

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Felipe Ben Rodrigues

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITO ALUVIONAR DO RIACHO BOA
VISTA NO SÍTIO CAIÇARA-AFOGADOS DA INGAZEIRA-PE**

Dissertação de Mestrado
2012

FELIPE BEN RODRIGUES

Geólogo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITO ALUVIONAR DO RIACHO BOA VISTA
NO SÍTIO CAIÇARA-AFOGADOS DA INGAZEIRA-PE

Dissertação que apresentou ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. José Geilson Alves Demetrio, em preenchimento parcial para obter do grau de Mestre em Geociências, área de concentração Hidrogeologia, defendida e aprovada em 29/02/2012.

RECIFE, PE
2012

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITO ALUVIONAR DO RIACHO
BOA VISTA NO SÍTIO CAIÇARA – AFOGADOS DA INGAZEIRA – PE**

Felipe Ben Rodrigues

APROVADO

José Geilson Alves Demétrio
29 de fevereiro de 2012

João Manoel Filho
29 de fevereiro de 2012

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
29 de fevereiro de 2012

“Em uma época em que os que detêm o poder estão seduzidos pela mais estreita lógica ditada por interesses de grupos privilegiados, falar de desenvolvimento como reencontro com o gênio criativo de nossa cultura pode parecer simples fuga na utopia. Ora, o utópico muitas vezes é fruto da percepção de dimensões secretas da realidade, um afloramento de energias contidas que antecipa a ampliação do horizonte de possibilidades aberto a uma sociedade”

Celso Furtado

AGRADECIMENTOS

A CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Ao Professor Geilson e aos colegas do Labhid pela atenção dedicada, sugestões e debates.

A Diaconia, em especial a Joseílton, Alyne e Mário pelo apoio, disposição e crença na proposta de trabalho.

Aos moradores do sítio Caiçara, Dona Carmelina e sua imensa generosidade, Cláudio e família por sua hospitalidade e confiança.

Ao amor, amparo e força da mãe, do pai, da família toda e de todos os amigos que compartilham comigo a felicidade.

A luz dos olhos azuis, beleza dos gestos e mansidão da voz que chegava pelo telefone.

RESUMO

Uma importante alternativa no contexto de déficit hídrico do semiárido nordestino é a captação de água a partir de depósitos aluvionares. Estes depósitos formam aquíferos freáticos capazes de prover vazões expressivas por meio de captações rasas. Com a finalidade de incrementar a capacidade de acumulação desses aquíferos e elevar a superfície freática, são construídas barragens subterrâneas. A fundamentação técnico-científica é o primeiro passo para o uso racional desse manancial, e o conhecimento dos parâmetros hidrogeológicos das aluviões assume um papel de grande importância para dimensionamento local do consumo de água. A proposta dessa dissertação é caracterizar hidrogeologicamente o depósito aluvionar de um dos afluentes do Riacho Boa Vista no sítio Caiçara, município de Afogados da Ingazeira (PE), visando dimensionar o uso de água na propriedade. Também foi analisada a técnica de barragens subterrâneas, buscando alternativas simples e eficazes de manejo dos recursos hídricos no local. Para tanto, utilizou-se de furos de sondagem e análises granulométricas para caracterização sedimentológica, foi calculada a condutividade hidráulica através de *slug test*. Mapas potenciométricos e de transmissividade foram confeccionados e estimados os recursos e as reservas. A condutividade hidráulica e transmissividade média foram determinadas em $1,25 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e $2,63 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. A estimativa dos recursos hídricos renováveis de $5504 \text{ m}^3/\text{ano}$ indicam que o aquífero pode suportar o período de seca, mantidas as demandas atuais de $7 \text{ m}^3/\text{d}$. Também foi estimado o volume de água de $672 \text{ m}^3/\text{ano}$ que a barragem subterrânea permite escoar e discutido o impacto dessa estrutura sobre o aquífero.

Palavras-chave: depósito aluvionar, barragem subterrânea, semiárido, seca, afogados da ingazeira.

ABSTRACT

An important alternative in the context of water deficit semi-arid Northeast is water abstraction from alluvial deposits. These deposits form unconfined aquifers capable of providing significant yield through shallow wells. In order to increase the accumulation capacity of aquifers and raising the phreatic surface, underground dams are built. The technical-scientific basis are the first step towards the rational use of this wealth, and knowledge of hydrogeological parameters of alluvial assumes a greater role for local management of water consumption. The purpose of this paper is to characterize the hydrogeological alluvial deposit of a tributary of the Boa Vista creek in sítio Caiçara, in Afogados da Ingazeira (PE), to measure the water use on the property. The technique of underground dams was pointed out as an alternative simple and effective for the water management resources on site. Grain analysis from borehole samples and slugtests were performed in order to evaluate hydraulic conductivity, made potentiometric and transmissivity maps, and estimated resources and reserves. The average transmissivity and hydraulic conductivity were determined: $1,25 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ and $2,63 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. The calculation of the renewable water resources revealed that the annual volume stored in the aquifer can endure dry period, since it maintained the current demands. Was also estimated the volume of groundwater water that flow through the underground dam annually and discussed the impact of structure on the aquifer.

Key-words: alluvial deposits, underground dam, semi-arid, drought, afogados da ingazeira

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.ÁREA DE ESTUDO	2
1.2.OBJETIVOS	4
2.METODOLOGIA.....	5
2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
2.2. TRABALHO DE CAMPO.....	6
2.3. DELIMITAÇÃO DO ALUVIÃO	8
2.4. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	9
2.3. SLUG TEST	10
2.4. PERFIS DE SONDAGEM	12
2.5. ELABORAÇÃO DOS MAPAS POTENCIOMÉTRICOS E DE ISOTRANSMISSIVIDADE.....	12
2.6. ESTIMATIVA DAS RESERVAS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
4. ASPECTOS SOCIAIS.....	16
5. FISIOGRAFIA	18
5.1. SOLOS E VEGETAÇÃO.....	18
5.2. HIDROGRAFIA.....	18
5.3. CLIMA	20
6. CONTEXTO GEOLÓGICO	23
6.1. GEOMORFOLOGIA	23
6.2. LITOLOGIAS	23

6.3. HIDROGEOLOGIA	25
7. SÍTIO CAIÇARA	27
8. RESULTADOS	30
8.1. DELIMITAÇÃO DO ALUVIÃO	30
8.2. DESCRIÇÃO SEDIMENTOLÓGICA	32
8.3. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	34
8.3.1. Média gráfica	35
8.3.2. Coeficiente de uniformidade	36
8.3.3. Estimativa da condutividade hidráulica	37
8.4. PERFIS DE SONDAGEM	41
8.5. SLUG TEST	45
8.6. POROSIDADE EFETIVA	48
8.7. TRANSMISSIVIDADE	50
8.8. POTENCIOMETRIA	52
8.9. ESTIMATIVA DAS RESERVAS	55
8.9.1. Reserva permanente	56
8.9.2. Recursos renováveis	57
8.9.3. Vazão de escoamento natural (VEN)	58
8.9.4. Recursos exploráveis	59
8.10. ANÁLISE DA TÉCNICA DE BARRAGEM SUBTERRÂNEA	60
8.10.1. Locação	61
8.10.1.1. Salinidade	61
8.10.1.2. Espessura do aluvião	62
8.10.1.3. Constituição granulométrica e controle estrutural	63
8.10.1.4. Área de recarga, estreitamento do aluvião e declividade	64
8.10.2. Aspectos construtivos	64
8.10.3. Manejo da água	68
9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
10. REFÊRENCIAS	74

APÊNDICE I- Sondagens realizadas no trabalho de campo e descrição dos sedimentos.

APÊNDICE II- Curvas granulométricas de cada amostra analisada e as classes de Breddin, utilizadas para a estimativa de K

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pluviometria em Afogados da Ingazeira do período de janeiro de 2010 a novembro de 2011. Fonte: Lamepe/INPE e APAC.....	21
Tabela 2. Balanço hídrico mensal - Estação Afogados da Ingazeira (valores em mm)	22
Tabela 3. Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Tacaratu na Bacia de Fátima. Modificado de Costa et.al. (2006).....	25
Tabela 4. Síntese dos resultados obtidos por meio das análises granulométricas.	39
Tabela 5. Resultados de K obtidos para ambos os métodos empregados.....	47
Tabela 6. Métodos de estimativa de porosidade específica (μ) a partir da condutividade hidráulica (K). K em cm/d.....	49
Tabela 7. Valores de transmissividade calculados. As células marcadas com *, representam valores de espessura estimados, devido ao fato das sondagens não terem alcançado o embasamento cristalino.	50
Tabela 8. Indicando os valores de condutividade elétrica e o que eles representam. Modificado de Ayres & Westcot (1991).....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Afogados da Ingazeira e do sítio Caiçara. Modificado de CPRM (2009).	3
Figura 2. Execução das sondagens a trado manual.	7
Figura 3. Piezômetro instalado na área da barragem subterrânea.	8
Figura 4. Equipamentos utilizados na análise granulométrica.	10
Figura 5. Registrador de nível automático utilizado no slug test.	11
Figura 6. Rede hidrográfica na região de estudo. Modificado de CPRM (2009).	20
Figura 7. Cacimbas localizadas no sítio Caiçara.	28
Figura 8. Caixa d'água e irrigação no sítio Caiçara.	29
Figura 9. Delimitação do depósito aluvionar no sítio Caiçara.	31
Figura 10. Amostras representativas das fácies descritas.	33
Figura 11. Curvas granulométricas das amostras analisadas (em preto), e as classes de Breddin, utilizadas para a estimativa de K (campos numerados e divisórias em vermelho), nas quais elas se enquadram.	34
Figura 12. Intervalos de tamanho de grão. Modificado de Pettijohn & Potter (1987)	35
Figura 13. Curvas granulométricas de Breddin, para estimativa de condutividade hidráulica. Modificado de Custódio e Llammas (1976).	38
Figura 14. Perfis estratigráficos transversais a depósito aluvionar.	43
Figura 15. Perfis estratigráficos em longitudinais ao depósito aluvionar.	44
Figura 16. Curva representativa da variação de nível (h/ho) em função do tempo durante o slugtest no piezômetro B14.	46
Figura 17. Mapa de isotransmissividade do aquífero aluvionar.	51
Figura 18. Mapas potenciométricos do depósito aluvionar em diferentes datas.	54
Figura 19. Mapa potenciométrico do depósito aluvionar em 20/09/11.	55
Figura 20. Modelo de barragem subterrânea COSTA & MELO. Fonte: Costa(2000).	65

Figura 21. Entrada de água durante o preenchimento da vala da barragem subterrânea.	66
Figura 22. Entrada de água durante o preenchimento da vala da barragem subterrânea.	67
Figura 23. Representação esquemática da barragem subterrânea construída no sítio Caiçara.....	68

1.INTRODUÇÃO

O Estado de Pernambuco está situado na região nordeste do Brasil e possui uma área de 98.938 km², com a maior parte de seu território inserido na região semiárida (SECTMA, 1998).

O semiárido nordestino tem como principal característica, a irregularidade espaço-temporal das precipitações pluviométricas, condições geológicas predominantes de solos rasos sobre um embasamento de rochas cristalinas e pouca cobertura vegetal, consequentemente, pouca água é armazenada em sub-superfície, resultando em regimes fluviais temporários.

A região enfrenta sérias dificuldades no que diz respeito ao suprimento hídrico de sua população, as quais são mais evidentes no meio rural, onde falta adequada infraestrutura de convivência com as estiagens (Leal, 1998), e de onde historicamente, por ocasião das secas, grandes contingentes populacionais migram para os centros urbanos.

Os poços tubulares perfurados no embasamento cristalino do semiárido nordestino comumente apresentam baixas vazões e altas taxas de salinidade, resultando em muitas unidades abandonadas e pouco aproveitamento deste recurso (CPRM, 2008). É muito difundida também a construção de açudes para armazenamento de água e posterior uso na época de seca, ou reservatórios menores conhecidos como “barreiros”. No entanto, estes reservatórios de superfície estão sujeitos às elevadas taxas de evaporação do clima semiárido e, quase sempre, não resistem às estiagens prolongadas.

As políticas emergenciais historicamente implantadas na região levam em consideração apenas a construção de grandes barragens, que abastecem principalmente as zonas urbanas, ou medidas paliativas como a mobilização de carros-pipa e entrega de cestas básicas. Tais ações são impulsionadas por uma lógica de combate à seca, em oposição à convivência com o clima.

A afirmação de Duque (1980) que “não é o total da precipitação e, sim, a sua distribuição que caracteriza a seca” no semiárido nordestino, reforça a possibilidade de convívio com as estiagens, através de um manejo eficaz de recursos hídricos e da otimização de técnicas apropriadas à região.

Uma importante alternativa no contexto de déficit hídrico da região é a captação de água a partir de depósitos aluvionares, formados nos leitos e margens de rios e riachos. Estes depósitos formam aquíferos freáticos que, apesar de restritos do ponto de vista geográfico e frequentemente com pequenas espessuras saturadas, apresentam altas permeabilidades das frações arenosas, sendo possível obter vazões de exploração expressivas, ainda que temporariamente, através de captações rasas (CPRM, 2009).

A captação de água em aquíferos aluvionares é feita principalmente por meio de poços amazonas (cacimbões) de pouca profundidade e escavados manualmente, ou pela construção de poços tubulares. Alternativamente, são implantadas barragens subterrâneas com a finalidade de incrementar a capacidade de acumulação destes aquíferos e elevar o nível freático, possibilitando uma irrigação de vazante e maior captação por meio dos poços.

