricos, 7).
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 445p. 1985.
- ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. São José dos Campos – SP. INPE, 2001. 145p.
- ROSSO, T. C. A. **Gestão Integrada em Bacias Hidrográficas Costeiras**. Disponível em: <www.oceanica.ufjf.br>. Acesso em agosto de 2007.
- RUFINO, I. A. A. **Gestão de Recursos Naturais em Áreas Urbanas: Representação do Conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2004.
- SILVA, A. C. S. et. al. **Avaliação e espacialização das características dos poços do município de João Pessoa – Paraíba**. In: SILVA, T. C. et al (org). **Bacia do Rio GRAMAME: Hidrologia e Aspectos Ambientais para Gestão dos seus Recursos Hídricos**. Editora UFPB, João Pessoa. 2002.
- SILVA, A. C. S. **Modelagem Espacial de Processos Decisórios em Gestão de Recursos Hídricos com Tratamento de Incertezas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande., PB. 2004.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance. publication in climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.
- TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. **Balanço hídrico**. Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas. INPE – São José dos Campos, 2005.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

TOMAZ, P. **Previsão de consumo de água: interface das instalações prediais de água e esgoto com os serviços públicos.** São Paulo: MF Navegar, 2000. 217p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação.** 3ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004. 944p.

UFPB/ATECEL. **Estudo do comportamento do aquífero freático no bairro do Bessa e de sua influência sobre a drenagem superficial.** Campina Grande, PB. 1999.

VIEIRA, L.J.S., RÊGO, J.C., ALBUQUERQUE, J.P.T., GÓIS, R.S.S. (2001) Um estudo da influência do aquífero freático sobre a drenagem superficial. In: **Anais...** do XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Aracaju: ABRH. Em CD-ROM.

WIKIPÉDIA. **Wikimedia Foundation.** Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <[pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Meteorologia &oldid=8454457](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Meteorologia&oldid=8454457)>. Acesso em dezembro de 2007.

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

ANEXO I - Cotas da superfície piezométrica do aquífero obtidas pela UFPB/ATECEL (1999) durante a primeira campanha de medição (Marques, 2004).

Nº PIEZ.	NÍVEL NOV/98	NÍVEL FEV/99	NÍVEL MAR/99	NÍVEL MAI/99	NÍVEL JUN/99	NÍVEL JUL/99
1	--	1,630	1,740	1,890	--	--
2	--	1,890	2,070	2,210	--	--
3	--	1,544	1,774	2,024	2,194	2,994
4	2,841	2,236	2,196	3,126	2,736	2,506
6	2,481	1,925	1,885	2,265	2,395	2,195
7	2,891	2,245	--	2,945	--	--
8	2,220	2,100	2,000	2,300	--	--
9	3,220	2,520	2,530	2,870	--	--
11	2,277	2,188	2,268	2,508	2,628	2,138
12	2,158	--	--	2,500	--	--
13	1,722	1,532	2,062	2,032	--	--
15	2,299	1,954	2,324	2,624	2,694	1,954
16	2,586	2,184	2,204	3,504	3,574	2,184
17	2,285	--	--	1,595	--	--
18	2,364	1,894	1,814	2,044	--	3,024
19	--	1,385	1,295	1,395	--	2,585
20	--	1,348	1,228	1,398	--	--
21	2,824	2,597	2,587	2,757	2,877	2,597
22	2,849	--	--	2,759	--	--
24	3,255	2,655	2,605	2,815	--	--
25	3,260	2,524	2,504	2,864	3,084	2,914
27	2,852	2,218	2,138	2,508	--	--
28	--	2,265	2,185	2,495	--	--
29	2,833	2,120	2,020	2,740	--	--
30	2,719	2,138	1,958	2,418	2,608	2,478
31	2,845	2,208	2,388	2,738	2,778	2,538
32	2,801	2,453	2,453	2,723	2,813	2,553
33	2,663	2,106	2,386	2,736	2,776	2,516
35	3,452	2,949	2,689	2,959	3,199	3,079
36	3,545	2,832	2,752	3,062	3,322	3,022
37	3,768	2,895	2,845	3,115	3,355	3,245
38	3,504	2,742	2,632	2,902	3,172	3,082
39	3,069	2,347	2,247	2,647	2,857	2,747
40	2,711	2,173	2,173	2,333	2,543	2,423
41	3,293	2,523	2,403	2,623	3,153	3,083
42	3,648	2,910	2,800	3,020	3,280	3,230
43	--	2,357	2,267	2,477	--	2,877
44	3,323	2,654	2,544	2,734	2,944	2,914
45	--	2,364	2,274	2,454	2,714	2,704
46	--	2,231	2,931	3,161	--	3,101
47	3,542	2,844	2,754	2,904	3,164	3,154
48	3,301	2,674	2,644	2,934	3,114	2,934
49	2,987	2,267	2,197	2,547	--	--
50	2,735	2,106	2,036	1,766	2,346	2,366
51	3,083	2,373	2,293	2,423	--	--
52	3,364	2,665	2,595	2,695	2,935	2,955
53	2,847	2,138	2,148	2,238	--	--
54	2,301	1,718	1,658	1,768	2,018	1,988
55	2,377	1,744	1,724	1,874	--	--
56	1,958	1,383	1,393	1,523	1,803	1,803
57	2,134	1,511	1,511	1,631	2,081	1,931
58	2,688	2,368	2,288	2,418	2,668	2,638
59	2,922	2,381	2,311	2,471	2,791	2,591
60	3,642	3,017	2,937	3,107	--	--
61	3,433	2,833	2,813	3,033	3,473	3,233
62	3,456	2,885	2,845	3,085	3,495	3,265
63	3,673	--	--	3,955	--	3,795