Barragem subterrânea pode ser definida como toda estrutura que objetiva barrar o fluxo subterrâneo de um aquífero pré-existente ou criado concomitantemente à construção da barreira impermeável (Santos & Frangipani, 1978). Esta técnica foi foco de estudo no “Manual de Barragens Subterrâneas” (Costa, 1997), onde foram descritas as condições necessárias para uma correta locação e construção, assim como também foram fornecidos elementos sobre a capacidade de acumulação e os custos de construção.

Os aquíferos aluvionares têm, portanto, um importante papel na manutenção dos sistemas hídricos no semiárido nordestino e a fundamentação técnico-científica é o primeiro passo para o uso racional deste recurso. O uso de técnicas agrícolas que racionalizem ao máximo a utilização de água também é fundamental, em especial para a pequena agricultura. No que diz respeito à captação de água por meio de barragens subterrâneas, Costa (1997) ressalta que o conhecimento dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero artificial criado pela barragem subterrânea é fundamental para dimensionar o consumo de água.

1.1.ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) é uma propriedade rural conhecida como sítio Caiçara localizada no município de Afogados da Ingazeira, o qual possui uma área territorial de 386 km² e, segundo dados do censo 2010 IBGE, tem população estimada de 34.659 habitantes, sendo que aproximadamente 1/3 está na zona rural (Embrapa, 2004).

O município pertence à Mesorregião do Sertão Pernambucano e Microrregião do Pajeú (SECTMA, 1998), e limita-se com os municípios de Solidão ao norte, Carnaíba ao sul, com Tabira e Igaraci à leste e com Carnaíba à oeste.

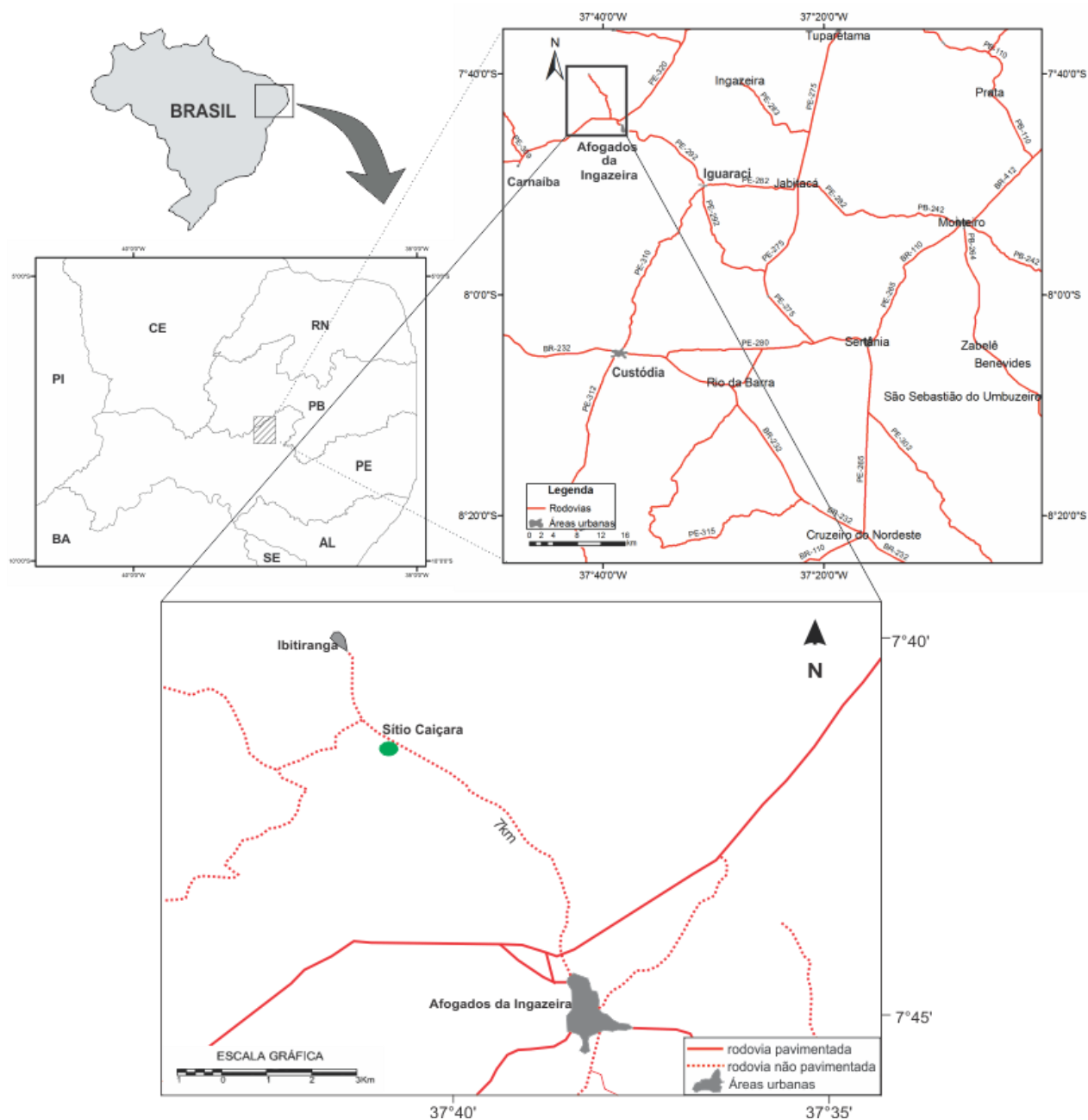


Figura 1. Localização do município de Afogados da Ingazeira e do sítio Caiçara. Modificado de CPRM (2009).

O acesso à área, partindo de Recife, se dá pela rodovia BR-232, percorrendo-se 269 km até o município de Cruzeiro do Nordeste, seguindo para norte pela BR-110 por 33 km até a cidade de Sertânia. Prossegue-se para oeste pela PE-280 por 10 km até a PE-275, por mais 13

km, chegando à PE-292, percorrendo nessa estrada 36 km até a cidade de Afogados da Ingazeira. Para chegar ao sítio Caiçara, partindo da área urbana, segue-se por uma estrada não pavimentada no sentido noroeste por 7 km.

O aluvião objeto deste estudo é o depósito de um afluente do Riacho Boa Vista, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú.

1.2.OBJETIVOS

A proposta deste estudo consiste em caracterizar hidrogeologicamente o depósito aluvionar de um dos afluentes do Riacho Boa Vista no sítio Caiçara, Afogados da Ingazeira (PE), visando dimensionar o uso de água na propriedade. Secundariamente, analisar a técnica de captação/irrigação por barragens subterrâneas, e como a metodologia aqui empregada pode ser incorporada às práticas atuais auxiliando na construção do conhecimento sobre a técnica e buscando alternativas simples e eficazes.

2.METODOLOGIA

2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas bibliográficas envolveram o levantamento de trabalhos técnico-científicos executados na região, em especial os que tratam de depósitos aluvionares; consulta à base cartográfica, mapas temáticos (geologia, solos, hidrografia) e imagens orbitais; características gerais da área de estudo; contexto socioeconômico e uso de água na região.

As pesquisas foram realizadas, principalmente, na Biblioteca do CTG (Centro de Tecnologia e Geociências) da UFPE e CPRM (Serviço Geológico Brasileiro), além do acesso a arquivos em meio digital pela internet, destacando-se como instrumento de busca o portal de periódicos CAPES.

Foram utilizadas as imagens orbitais CBERS 2B HRC 20090721 149 E 109 1 L2 BAND1, fornecida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e as imagens do software *Google Earth*, para reconhecimento do meio físico, principalmente rede hidrográfica, e das estruturas de abastecimento de água. O uso de imagens também possibilitou a delimitação dos contatos laterais do depósito aluvionar e auxiliou na orientação geográfica nos trabalhos de campo.

A base cartográfica para a elaboração do mapa de hidrografia (Figura 6) foi consultada no projeto PROALUV (CPRM, 2009).

Fotografias aéreas não foram utilizadas, pois para a área de interesse somente foram encontradas fotografias na escala 1:70.000, não fornecendo o detalhamento necessário ao escopo do trabalho.

2.2. TRABALHO DE CAMPO

As etapas de campo tiveram apoio da ONG Diaconia e dos agricultores do sítio Caiçara, os quais ajudaram nas sondagens à trado manual e com informações verbais sobre a região, além do auxílio no transporte e estadia.

Foram realizadas duas etapas de campo, a primeira entre os dias 24 e 28/09/10, e a segunda entre 19 e 23/09/11.

Os objetivos da 1ª etapa foram:

- Reconhecimento das principais características do depósito aluvionar. A largura do aluvião, durante o processo de locação da barragem subterrânea, foi medida com trena.
- Reconhecimento das estruturas de captação de água no local, incluindo cacimbas, cisternas e uma antiga barragem subterrânea.
- Execução de sondagens visando determinar a profundidade e estratigrafia do depósito, conhecer a geometria do leito rochoso e instalar piezômetros de monitoramento, além da coleta de amostras de sedimento.

Para as sondagens foram utilizadas um trado manual (Figura 2), o qual é um equipamento amplamente utilizado para a escavação de poços de monitoramento. As vantagens desta ferramenta são o simples manuseio e a operação/manutenção de baixo custo, mas com a desvantagem de atingir uma profundidade limitada pela zona saturada ou por alguma camada muito dura.



Figura 2. Execução das sondagens a trado manual.

Os furos de sondagens foram executados à montante do local da barragem subterrânea, e em alguns furos não se pode atingir o embasamento cristalino, ora devido à entrada de água e consequente desmoronamento das paredes do furo, ora pela presença de uma camada de argila muito rígida.

- Coleta de amostras de sedimento, a cada 1 m perfurado.

- Instalação de cinco piezômetros (Figura 3) a montante do local onde foi construída a barragem subterrânea, três de 30 mm de diâmetro e dois de 75 mm, visando acompanhar as oscilações do nível freático, que também foram acompanhados nas cacimbas, e execução do *slug test*.

Os níveis estáticos foram medidos nas datas 13/12/10, 28/03/11, 01/06/11, 01/8/11 e 20/09/11 pelo morador do sítio Caiçara, Cláudio José.



Figura 3. Piezômetro instalado na área da barragem subterrânea.

A 2ª etapa teve como finalidade:

- Nivelamento dos pontos de sondagem, piezômetros, utilizando o método do nivelamento de mangueira.

A partir do nivelamento foi possível construir perfis geológicos, confeccionar os mapas potenciométricos e estimar a declividade do aluvião.

- Execução do *slug test* no piezômetro B14.

2.3. DELIMITAÇÃO DO ALUVIÃO

Nas proximidades do eixo da barragem subterrânea, a demarcação do contato lateral do aluvião com o embasamento cristalino foi feita através de pontos de controle no campo, com base nas sondagens, geomorfologia e identificação de afloramentos de rocha.

Para as porções restantes foi confeccionado um mosaico de imagens do software *Google Earth*, e georreferenciado com o auxílio do software *Arcgis 9*. O critério de delimitação utilizado nas imagens foi a diferença de tonalidades da vegetação e do solo.

2.4. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

Com as amostras coletadas nos furos de sondagem foram feitas análises granulométricas visando à confecção de curvas granulométricas, as quais foram usadas para estimar valores de condutividade hidráulica. As análises foram realizadas no laboratório de sedimentologia da UFPE e seguiram a seguinte metodologia:

- As amostras foram colocadas em bacias abertas para secagem preliminar;
- Secagem efetiva das amostras em estufa (Figura 4A) a 60°C por 48 horas;
- Pesagem e obtenção de 100g para cada amostra em balança de alta precisão (Figura 4C);
- Peneiramento úmido das amostras com as malhas de diâmetros 2 mm e 0,062mm. As frações inferiores a 0,062mm, representando as granulometrias silte e argila, foram descartadas e o restante da amostra foi levado novamente à estufa a 60°C.
- As amostras foram repesadas sem as frações silte e argila.
- Peneiramento a seco usando as peneiras de malhas 1, 0,5, 0,250 e 0,125mm com o auxílio do equipamento *Test Sieve Shaker* (Figura 4D), o qual executa um movimento vibratório fazendo com que as amostras passem através das peneiras. Cada amostra é peneirada por 10 minutos no equipamento;
- Remoção do material retido em cada peneira (Figura 4B) com o auxílio de uma escova;
- Pesagem de cada fração granulométrica em balança de alta precisão.

O peso de cada fração é expresso em porcentagem em relação ao peso total da amostra (100g) para a confecção das curvas de frequência.