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

64	2,756	2,448	2,448	2,658	--	3,148
45	--	2,564	2,274	2,454	2,714	2,704
46	--	2,331	2,031	3,161	--	3,191
47	2,542	2,844	2,754	2,904	3,164	3,154
48	2,501	2,674	2,644	2,934	3,114	2,934
49	2,087	2,267	2,197	2,547	--	--
50	2,135	2,106	2,036	1,766	2,546	2,366
51	3,083	2,373	2,293	2,423	--	--
52	3,364	2,665	2,595	2,695	2,935	2,955
53	2,847	2,138	2,148	2,238	--	--
54	2,301	1,718	1,658	1,768	2,018	1,988
63	1,576	1,065	1,035	1,205	1,325	1,255
66	--	3,560	3,470	3,680	--	--
67	--	2,926	2,846	3,126	--	--
68	--	2,601	2,571	2,881	3,181	3,001
69	--	2,850	2,790	3,070	--	--
70	--	2,088	2,078	2,388	--	--
72	--	1,356	2,926	3,131	--	--
73	--	2,576	2,496	2,676	--	--
74	--	2,734	2,704	3,054	3,224	3,064
75	--	2,781	2,771	3,541	--	--
76	--	2,149	2,129	2,429	2,629	2,469
77	--	1,874	1,774	1,984	--	2,644
78	--	2,289	2,279	2,619	--	2,649
79	--	1,973	1,898	2,148	--	2,578
80	--	2,502	2,422	2,682	--	--

Estimativa da recarga de aquíferos para gestão de águas superficiais e subterrâneas: aplicação em uma área urbana costeira

ANEXO 2 - Cotas da superfície piezométrica do aquífero, obtidas pela UFPB/ATECEL (1999) na segunda campanha de medição (Marques, 2004).