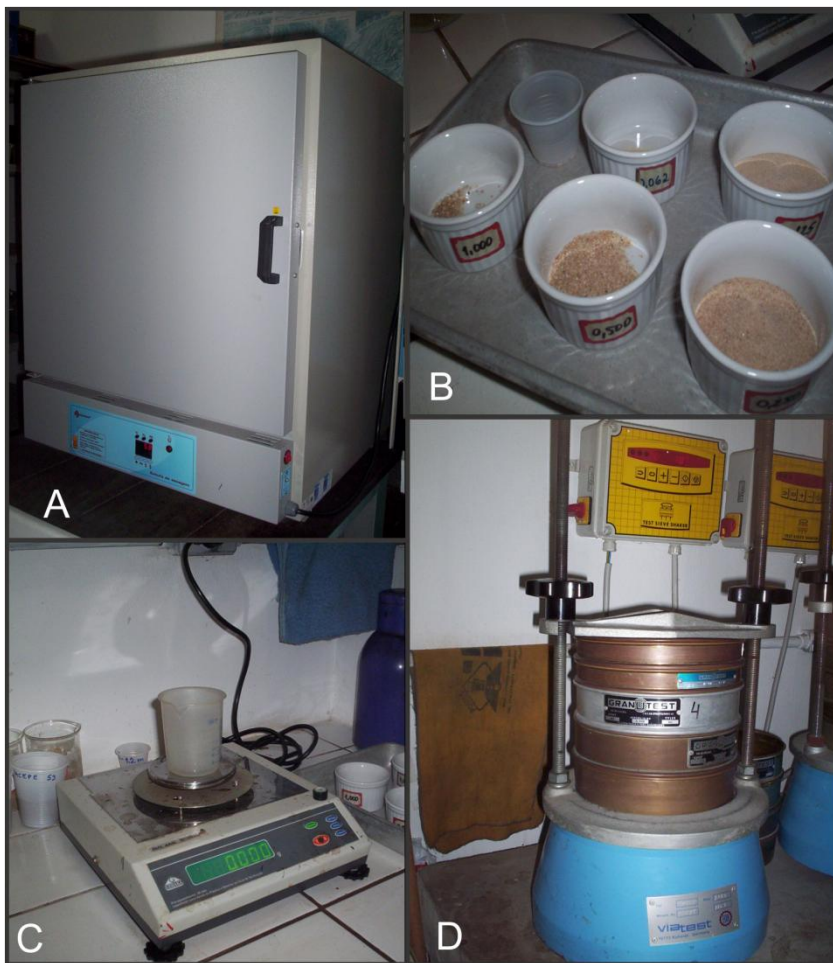


Figura 4. Equipamentos utilizados na análise granulométrica.

2.3. SLUG TEST

Segundo Weight & Sonderegger (2000) o método *slug test* é usado para estimar a condutividade hidráulica de aquíferos livres, semi-confinados e confinados. Apesar dos métodos analíticos terem sido desenvolvidos desde a década de 1950, a popularização da técnica ocorreu a partir da década de 1980, com o interesse na determinação das propriedades hidráulicas em aquíferos contaminados, onde não é recomendável o bombeamento. A aplicabilidade deste método é facilitada pelo fato de ser de rápida execução e relativamente simples.

Basicamente o *slug test* envolve a descida, no poço de observação, de um “*slug*” (cilindro de volume conhecido, normalmente feito de PVC preenchido com areia ou cascalho para que tenha densidade maior que a da água) sustentado por um cabo ou cordão. A inserção deste

cilindro no poço causará a subida imediata do nível d'água até um máximo (h_0), e em seguida a descida gradual do nível até a estabilização com as cargas hidráulicas das adjacências do poço, assim retomando o nível estático inicial. Na segunda etapa se retira o cilindro, causando a descida instantânea do nível d'água, e posteriormente a subida gradual até que as cargas hidráulicas se estabilizem e tenhamos o nível estático inicial novamente. Os níveis dinâmicos são medidos durante o teste por um registrador de nível automático, previamente instalado ou, no caso de aquíferos com a condutividade hidráulica muito baixa, por um medidor de nível elétrico. No caso desse trabalho foi utilizado o registrador de nível automático *Solinst Levelogger model 3001* (Figura 5), programado para medir o nível dinâmico a cada um segundo (1s).



Figura 5. Registrador de nível automático utilizado no slug test.

Com base na variação dos níveis dinâmicos em função do tempo, das características construtivas do poço e espessura do aquífero, é calculada a condutividade hidráulica (K).

Os métodos analíticos mais populares são o Hvorslev (1951) e Bouwer and Rice (1976), ambos aplicados no presente estudo.

O cálculo de K, pelos métodos acima citados, foi feito com o auxílio do software *Aquifertest 4.2*.

2.4. PERFIS DE SONDAGEM

Foram realizados perfis de sondagem com o intuito de compreender a distribuição dos estratos e a geometria do aquífero, bem como elucidar a respeito da distribuição do fluxo de água. A partir de cada furo de sondagem realizado no trabalho de campo foi possível descrever as amostras de sedimento em diferentes profundidades, correlacionando-as em sentido transversal e longitudinal ao depósito aluvionar.

2.5. ELABORAÇÃO DOS MAPAS POTENCIOMÉTRICOS E DE ISOTRANSMISSIVIDADE

De posse dos dados de nível estático em cada piezômetro instalado e do nivelamento topográfico pelo método de mangueira feito em campo, foram elaborados mapas potenciométricos da porção de aquífero estudada, para cada data de medições.

O mapa de isotransmissividades baseou-se nas espessuras de aluvião obtidas pelas sondagens. A espessura em cada sondagem foi multiplicada pelo valor de K obtido pelo *slugtest* gerando a transmissividade (T) em cada ponto.

Os mapas foram confeccionados através do software *Surfer 8* e posteriormente as curvas piezométricas foram redesenhadas conforme as condições de contorno e inferidas, quando necessário, em *Arcgis 9*.

2.6. ESTIMATIVA DAS RESERVAS

A estimativa das reservas permanentes, recursos renováveis, vazão de escoamento natural e recursos exploráveis, baseou-se nos dados de espessura do aquífero obtidos pelas sondagens em campo, na variação de nível estático acompanhada através dos piezômetros instalados, estimativa da porosidade efetiva em função da condutividade hidráulica através de métodos matemáticos e no cálculo da área do aluvião nas imagens orbitais através do software *Arcgis 9*.

A metodologia de cálculo aqui empregada foi baseada na proposta por CPRM (2008).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da década de 60, com a criação da SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste), a água subterrânea no Brasil começou a ser tratada com maior atenção do ponto de vista técnico/científico, sendo realizados pela Divisão de Hidrogeologia deste órgão, diversos estudos relacionados ao aproveitamento das águas subterrâneas no nordeste. Neste contexto foi realizado um reconhecimento hidrogeológico pioneiro da região nordeste, materializado no *Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste*, cujas informações são referências até hoje.

Nos últimos 30 anos as pesquisas hidrogeológicas de detalhe, conduzidas por algumas companhias de saneamento do Nordeste, avaliaram a potencialidade dos reservatórios aluvionares para o abastecimento público de pequenas cidades e para o desenvolvimento de pequenos projetos de irrigação.

Em Pernambuco destacam-se alguns trabalhos dessa ordem, segundo o levantamento de Leal (1998):

- Relatórios Sobre Pesquisa de Mananciais para Abastecimento Populacional trabalho realizado pela PLANAT, para a COMPESA, executado em algumas localidades na região semiárida, visando o abastecimento público.
- Poços Amazonas com Drenos Radiais, uma Alternativa de Captação no Aquífero Aluvionar – Trabalho executado pela EMATER, em 1993, em Pesqueira (PE), objetivando o apoio à pequena irrigação.
- Água no Sertão do Pajeú – O Município de Afogados da Ingazeira – Trabalho executado pela CPRM, em 1994. Consta da pesquisa de água subterrânea nas aluviões dos riachos Boa Vista (duas áreas) e Pajeú-Mirim.
- Definição de Manancial Subterrâneo – Captação de Maravilha (Custódia) – Trabalho executado pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, em 1981.

Na última década a CPRM vem desenvolvendo diversas pesquisas no âmbito do Programa de Água Subterrânea para a Região Nordeste, desde 1996, e do Programa de Água Subterrânea para o Semiárido Brasileiro (2000-2003), no qual um dos subprogramas destinava-se a promover uma visualização regional da ocorrência e potencialidade dos mananciais aluvionares da região de rochas cristalinas do semiárido brasileiro.

Outro projeto desenvolvido pela CPRM, finalizado em 2009, é a Caracterização Regional e Difusão Tecnológica para o uso Sustentável dos Recursos Hídricos das Aluviões do Semiárido Brasileiro (Proaluv), que objetiva, além da caracterização dos aluviões, a construção de barragens subterrâneas, poços amazonas e sistemas simplificados de abastecimento. Os relatórios deste projeto contemplam a recuperação dos dados de pesquisa hidrogeológica realizadas há anos atrás, a organização e disponibilização dos resultados em um banco de dados, a indicação das ocorrências aluvionares mapeáveis na escala 1:100.000 e a disposição de todo o conjunto de dados e informações em formato SIG.

O Projeto Proaluv (CPRM, 2009) inventariou os poços construídos nas áreas de aluvião nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco no período de 1976 a 1983, construídos pelas respectivas companhias de saneamentos de cada Estado. O inventário compreende dados de 2.704 poços de prospecção aluvionar, distribuídos por 235 áreas pesquisadas.

O projeto acima citado também mapeou em escala 1:100.000, através de imagens orbitais, os depósitos aluvionares da região nordeste, apontando áreas com diferentes potenciais para aquíferos aluvionares de acordo com a extensão dos seus depósitos, à geometria e a natureza litológica esperada.

As pesquisas hidrogeológicas deste projeto foram feitas em 235 diferentes áreas distribuídas por 128 localidades em 92 municípios dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco, incluindo 2.704 perfis litológicos. O inventário dos diferentes tipos de poços construídos contempla ainda testes de bombeamento e análises físico-químicas, e foi sistematizado em uma base de dados ACCESS 2007.

Na área de estudo é empregada a técnica de barragem subterrânea. Sobre o assunto, alguns trabalhos se destacam:

- Manual de Barragens Subterrâneas (Costa, 1997), onde foram descritas as condições necessárias para uma correta locação e construção, assim como também foram fornecidos elementos sobre a capacidade de acumulação e os custos de construção.

-Trabalhos executados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), os quais dão ênfase à técnica de barragens subterrâneas como alternativa tecnológica para propriedades rurais e ao seu impacto sobre os agrossistemas locais.

Trabalhos como esses podem ser citados: Moreira *et.al.*(2007); que avalia a diversidade produtiva dos sistemas agrícolas em duas áreas de barragens subterrâneas; Oliveira *et.al.*(2007) avaliou a qualidade química da água em oito áreas de barragens subterrâneas e apontou algumas limitações agrícolas em função do impacto causado pela barragem, bem como a necessidade de manejo. Silva *et.al.*(2007), descreve a tecnologia e apresenta alternativas de manejo, principalmente em relação à salinização e preparação da área de plantio em função das condições criadas pela barragem. Outros trabalhos destacam o impacto social na agricultura familiar promovido pelo uso da técnica de barragens subterrâneas, como: Ferreira *et.al.*(2010) e Silva *et.al.*(2006).

4. ASPECTOS SOCIAIS

A Mesorregião do Sertão de Pernambuco é considerada a mais frágil economicamente do Estado. Alguns aspectos observados em SECTMA (1998) contribuem para esta situação na região. São eles: a utilização de métodos arcaicos de cultivo; plantio de culturas que não se adaptam ao clima semi-árido; tratos inadequados à exploração das culturas; e exploração ultra-extensiva da pecuária. Quanto aos recursos hídricos, alguns dos problemas, citados no mesmo trabalho, são: utilização irracional dos mananciais hídricos existentes; precariedade dos sistemas de abastecimento de água, os quais não acompanharam o crescimento das cidades; e formas inadequadas de escoamento de dejetos.

Em Afogados da Ingazeira, a maior parte dos imóveis rurais possui área inferior a 10 ha e produzem, principalmente, banana, castanha de caju, goiaba, laranja, limão e manga, em lavoura permanente; e batata doce, cebola, feijão, mandioca, milho e tomate, em lavoura temporária. A pecuária é representada pela produção de bovinos, ovinos, caprinos, frango, leite, ovos e mel de abelha (Prefeitura Municipal de Afogados da Ingazeira, s.d.).

Em sua maioria, as zonas urbanas dos municípios da Microrregião do Pajeú, são abastecidas por barragens no Rio Pajeú. A zona urbana de Afogados da Ingazeira, por exemplo, é abastecida pela Barragem Brotas, obra concluída em 1977 e que tem capacidade de armazenar 25.000.000 m³ de água (Prefeitura Municipal de Afogados da Ingazeira, s.d.).

Na zona rural utilizam-se, principalmente, poços rasos do tipo amazonas ou “cacimbões”. O Projeto Alto Pajeú (Silva, 1994) inventariou, no município de Afogados da Ingazeira, 54 poços deste tipo, os quais têm profundidade média de 6 à 7m, sendo construídos na maioria dos casos de alvenaria, com entrada de água pelo fundo do poço e explorados manualmente. Possuem, em geral, águas de boa qualidade para o consumo humano, com resíduo seco médio de 260mg/l.

Os poços tubulares, com exceção aos construídos na Bacia de Fátima no sul de Afogados da Ingazeira, comumente apresentam baixas vazões e altas taxas de salinidade. Também é bastante difundida a construção de açudes e pequenos reservatórios conhecidos com barreiros.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias de captação e armazenamento de água, apropriadas ao clima semiárido, vem sendo fomentado com a atuação protagonista de ONGs. Estas ações têm por princípio, além das questões relativas ao uso de água, a educação contextualizada no convívio com o semiárido.

Entre estas tecnologias, destacam-se as cisternas de placas, tanques de pedra e barragens subterrâneas. No entanto é necessário cautela ao acelerar o processo de implantação destas técnicas, pois elas induzem a práticas com as quais o pequeno produtor rural não tem tradição, e se mal manejadas, podem trazer alguns danos, à exemplo da agricultura irrigada.

5. FISIOGRAFIA

5.1. SOLOS E VEGETAÇÃO

Na região de Afogados da Ingazeira, segundo CPRM (2005), os solos são do tipo *Planossolos*, mal drenados, com fertilidade natural média e problemas de sais que ocorrem nos *Patamares Compridos e Baixas Vertentes* do relevo suave ondulado; solos *Brunos não Cálcicos*, ocorrendo nos *Topos e Altas Vertentes*, tipicamente rasos e com fertilidade natural alta; os *Podzólicos*, drenados e fertilidade natural média, ocorrem *Topos e Altas Vertentes* do relevo ondulado; e os solos *Litólicos*, que são rasos, pedregosos e com fertilidade natural média, característicos das *Elevações Residuais*.

O solo encontrado especificamente nas imediações do sítio Caiçara é descrito pela Embrapa (2004) como uma unidade composta por *Solos litólicos* tendo textura média, com cascalho; substrato de gnaisses e granitos; *Podzólicos vermelho-amarelo e varmelho-escuro* com textura média/argilosa, epipedregoso e não; e *Afloramentos de rocha*, na proporção de 40-30-30%, respectivamente.

O projeto ZAPE (Embrapa, 2004), identifica na área de estudo aptidão agrícola para pastagens plantadas e potencial médio para irrigação dos solos.

A vegetação é basicamente composta por *Caatinga Hiperxerófila* com trechos de *Floresta Caducifólia* (CPRM, 2005).

5.2. HIDROGRAFIA

A rede hidrográfica do Estado de Pernambuco é caracterizada por rios de pequena extensão, excetuando-se o Rio São Francisco. Parte desta rede escoar no sentido oeste-leste, desaguardo no Oceano Atlântico, sendo conhecidos como rios litorâneos. A outra parte escoar no sentido norte-sul e desaguardo no Rio São Francisco, constituindo os rios interiores, dentre os quais

está o Rio Pajeú. Os rios interiores são geralmente intermitentes, permanecendo secos durante todo o período de estiagem. (SECTMA, 1998).

O Rio Pajeú (Figura 6) nasce a uma altitude aproximada de 800m, na Serra da Balança, mais precisamente no município de Brejinho, norte da bacia. Em seu alto e médio curso tem sentido sudoeste, e o baixo curso corre para sul até o encontro com o Rio São Francisco. Neste trajeto o rio percorre aproximadamente 353 km, e embora seu regime fluvial seja intermitente, possui uma rede de drenagem bastante densa, (Salgueiro & Montenegro, 2008).

O estudo das potencialidades hídricas superficiais feito em SECTMA (1998) aponta que a Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú (BHRP) possui uma vazão média anual de 20,14m³/s e vazão específica de 1,2 l/s/km².

Quanto à disponibilidade hídrica, o que depende da infraestrutura hidráulica destinada à ativação das potencialidades hídricas, a BHRP possui 621,91x10⁶m³. Este valor considera tanto os açudes interanuais, com capacidade de acumulação superior a 500.000m³, quanto os açudes anuais, com capacidade menor que 500.000m³.

Já o Riacho Boa Vista (Figura 6), conhecido também com Curral Velho, tem seu curso principal para sul e compõem a BHRP. Seu afluente, no qual foi caracterizado o depósito aluvionar no presente estudo, tem seu curso no sentido leste/oeste e possui aproximadamente 1.700m desde as nascentes até a foz, com uma área de contribuição de 1235 km².

Na área de estudo também é possível notar (Figura 6) que o padrão de drenagens é principalmente do tipo retangular, no qual as linhas de drenagem estão encaixadas nos lineamentos estruturais, com direção preferencial NE.

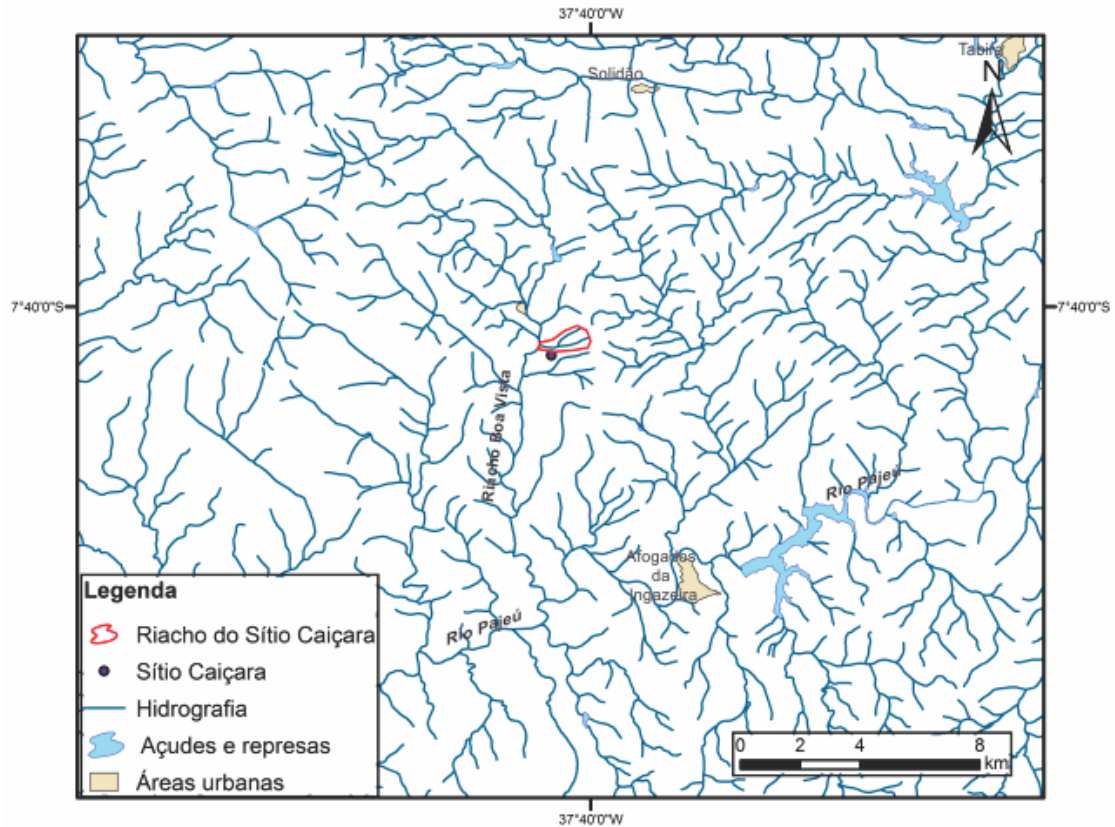


Figura 6. Rede hidrográfica na região de estudo. Modificado de CPRM (2009).

5.3. CLIMA

O semiárido nordestino tem como característica climática a irregularidade espaço-temporal das precipitações pluviométricas. Elas ocorrem em cerca de quatro meses de período chuvoso, de janeiro a abril normalmente, onde chega-se a registrar 60, 70 e até 75% da chuva de todo o ano (SECTMA, 1998). Segundo Andrade (1977) é a área territorial brasileira de mais baixos índices de nebulosidade, de mais intensa insolação e de mais elevadas taxas de evapotranspiração.

A área de estudo localiza-se na Microrregião Geográfica do Pajeú, a qual tem o período chuvoso nos meses de fevereiro a maio (Lacerda *et. al.*, 1994), condicionado pelo deslocamento anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico que atua nessa área. A ZCIT é formada pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte (alísios de nordeste) e os do hemisfério sul (alísios de sudeste) (SECTMA, 1998).

Os totais pluviométricos anuais nesta região oscilam entre 500 e 800 mm por ano, à exceção do município de Triunfo, o qual apresenta uma média histórica anual de precipitação de 1227,6 mm. No município de Afogados da Ingazeira, o valor médio é de 600 mm. (SUDENE, 1990).

Um aspecto climático importante no semiárido nordestino são os fenômenos de veranico, que elevam as taxas evaporativas causando grande impacto nos recursos hídricos e consequentemente na agricultura (Soares & Nóbrega, 2009).

Na Microrregião Geográfica do Pajeú, segundo Soares & Nóbrega (2009), está ocorrendo uma tendência de aumento do tamanho máximo e do tamanho médio dos veranicos, quando analisadas as séries históricas de precipitação em seis diferentes postos pluviométricos, no período entre 1965 e 2004. Ou seja, as chuvas, nessa área, estão se tornando mais concentradas, e os períodos secos intercalados entre esses episódios de chuva estão se tornando maiores. No entanto, os autores ressaltam que não se pode afirmar que a Microrregião do Pajeú está se tornando mais seca, e que é necessário analisar as variabilidades climáticas em escalas temporais distintas, como intrassazonais, interanuais e interdecadais.

Na Tabela 1 estão listados os valores mensais de precipitação das três estações pluviométricas de Afogados da Ingazeira, e as médias entre eles, para os anos de 2010 e 2011.

Tabela 1. Pluviometria em Afogados da Ingazeira do período de janeiro de 2010 a novembro de 2011. Fonte: Lamepe/INPE e APAC.

MÊS	Estações Precipitação (mm)			Média (mm)
	brotas	ipa	pcd	
jan/10	120,20	145,00		132,6
fev/10	58,50	62,00		60,2
mar/10	30,50	41,00		35,7
abr/10	122,00	147,00		134,5
mai/10	1,50	1,50	0	1
jun/10	72,70	74,70	73,2	73,5
jul/10	15,70	17,50	15,8	16,3
ago/10	0,00	0,00	0,2	0,06
set/10	0,00	0,00	1,2	0,4
out/10	162,20	185,50	191,8	179,8
nov/10	0,00	0,00	0	0
dez/10	37,40	29,50	28,4	31,7
jan/11	183,10	217,00	108,8	169,6

fev/11	276,20	253,50	226,4	252
mar/11	37,10	43,20	41,2	40,5
abr/11	149,60	145,50	150,6	148,5
mai/11	221,20	210,70	204,4	212,1
jun/11	40,00	37,50	0	25,8
jul/11	22,50	19,00		20,7
ago/11	9,20	5,00		7,1
set/11	0,00	0,00		0
out/11				14,4
nov/11				13

As temperaturas médias oscilam entre 23 e 27°C, valores medidos pela estação meteorológica de Serra Talhada, a mais próxima do município de Afogados da Ingazeira (SECTMA, 1998).

Segundo Moraes (1999), a evapotranspiração real média na região é de 688,2 mm/ano, determinada efetuando-se a aplicação do método do Balanço Hídrico Mensal (Thornthwaite & Mather, 1955).

Tabela 2. Balanço hídrico mensal - Estação Afogados da Ingazeira (valores em mm)

	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Totais
P	101,1	154,8	123,3	53,0	30,8	19,5	7,9	3,3	6,3	11,3	30,3	57,6	591,9
ETP	184,8	164,3	138	117,8	102,0	111,6	117,8	162,0	198,4	210,0	217,0	204,6	1.928,3
P - ETP	- 83,7	-9,5	-14,7	-64,8	-71,2	-92,1	-109,9	-158,7	-192,1	-198,7	-186,7	-147,0	
Reserva utilizável	0,0	90,5	100	35,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
ETR	101,1	154,8	123,3	53,0	66,0	19,5	7,9	3,3	6,3	11,3	30,3	57,6	688,2
Excedente	-	-	5,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Déficit	83,7	-	-	64,8	71,2	92,1	109,9	158,7	192,1	198,7	186,7	147,0	1.304,9

Fonte: Pluviometria – BRASIL-SUDENE, 1990. Evapotranspiração Potencial - Cunha & Millo, 1984. Moraes(1999)

6. CONTEXTO GEOLÓGICO

6.1. GEOMORFOLOGIA

Na compartimentação do relevo da Microrregião do Pajeú destacam-se o Planalto da Borborema, ao norte, com altitudes que variam entre 500 e 1000 m, e a Depressão Sertaneja, na parte central e sul, variando de 200 a 500 m de altitude, onde, por vezes, surgem maciços residuais (Jatobá, 1999).

A área de estudo está inserida na unidade da Depressão Sertaneja, que representa a paisagem típica do semiárido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave-ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Ocorrem também algumas elevações residuais e cristas. Esses relevos isolados testemunham os ciclos intensos de erosão que atingiram grande parte do sertão nordestino (CPRM, 2005).

6.2. LITOLOGIAS

A área de estudo localiza-se no contexto tectônico regional da Província da Borborema, no Domínio da Zona Transversal definido por Santos (1999), mais especificamente no Terreno Alto Pajeú, o qual é composto por uma sequência metassedimentar (Complexo São Caetano) cortada e intercalada por dezenas de corpos tabulares e pequenos stocks de ortognaisses (Brito Neves, 2005).

No que diz respeito às litologias aflorantes, 90% do território do município de Afogados da Ingazeira, é composto por rochas cristalinas, agrupadas nas seguintes unidades: Complexo Gnáissico-Migmatítico, Complexo Irajá, Complexo Sertânia e Granitóides (Veiga Jr., 1990).

O Complexo Gnáissico-Migmatítico é considerado a unidade do Pré-Cambriano de maior representação no Estado de Pernambuco. Compreende principalmente granitos, granodioritos,

gnaisses, e gabros. Estende-se numa faixa contínua desde as proximidades norte e sudoeste de Arcoverde até o extremo oeste do Estado, onde faz limite com o Complexo Migmatítico - Granitóide através da falha transcorrente que constitui o Lineamento Pernambuco (Embrapa, 2004).

O Complexo Irajá é constituído por uma sequência metavulcano-sedimentar contendo intrusivas básicas (Gomes, 2001).

O Complexo Sertânia é formado, essencialmente, por granada-biotita gnaisses com ou sem sillimanita, com intercalações de mármore, xisto vulcanoclástico e algum quartzito, rocha calcissilicática e anfibolito. Essas rochas são penetradas por intrusões graníticas tabulares (Cariris Velhos?) e migmatizadas em maior ou menor grau, abrangendo fácies estromáticas, frequentemente dobradas, as quais evoluem para tipos *schlieren* (Santos, 2004).