N° PIEZ	Nível Nov/01	Nível Dez/01	Nível Jan/02	Nível Fev/02	Nível Mar/02	Nível Abr/02	Nível Jun/02	Nível Jul/02	Nível Ago/02	Nível Out/02	Nível Nov/02	Nível Dez/02
10	1,173	1,143	1,293	1,363	1,423	1,263	1,599	1,753	1,643	1,473	1,393	
11	1,487	1,457	1,627	1,667	1,787	1,607	2,037	2,217	2,067	1,857	1,537	
13	1,482	1,472	1,652	1,802	2,082	1,952	2,300	2,062	1,832	1,492	1,382	
14	1,547	1,517	1,677	1,697	1,897	1,637	2,057	2,237	2,057	1,717	1,607	1,547
15	1,512	1,512	1,652	1,742	1,872	1,702	2,000	1,882	1,742	1,532	1,222	
16	1,682	1,682	1,832	1,842	1,902	1,702	2,092	2,192	2,092	1,852	1,392	1,732
17	1,477	1,447	1,547	1,567	1,637	1,457	1,847	1,987	1,847	1,567	1,527	1,477
18	1,582	1,552	1,812	1,852	2,022	1,872	2,362	2,102	2,852	2,332		
19	1,727	1,647	1,917	1,957	2,137	1,977	2,527	2,847	2,547	1,987	1,857	1,787
20	2,827	2,757	3,017	3,067	3,237	3,097	3,627	3,957	3,677	3,097	2,967	2,887
21	1,897	1,837	2,117	2,057	2,337	2,157	2,737	3,097	2,737	2,167	2,027	1,937
22	1,882	1,812	1,922	2,042	2,182	2,042	2,350	2,752	2,562	2,562	2,452	
23		2,441	2,651	2,571	2,881	2,731	3,191	3,481	3,251	3,251	2,651	2,591
24		2,263	2,633	2,703	2,843	2,673	3,050	3,623	3,433	2,843	2,637	
25		2,277	2,627	2,757	2,947	2,787	3,317	3,637	3,427	2,817	2,308	2,065
26		1,848	2,188	2,333	2,478	2,278	2,650	3,288	3,028	2,418	2,308	
27		1,735	2,085	2,215	2,355	2,205	2,500	3,125	2,875	2,365	2,185	2,065
31	1,896	1,766	1,896	1,986	2,166	1,936	2,390	2,136	2,086	1,846	1,756	
32	1,921	1,881	1,971	2,121	2,211	2,141	2,371	2,571	2,451	2,181	2,081	
33	1,706	1,736	1,886	1,936	2,096	1,906	2,176	2,266	2,196	1,966		
34		2,361	2,711	2,871	3,041	2,841	3,561	3,681	3,411	2,991	2,841	
35		2,558	2,858	2,988	3,138	2,908	3,558	3,748	3,698	3,118	2,938	
36		2,65	3	3,14	3,22	3,07	3,600	3,89	3,84	3,47	3,34	
37		2,922	2,302	3,392	3,502	3,342	4,092	4,462	4,292	3,542	3,322	3,172
38		1,814	2,174	2,214	2,484	2,204	3,104	3,604	3,364	2,614	2,314	2,164
39		1,89	2,36	2,36	2,43	2,2	2,600	3,34	3,1	2,68	3,57	
70	1,478	0,458	0,638	0,758	0,828	0,658	0,980	1,796	1,696	1,388	1,258	
72	1,836	1,816	2,016	2,086	2,216	2,066	2,406	2,546	2,306	2,006	1,926	1,866
73	1,828	1,828	2,028	2,138	2,268	2,118	2,400	2,408	2,518	2,918	2,848	
75		2,716	2,826	2,996	3,176	3,068	3,300	3,386	3,306	2,776	2,686	
89		2,53	2,76	2,84	2,91	2,74	3,140	3,25	3,11	2,69	2,58	1,47
91		1,763	1,933	1,993	2,153	2,003	2,300	2,773	2,593	2,113	2,033	
92		1,775	1,925	2,165	2,225	2,065	2,435	2,545	2,455	1,945	1,855	
93		1,732	1,902	1,952	2,072	1,912	2,250	2,452	2,412	1,962	1,832	
94	2,117	2,037	2,287	2,357	2,517	2,287	2,867	3,177	2,947	2,377	2,267	2,187
M1	1,502	1,502	1,532	1,542	1,552	1,532		1,642	1,582	1,532	1,522	1,512
M2	1,469	1,469	1,509	1,529	1,509	1,484		1,609	1,569	1,529	1,489	1,480
M4	1,532	1,532	1,552	1,572	1,572	1,552		1,672	1,652	1,672	1,681	1,682
M5	0,971	0,971	1,001	1,861	1,901	1,871		2,041	1,991	1,961	1,941	1,891
M6								1,662	1,602	1,532	1,542	1,532
M7								2,221	2,191	2,151	2,141	2,121
M8								2,182	2,152	2,102	2,082	2,072
M9								2,394	2,384	2,344	2,334	2,324
M10								2,486	2,476	2,416	2,406	2,396
M11								2,101	2,091	2,041	2,041	2,031
M12								0,404	1,439	1,389	1,399	1,379
M13								1,774	1,764	1,724	1,724	1,724