Ocorre também, no extremo sul do município, uma área de 38km² onde afloram arenitos de granulometria fina à média com intercalações de finas lentes de granulometria grossa à conglomerática referentes à Formação Tacaratu da Bacia de Fátima (Silva, 1994).

A Bacia de Fátima possui forma ovalada no sentido SW-NE, onde se destaca um relevo acidentado na borda SE e um relevo plano ondulado na porção central e NW. Está mapeada como Formação Tacaratu (Siluro-Devoniano) em 70% da área, e Unidade Fátima (Tércio-Quaternário) em 30% da área (Leite, 2000). Regionalmente a Formação Tacaratu é descrita como arenitos esbranquiçados a róseos, médios a grosseiros, heterogêneos, de grãos subangulosos e subarredondados, por vezes pintalgado de caulim e até com níveis caulíníticos, diagênese forte, configurando-se num aquífero livre de boa potencialidade. (Feitosa & Vidal, 2004). A Unidade Fátima é descrita como sedimentos inconsolidados com seixos de quartzo, arenito e embasamento cristalino, e matriz areno-argilosa (Leite, 2000).

Os depósitos aluvionares, ocupam uma área de cerca de 20km² no município de Afogados da Ingazeira, ocorrendo nas margens de rios e riachos da região, localmente conhecidos como “baixios”. Destacam-se os aluviões associados ao Rio Pajeú, com largura máxima de 150m, e aos riachos dos Santos, Tabira, Boa Vista ou Curral Velho e Pajeú-Mirim, com larguras que não ultrapassam 100m. Estes depósitos são utilizados na agricultura de várzea, em especial por pequenos agricultores, os quais captam água por meio de poços do tipo “cacimbão” e barragens subterrâneas para a irrigação das culturas (Silva, 1994).

6.3. HIDROGEOLOGIA

No município de Afogados da Ingazeira, os poços tubulares perfurados nas unidades do embasamento cristalino possuem vazão de exploração média de 1,5m³/h e quantidade total de sólidos totais dissolvidos variando de 500mg/l a 900mg/l (Silva, 1994).

No extremo sul do município existem poços tubulares captando água do Aquífero Tacaratu (Bacia de Fátima). Segundo Leite (2000), este aquífero apresenta boa condutividade hidráulica e espessuras de até 500m, podendo ser livre ou semi-confinado. Os parâmetros hidrodinâmicos deste aquífero, em algumas localidades, podem ser vistos na Tabela 3. Seu escoamento se dá no sentido SE-NW, com gradiente hidráulico de aproximadamente 5m/km. Costa (2006) calculou o volume de recarga de $11,4 \times 10^6$ m³/ano, reserva reguladora de $16,2 \cdot 10^6$ m³/ano e reserva permanente de $3,99 \cdot 10^9$ m³.

Tabela 3. Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Tacaratu na Bacia de Fátima. Modificado de Costa et.al. (2006).

Local dos testes	T (m ² /s)	K(m/s)	S
Vila de Fátima	$4,97 \cdot 10^{-4}$	$9,59 \cdot 10^{-7}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$
Lagoa do Caroá	$9,80 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-7}$	$4,66 \cdot 10^{-4}$
Manicoba	$8,93 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-7}$	$8,89 \cdot 10^{-4}$

Segundo (Feitosa & Vidal, 2004), a exploração do Aquífero Tacaratu na Bacia de Fátima já começa a se dar com certa intensidade, começando a causar preocupações das entidades governamentais. Também existe risco de contaminação em áreas de alta vulnerabilidade (zonas de recarga).

Três poços perfurados nesse aquífero no município de Afogados da Ingazeira variam a profundidade de 64 a 95 metros, não atingindo o embasamento cristalino. A vazão específica de dois destes poços é de 0,176 e 0,16m³/h/m, e a transmissividade, obtida a partir de testes de bombeamento efetuados pela CISAGRO, é da ordem de $2,1 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Quanto aos depósitos aluvionares, o Projeto Proaluv (CPRM, 2009), trabalhando nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco fornece algumas informações regionais sobre esse tipo de aquífero, tais como:

- em média as espessuras dos materiais perfurados nas aluviões são constituídas por 64% de camadas de areia, 30% de camadas de argila e 7% de camadas de silte.
- para o pacote completo de aluvião, a espessura média é de 5,36 m.

Um breve diagnóstico da potencialidade dos aluviões foi feito pelo projeto acima citado, baseando-se na área de ocorrência:

- potencialidade muito fraca: 33% das folhas mapeadas (131) apresentam menos de 45 km² de aluvião;
- potencialidade fraca: 33% com ocorrência de aluviões variando de 45 km² até 127 km²;
- potencialidade média: 29% das folhas, nas quais a ocorrem aluviões em áreas entre 127 km² e 257 km²;
- potencialidade elevada: 5% onde os aluviões encontrados ocupam áreas variáveis de 257 km² até 588 km².

A folha de Afogados da Ingazeira, na qual está inclusa a área de estudo deste trabalho, foi mapeada uma área de aluviões entre 50 e 100 km², sendo enquadrada como potencialidade fraca.

A pesquisa de Silva (1994), através de seções transversais de sondagem, identificou que os aluviões dos Riachos Boa Vista, do qual o riacho da área de estudo é afluente, e Pajeú-Mirim são compostos, basicamente, de areias grossas com eventuais níveis conglomeráticos e águas de excelente qualidade, com exceção a uma amostra do Riacho Pajeú-Mirim que apresentou alta salinidade, na época em que o estudo foi realizado. Também foi estimada, em termos médios, uma reserva de 30.000m³/km de aquífero aluvionar dos riachos acima citados, sem considerar qualquer recarga. Nas duas áreas pesquisadas no Riacho da Boa Vista, foram feitas 37 sondagens que atingiram profundidade média de 4,5m, com espessura saturada de 1,86m e água com resíduo seco médio de 278mg/l.

7. SÍTIO CAIÇARA

O sítio Caiçara localiza-se aproximadamente 10 km à norte da área urbana do município de Afogados da Ingazeira, seguindo pela estrada que leva ao povoado de Ibitiranga.

Na primeira etapa de campo (set/2010, ver item 2.2), observou-se que as principais culturas são o milho e o feijão, ocupando uma área de aproximadamente 4.100 m², servindo para subsistência e venda do excedente de produção em um sistema de cooperativa, segundo informações verbais dos próprios agricultores. Secundariamente cultivam-se frutíferas como mangueiras, laranjeiras e coqueiros. O restante da área é destinado a caprinocultura e a pastagem para produção de forragem.

Também foi constatado que a localidade dispõe de três cacimbas, das quais apenas uma (6m de profundidade) é equipada com bomba, utilizando a água para a irrigação feita por aspersão, usos domésticos e dessedentação animal (Figura 7A). Das outras duas cacimbas, uma (6m de profundidade) encontra-se desativada (Figura 7B) e parcialmente fechada sem motivo aparente, e a outra (2,5m de profundidade), localizada imediatamente a montante de uma barragem subterrânea mal sucedida construída na década de 80 (Figura 7C), encontra-se aberta e sem estrutura de captação. A causa para o insucesso da antiga barragem é, provavelmente, o fato de o septo impermeável não ter sido suficientemente extenso a ponto de cortar todo o depósito aluvionar, barrando apenas parcialmente o fluxo subterrâneo de água. Este fato foi constatado durante a etapa de campo e a partir de informações verbais sobre a localização da barragem.

A captação de água para consumo humano se dá através de uma cisterna com capacidade de 56m³.



Figura 7. Cacimbas localizadas no sítio Caiçara.

Alguns aspectos importantes relacionados ao uso da água no sítio Caiçara, observados um ano após a construção da barragem subterrânea, na segunda etapa de campo (set/2011; ver item 2.2), são descritos a seguir.

Foi construída uma caixa d'água (Figura 8A) com capacidade de armazenamento de 4m^3 , a qual será ampliada para $5,6\text{m}^3$, e é cheia a cada 3 ou 4 dias. A caixa d'água tem por finalidade o fornecimento de água para irrigação por gotejamento (Figura 8B) em uma área do sítio onde antes era praticado apenas plantio de sequeiro, principalmente milho. Nesta área houve um aumento e diversificação da produção agrícola, com o plantio de batata, feijão e algumas frutíferas e condimentares. Também há uma área onde ocorre irrigação por aspersão, com o plantio de milho, feijão e coco (Figura 8C).

O uso de água proveniente do depósito aluvionar no sítio Caiçara é de aproximadamente 7m^3 por dia, somando-se irrigação, dessedentação animal e uso doméstico.

A criação animal restringe-se à bovinocultura, não havendo mais caprinocultura, quando comparado com set/2010, e começou-se a fazer o beneficiamento de frutas, com o auxílio de uma máquina que extrai a polpa, resultando em um aproveitamento muito maior da produção.

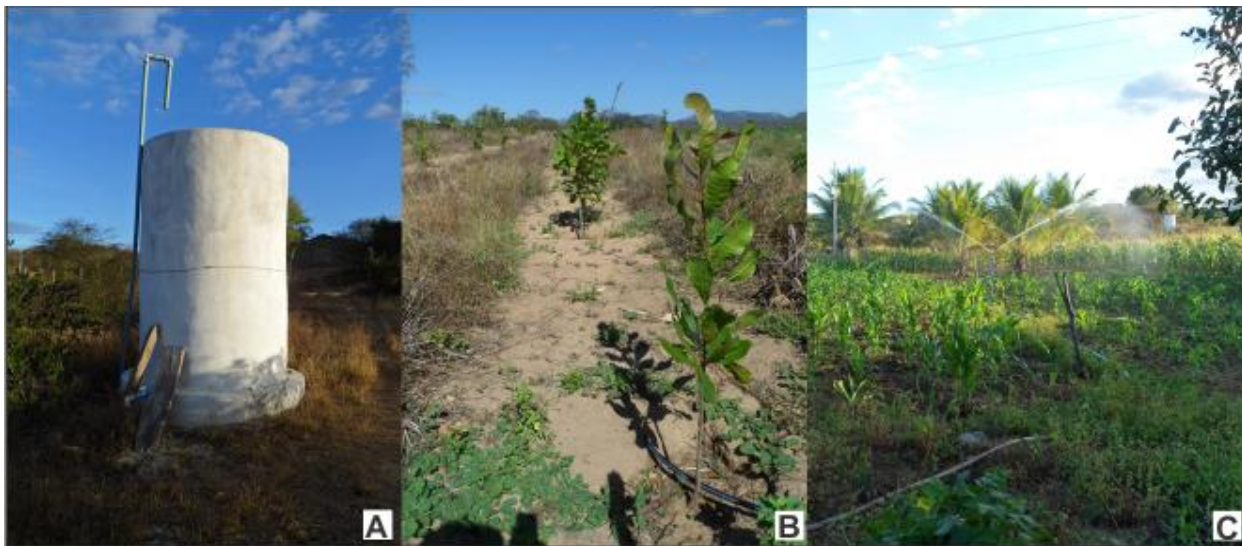


Figura 8. Caixa d'água e irrigação no sítio Caiçara.

8. RESULTADOS

8.1. DELIMITAÇÃO DO ALUVIÃO

O Projeto Proaluv (CPRM, 2009), delimitando aluviões com base em imagens orbitais, ressalta que o estabelecimento de bio-indicadores da litologia pode levar a erros na delimitação, visto que algumas culturas irrigadas, que jazem sobre coberturas não aluvionares, podem ser interpretadas como parte da mancha de aluviões. Também pode ser difícil a distinção entre bancos de areias e afloramentos de rocha. Portanto, conclui-se que, em estudos de detalhe, o controle de campo é a alternativa mais segura de delimitação do depósito, e nas proximidades do eixo da barragem subterrânea este foi o procedimento de demarcação do contato lateral do aluvião com o embasamento cristalino. Nas porções restantes o critério utilizado foi a diferença de tonalidades da vegetação e do solo vista no mosaico de imagens do software *Google Earth*.

Na Figura 9 é mostrada a delimitação do aluvião no sítio Caiçara.

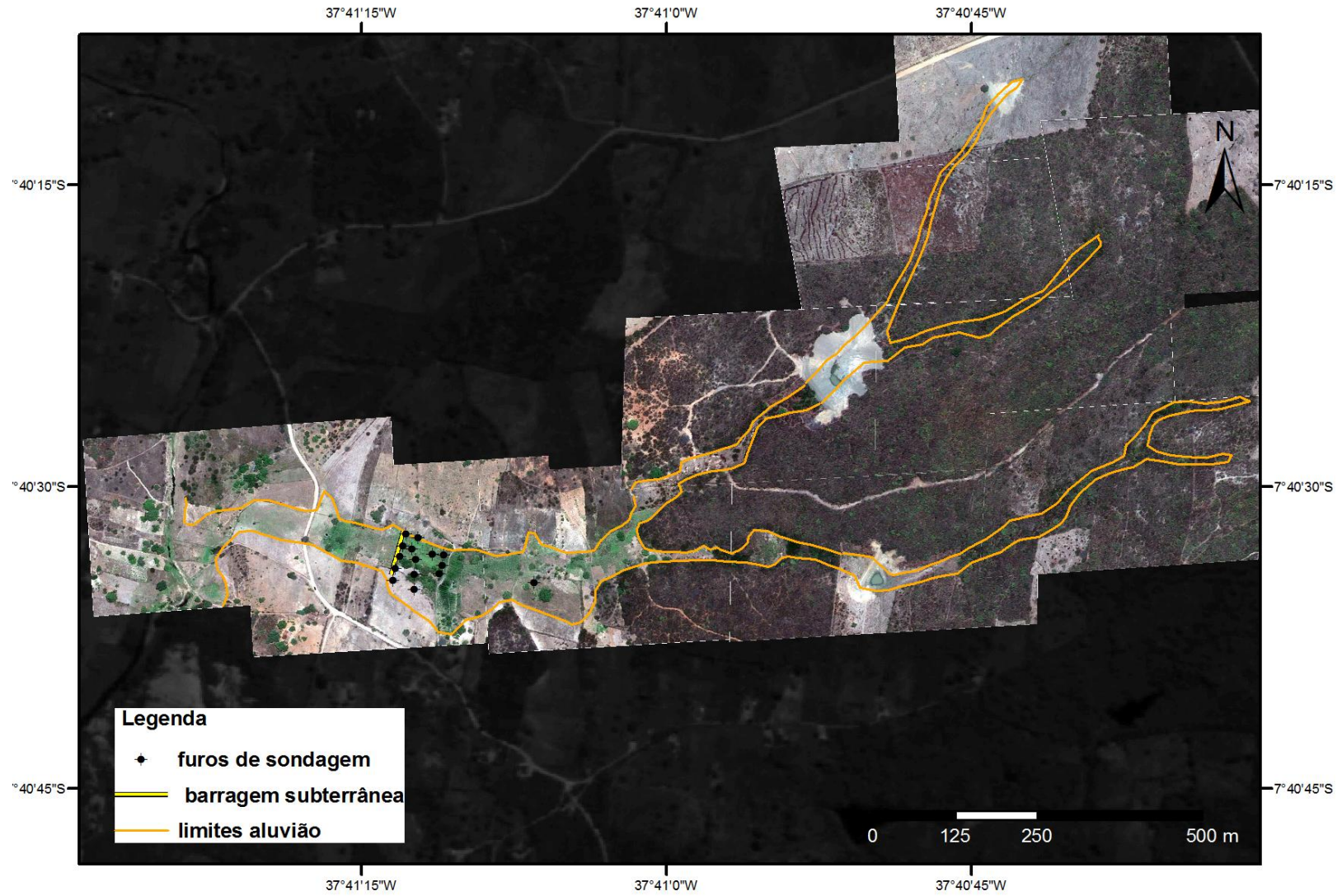


Figura 9. Delimitação do depósito aluvionar no sítio Caiçara.

O depósito aluvionar estudado encontra-se em cota variando de 549 à 600m, com comprimento, das nascentes à foz do riacho, de aproximadamente 1.500m, valores obtidos pelo software *Google Earth*. Também foi calculada, com o auxílio do *Arcgis 9.2*, a área de contribuição da bacia de 1,4 km².

A declividade fica na ordem de 4% na porção entre as nascentes e junção dos afluentes (cursos de primeira ordem), valor estimado utilizando as imagens *Google Earth*. Na porção entre a junção dos afluentes e o curso principal do Riacho Boa Vista, na qual o aluvião possui maior largura, a declividade é em média de 1,4%, valor estimado a partir do nivelamento com mangueira executado em campo e condizente com o valor calculado utilizando as imagens *Google Earth*.

A relação da declividade com o uso da técnica de barragem subterrânea é detalhado no item 8.9.1.4.

8.2. DESCRIÇÃO SEDIMENTOLÓGICA

A constituição, largura e espessura dos depósitos aluviais, dependem basicamente dos níveis energéticos do ambiente deposicional fluvial da sua formação, da constituição e resistência da rocha erodida e dos condicionantes estruturais como falhas, fraturas e dobras. Portanto, este tipo de depósito possui características texturais muito variadas, tornando a distribuição das propriedades hidráulicas do aquífero aluvionar muito heterogênea (CPRM, 2008).

Os sedimentos foram descritos em campo, e subdivididos quando observadas mudanças texturais significativas. A síntese das descrições dos sedimentos em campo, a partir de cada furo de sondagem encontra-se no APÊNDICE I, e na coluna de observação o motivo pelo qual algumas sondagens não atingiram o embasamento.

O aluvião estudado possui mudanças faciológicas, tanto laterais como verticais e, portanto, um caráter heterogêneo e anisotrópico, e para o melhor entendimento destas mudanças, os sedimentos foram aqui agrupados em fácies.

Em síntese, os sedimentos variam de areias moderadamente selecionadas de granulometria fina à média, de cor castanho (Fácies 1) (Figura 10A), no topo do pacote, à areias de granulometria muito fina a fina com matriz silto-argilosa, com coloração variando de castanho à cinza, na porção basal, dispostas aparentemente na forma de lente (Fácies 2). Esta segunda

fácies pode ser vista na Figura 10B formando agregados devido à natureza silto-argilosa da matriz.

Na base da sondagem B14 (Figura 10C) foi descrita uma amostra de areia de textura grossa com grânulos e matriz siltosa, de cor cinza (Fácies 3). Provavelmente este sedimento corresponde ao *paleo-vale* dessa drenagem, situação comum em depósitos aluvionares. Segundo Costa (2004), isso ocorre pelo fato de o vale fluvial normalmente ter forma de “V”, ficando a parte mais profunda com menor largura e proporcionando maior velocidade ao rio, depositando sedimentos de textura mais grossa.

Também ocorre uma fácies argilosa com alta coesão e plasticidade, e cor cinza escuro, muitas vezes intransponível para o trado manual (Fácies 4). Na Figura 10D, pode ser visto o aspecto litificado da amostra deste sedimento, quando seco.

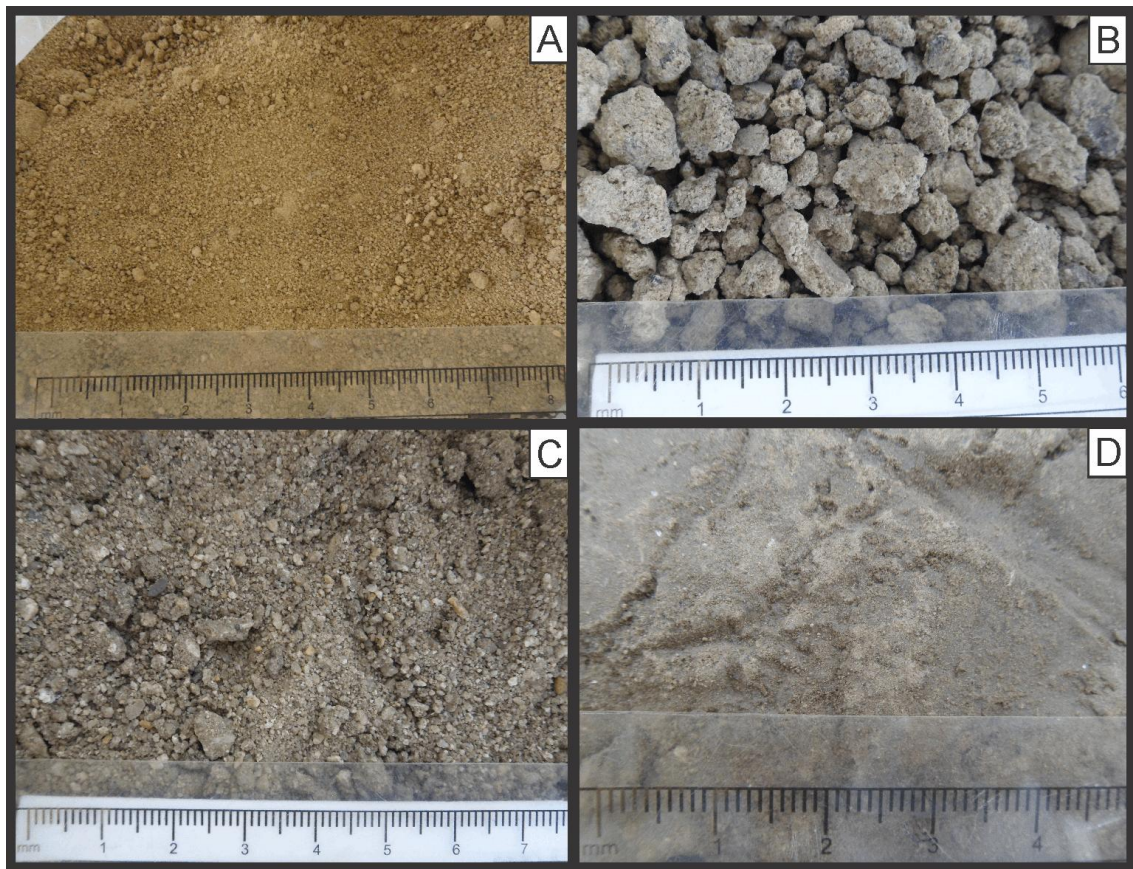


Figura 10. Amostras representativas das fácies descritas.

8.3. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

A distribuição granulométrica de um sedimento está relacionada às dinâmicas de transporte e deposição geradoras do depósito inconsolidado ou rocha. Sua representação tem um papel fundamental na caracterização sedimentológica, pois permite visualizar as populações de partículas que compõem o sedimento e, a partir daí, fazer previsões preliminares do seu comportamento hidrogeológico. As representações gráficas aqui utilizadas foram as curvas granulométricas de frequências acumuladas (Figura 11), confeccionadas com o auxílio do software *Grapher 8*, a partir do resultado das análises descritas no item 2.4 que geraram a porcentagem de cada fração granulométrica em cada amostra coletada.

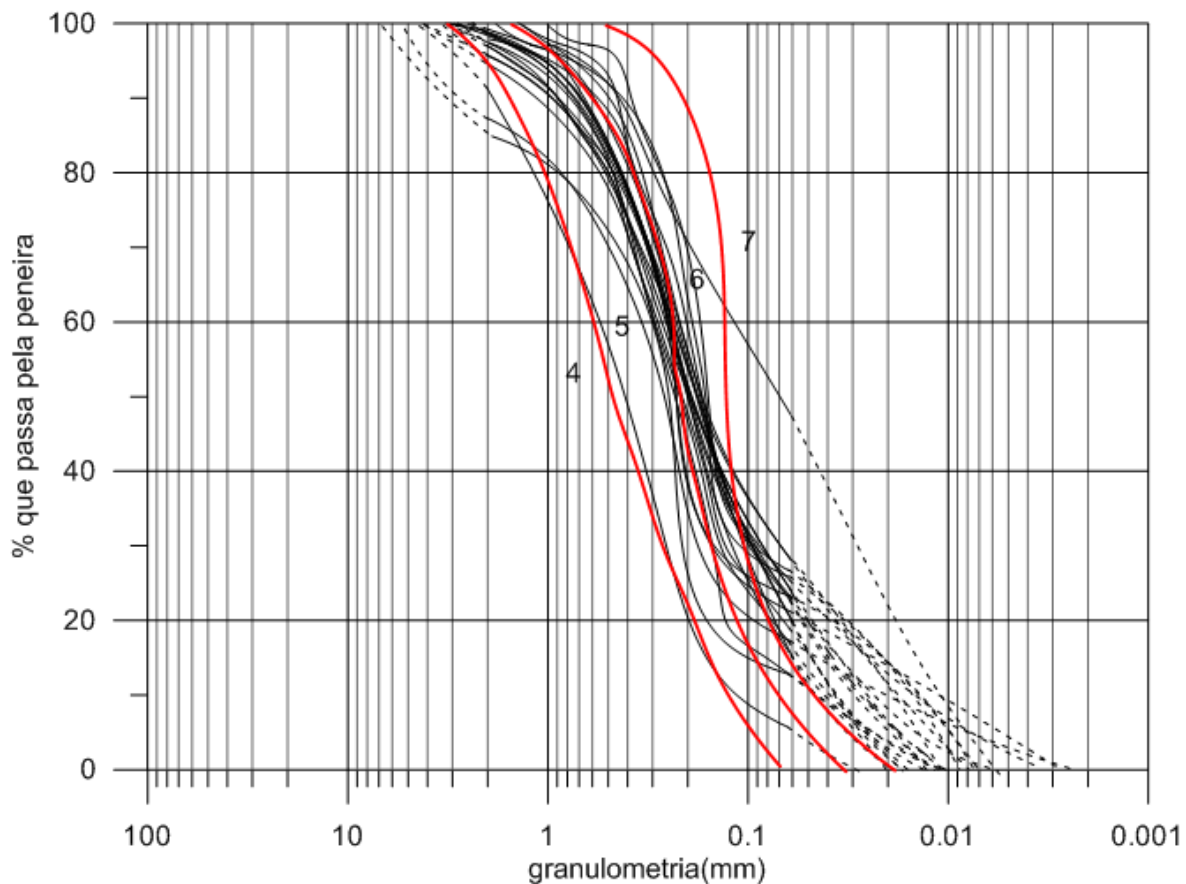


Figura 11. Curvas granulométricas das amostras analisadas (em preto), e as classes de Breddin, utilizadas para a estimativa de K (campos numerados e divisórias em vermelho), nas quais elas se enquadram.

8.3.1. Média gráfica

De posse das curvas granulométricas, se podem determinar alguns parâmetros básicos que auxiliam na caracterização do sedimento.

A partir da definição da tendência central de distribuição granulométrica é possível designar a fração granulométrica mais abundante, ou seja, o tamanho de grão mais frequente em determinada amostra, o que é de interesse quando se quer denominar um sedimento inconsolidado. A terminologia adotada para intervalos de tamanho de grão foi a proposta por Pettijohn & Potter (1987) (Figura 12).

		US Standard sieve mesh	Millimeters	Phi (ϕ) units	Wentworth size class
GRAVEL			4096	-12	
			1024	-10	Boulder
			256	-8	
			64	-6	Cobble
			16	-4	
			4	-2	Pebble
	5			-1.75	
	6		3.36	-1.5	
	7		2.83	-1.25	Granule
	8		2.38	-1.0	
SAND	10		2.00	-0.75	
	12		1.68	-0.5	Very coarse sand
	14		1.41	-0.25	
	16		1.19	0.0	
	18		1.00	0.25	
	20		0.84	0.5	Coarse sand
	25		0.71	0.75	
	30		0.59	1.0	
	35		0.50	1.25	
	40		0.42	1.5	Medium sand
	45		0.35	1.75	
	50		0.30	2.0	
	60		0.25	2.25	
	70		0.210	2.5	
	80		0.177	2.75	Fine sand
	100		0.149	3.0	
	120		0.125	3.25	
	140		0.105	3.5	
	170		0.088	3.75	Very fine sand
	200		0.074	4.0	
MUD	SILT	230	0.0625	4.25	
		270	0.053	4.5	Coarse silt
		325	0.044	4.75	
			0.037	5.0	
			0.031	5.5	
			0.0156	6.0	Medium silt
	CLAY		0.0078	6.5	
			0.0039	7.0	Fine silt
			0.0020	7.5	
			0.00098	8.0	Very fine silt
			0.00049	8.5	
			0.00024	9.0	Clay
			0.00012	9.5	
			0.00006	10.0	

Figura 12. Intervalos de tamanho de grão. Modificado de Pettijohn & Potter (1987)

Folk & Ward (1957, in Pettijohn & Potter (1987)) propuseram uma formulação, referenciada como Média Gráfica (Mz) (ou *mean*). Trata-se de um método gráfico de estimativa da tendência central, utilizando-se valores obtidos nas curvas granulométricas de frequência acumulada:

$$Mz = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$$

Onde o valor φ_x correspondente a x% do material que passa na peneira, na distribuição na curva de frequência acumulada (Figura 11). A partir do cálculo deste parâmetro em cada curva granulométrica, as amostras foram classificadas quanto ao tamanho de grão (Tabela 3).

A classificação granulométrica utilizando a Média gráfica (Mz) demonstrou que, entre os sedimentos do aluvião estudado, predomina areia fina e, secundariamente, areia média. Uma análise crítica permite constatar que as amostras cujas classificações se enquadram em areia grossa, podem ter tido o resultado influenciado por grãos provenientes do embasamento cristalino, quando da coleta das amostras com o trado manual, visto que são amostras da profundidade basal de cada sondagem, e foram descritas no campo como areia fina à média. A exceção ocorre na amostra B14c, na qual a sondagem não alcançou o embasamento, e se verificou no campo que se trata de um sedimento de granulometria grossa.

8.3.2. Coeficiente de uniformidade

Outro parâmetro que pode ser obtido e que expressa a dispersão de tamanhos de grão na amostra ou grau de seleção, é o coeficiente de uniformidade. Este aspecto é ilustrado pela inclinação das curvas granulométricas, sendo que quanto mais inclinada, menor o grau de seleção (mais desuniforme).

O coeficiente de uniformidade de Hazen (Custódio e Llammas, 1976) é definido como:

$$f = d_{60}/d_{10}$$

Onde d_{60} é o diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica e d_{10} é o diâmetro de grão correspondente aos 10% nesta curva.

Segundo ABNT (1995), os solos são classificados quanto ao coeficiente de uniformidade em:

- a) uniformes, quando $f < 5$;
- b) medianamente uniformes, quando $5 < f \leq 15$;
- c) desuniformes, quando $f > 15$.

É importante ressaltar que os valores de d_{10} foram calculados a partir dos trechos inferidos das curvas, linhas tracejadas na Figura 11, o que confere um erro na estimativa do coeficiente de uniformidade.

A maioria das amostras pode ser classificada como medianamente uniforme. O valor deste parâmetro tem uma implicação direta no resultado de K obtido pela metodologia de Breddin (1963), uma vez que quanto maior o coeficiente f (mais desuniforme), menos fidedigno será o resultado, pois a curva granulométrica abrangerá várias classes de condutividade hidráulica.

8.3.3. Estimativa da condutividade hidráulica

Para a estimativa da condutividade hidráulica (K) de cada amostra, foi utilizado o método proposto por Breddin (1963), no qual se classifica os materiais detríticos não consolidados de acordo com a representação gráfica da composição (curva granulométrica), constituída por 12 classes conhecidas como curvas de Breddin (Figura 13). A cada classe corresponde um valor médio estimado para K , variável entre 2600 m/dia (classe 1), para depósitos constituídos por sedimentos com dimensões variáveis entre 1 e 100 mm, e valores inferiores a 0,008 m/dia, quando composto por sedimentos com dimensões variáveis entre 0,1 mm e menores de 0,001 mm, (classe 12) (Custódio e Llammas, 1976).

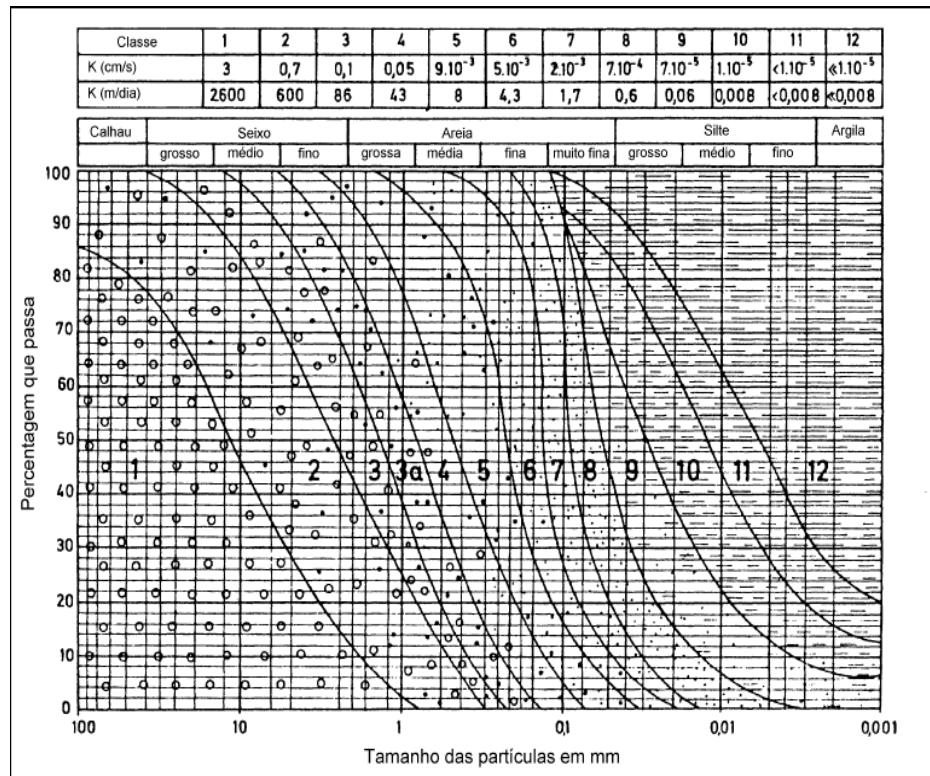


Figura 13. Curvas granulométricas de Breddin, para estimativa de condutividade hidráulica. Modificado de Custódio e Llamas (1976).

Na Figura 11, se pode observar o enquadramento das curvas granulométricas das amostras analisadas (em preto) nas classes de Breddin (divididas pelas linhas vermelhas), sendo que os números (4, 5, 6 e 7) representam as classes pertinentes à análise. As linhas tracejadas nas extremidades das curvas significam os trechos inferidos, visto que as malhas das peneiras utilizadas variam de 2 mm a 0,062mm. No APÊNDICE II estão discriminadas as curvas de frequência acumulativa de cada amostra.

Nota-se que as curvas apresentam comportamentos semelhantes, tanto na inclinação, o que reflete o grau de seleção do sedimento, quanto no enquadramento nas classes, na maioria entre a 5 e 6.

Breddin (1963) estabeleceu empiricamente as seguintes condutividades hidráulicas para cada classe:

- Classe 4: $5 \cdot 10^{-4}$ m/s;
- Classe 5: $9 \cdot 10^{-5}$ m/s;
- Classe 6: $5 \cdot 10^{-5}$ m/s;
- Classe 7: $2 \cdot 10^{-5}$ m/s

Para as curvas que ocupam mais de uma classe, o que ocorreu na maioria dos casos, foram estabelecidos valores médios de condutividade hidráulica (K), como recomendado pela metodologia utilizada.

Quanto à condutividade hidráulica (K), o valor médio encontrado é de, aproximadamente, $6,6 \cdot 10^{-5}$ m/s, o que é bastante razoável para o tipo de sedimento analisado. Segundo Fetter (1988), as areias bem selecionadas apresentam K na faixa de 10^{-3} a 10^{-5} m/s, e as areias finas e siltosas na ordem de 10^{-5} a 10^{-7} m/s.

A Tabela 4 sintetiza os resultados obtidos para cada amostra analisada.

Tabela 4. Síntese dos resultados obtidos por meio das análises granulométricas.

Amostras	Profundidade de coleta(m)	Mz (mm)	Classe granulométrica	Coefficiente de uniformidade (f)	Classificação ABNT (1995)	Classes de Breddin (1963)	K(m/s)
B1	1	0,247	Areia fina	5,63	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B2a	0,5	0,254	Areia média	22,8	desuniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B2b	1	0,249	Areia fina	10,64	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B2c	1,8	0,514	Areia grossa	16,82	desuniforme	5	$9 \cdot 10^{-5}$
B3a	1	0,298	Areia média	7,63	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B3b	2	0,323	Areia média	7,53	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B4a	1	0,312	Areia média	10,23	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B4b	2	0,286	Areia média	10,15	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B7a	1	0,163	Areia fina	13,6	mediamente uniforme	6-7	$3 \cdot 10^{-5}$
B7b	2	0,165	Areia fina	11,58	mediamente uniforme	6-7	$3 \cdot 10^{-5}$
B7c	3	0,205	Areia fina	8,02	mediamente uniforme	6-7	$3 \cdot 10^{-5}$
B8a	1	0,289	Areia média	6,5	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B8b	2	0,234	Areia fina	6,83	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B9a	0,8	0,191	Areia fina	11,76	mediamente uniforme	6-7	$3 \cdot 10^{-5}$
B9b	1,8	0,142	Areia fina	10,68	mediamente uniforme	6-7	$3 \cdot 10^{-5}$
B9c	2,1	0,244	Areia fina	8,38	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B10a	1	0,233	Areia fina	17,78	desuniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$

Amostras	Profundidade de coleta(m)	Mz (mm)	Classe granulométrica	Coefficiente de uniformidade (f)	Classificação ABNT (1995)	Classes de Breddin (1963)	K(m/s)
B10b	2	0,633	Areia grossa	6,71	mediamente uniforme	5	$9 \cdot 10^{-5}$
B11	1	0,213	Areia fina	4,39	uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B12a	1	0,273	Areia média	6,5	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B12b	2	0,279	Areia média	5,93	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B14a	1	0,255	Areia média	6,4	mediamente uniforme	5-6	$7 \cdot 10^{-5}$
B14c	2,7	0,660	Areia grossa	4,82	uniforme	4-5	$2 \cdot 10^{-4}$

A amostra B14b não foi trabalhada pelo fato de ter grande teor de argila, o que impossibilitaria a análise granulométrica com a metodologia utilizada.

8.4. PERFIS DE SONDAGEM

A partir dos furos de sondagem realizados em campo, foi possível construir seções transversais e longitudinais ao aluvião, com o intuito de compreender a distribuição dos estratos e a geometria do aquífero (Figuras 14 e 15).

Devido ao caráter heterogêneo do aluvião, os sedimentos foram agrupados em fácies, as quais são descritas no item 8.2. Nos perfis se podem visualizar as relações verticais e horizontais entre elas.

A fácies 1, descrita como areia fina à média, é o sedimento mais frequente e aparece em todas as seções no topo do depósito de forma contínua lateralmente, sendo que em algumas sondagens foi a única fácies encontrada.

Já a fácies 2, descrita como areia fina com matriz argilosa, encontra-se na porção basal e de forma descontínua, não sendo observada em algumas sondagens. Possivelmente estes sedimentos mais finos estão dispostos na forma de lente.

O sedimento argiloso, descrito como fácies 4 no item 8.2, na maioria das vezes apresentou-se intransponível para o trado manual, interrompendo as sondagens. Segundo informações dos agricultores do local, esta camada é encontrada algumas vezes logo acima do embasamento cristalino, fato observado durante a escavação de cacimbas. Desta forma, nas sondagens B9, B11 e B13 a profundidade do embasamento foi inferida logo abaixo da fácies 4 e de acordo com a tendência geral das adjacências.

É possível notar nos perfis transversais que o aluvião, na porção onde foram feitos os perfis, tem uma geometria bastante comum para este tipo de depósito, onde fica evidente a *paleo-calha* do riacho nas sondagens B4, B7 e B14, local por onde o riacho corre atualmente. Também é importante ressaltar a maior representatividade do terraço aluvial na margem sul desta porção do riacho.

No Perfil transversal B-B' estão indicados os níveis estáticos das datas 1/6/11 e 13/12/10, registrados como os níveis mais alto e mais baixo, respectivamente. Em 1/6/11 a espessura saturada mais representativa corresponde à *paleo-calha* do riacho e, se considerarmos esta altura do nível freático como a mais baixa possível, teremos a reserva permanente do aquífero nesta porção do depósito aluvionar.

Nos perfis longitudinais um aspecto que merece atenção é o comportamento dos níveis estáticos no perfil D-D' que, com exceção da medida de 13/12/10, são mais altos no piezômetro B8 do que no B14, ainda que este esteja à montante. Aparentemente não há nenhuma feição que justifique tal comportamento, porém com o auxílio dos mapas potenciométricos (item 8.7) esta questão pode ser melhor elucidada e pode estar relacionada a uma lente argilosa que não tenha sido detectada pelas sondagens.

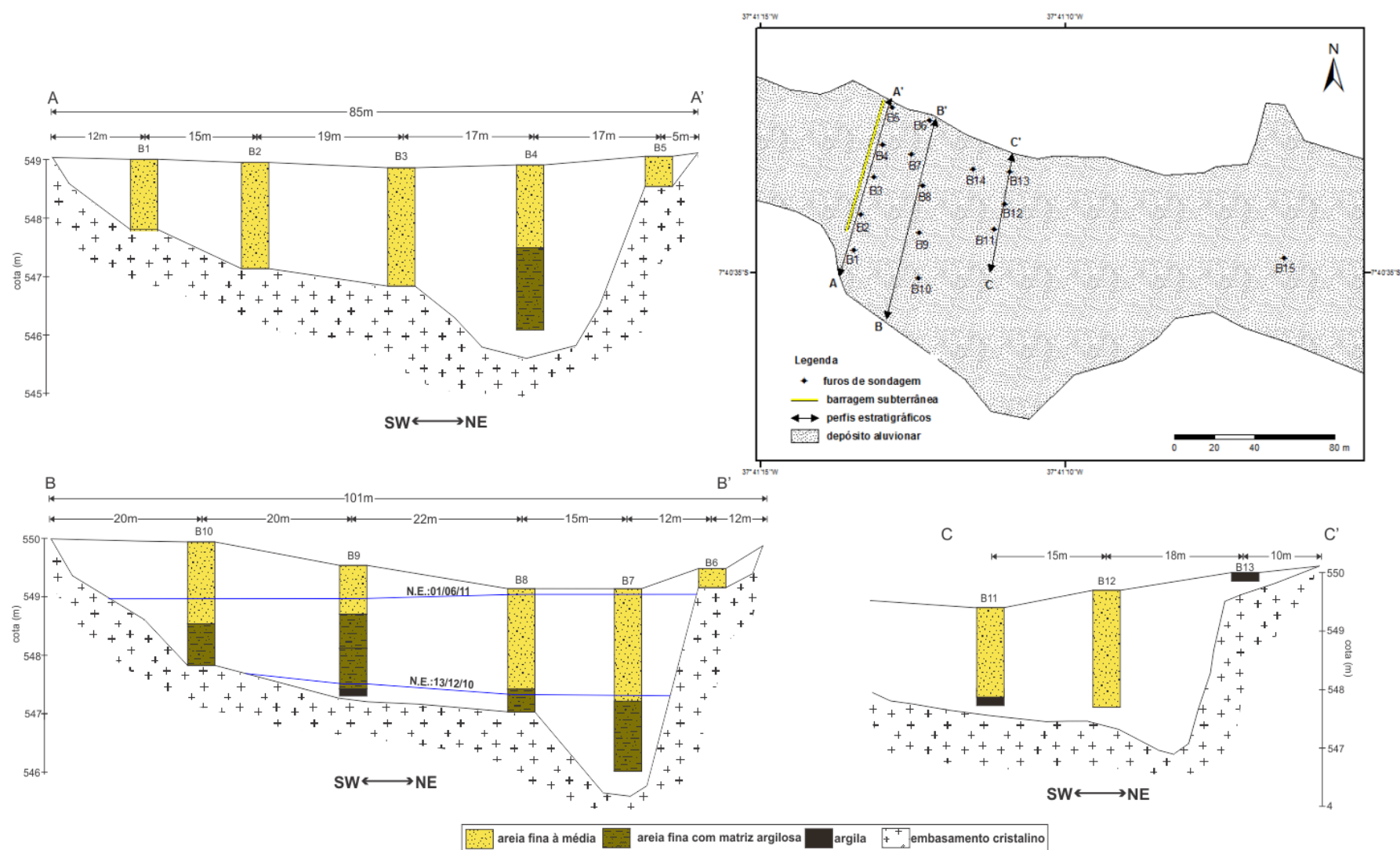


Figura 14. Perfis estratigráficos transversais a depósito aluvionar.

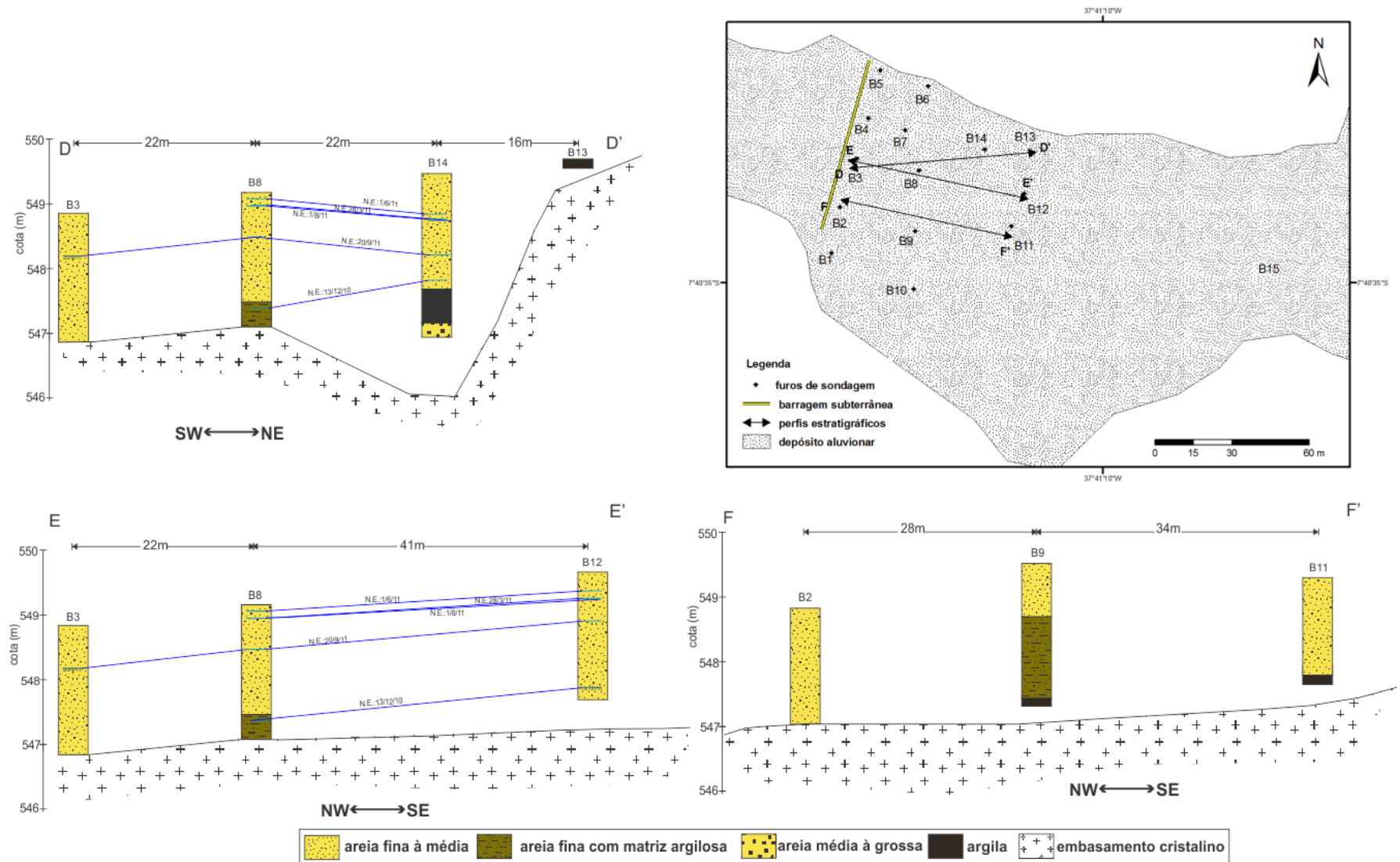


Figura 15. Perfis estratigráficos em longitudinais ao depósito aluvionar.

8.5. SLUG TEST

Outro recurso utilizado para estimar a condutividade hidráulica (K) no aquífero estudado foi o *slug test* aplicado no piezômetro B14 (Figura 14 e 15), conforme descrito no item 2.3.

O teste é feito em duas etapas, a primeira de inserção, causando a subida do nível dinâmico, e a segunda de retirada do *slug*, causando a queda imediata do nível dinâmico.

Uma vez de posse dos dados de variação de nível dinâmico em função do tempo, obtidos pelo registrador de nível automático, é necessário identificar na tabela de dados o nível dinâmico máximo (h_0 ou y_0) atingido com a entrada do *slug* no poço, excluindo as primeiras medidas onde há oscilação de nível devido ao efeito conhecido como *splash effect* (Weight & Sonderegger, 2000). Para este nível dinâmico máximo é assumido o tempo zero para fins de cálculo. Analogamente, na segunda etapa identifica-se o menor nível dinâmico ($-h_0$ ou $-y_0$).

A Figura 16 ilustra a variação de nível dinâmico (h/h_0) em função do tempo das duas etapas do teste realizado. O valor $h/h_0=1$ representa o nível dinâmico máximo (etapa 1), sendo que os valores anteriores a este representam as oscilações devido ao *splash effect*. Posteriormente a queda brusca do nível dinâmico representa a etapa 2.

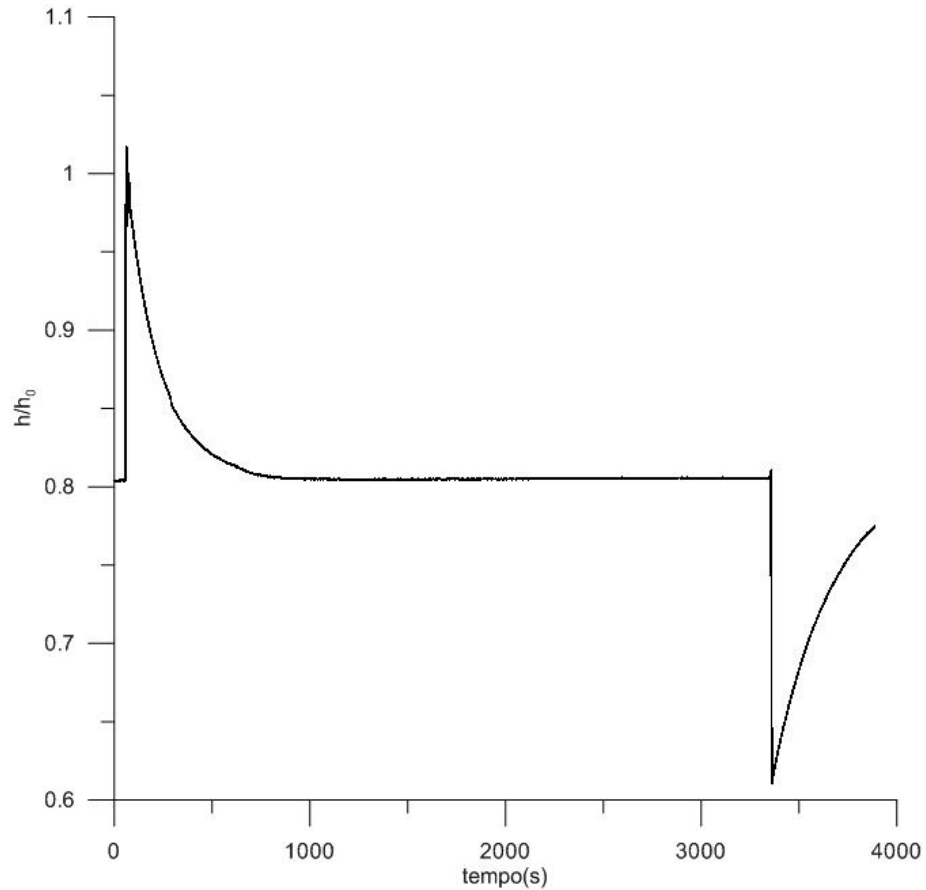


Figura 16. Curva representativa da variação de nível (h/h_0) em função do tempo durante o slugtest no piezômetro B14.

Os métodos analíticos mais empregados para esse tipo de teste, Hvorslev (1951) e Bouwer and Rice (1976), foram utilizados.

Hvorslev desenvolveu a seguinte equação para o cálculo de K :

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2LT_0}$$

Onde:

K = condutividade hidráulica

r = raio do poço

R = raio do filtro mais o pré-filtro

L = comprimento do filtro, ou do pré-filtro se este se estender acima do filtro.

t_0 = tempo para recuperar 37% a partir de h_0

O parâmetro t_0 pode ser entendido como o tempo para o nível dinâmico descer (ou subir, no caso de retirada do *slug*) 37% a partir do máximo inicial (h_0), e pode ser obtido graficamente.

Como o piezômetro B14 não tem pré-filtro, o parâmetro R foi considerado igual a r (raio do poço), na entrada dos dados no software *Aquifertest* 4.2.

Pelo método Bouwer and Rice calcula-se pela equação:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/R_w)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \frac{y_0}{y_t}$$

Onde:

y_0 = nível dinâmico máximo

y_t = nível dinâmico no tempo t

L_e = comprimento do filtro, ou do pré-filtro se este se estender acima do filtro

R_w = raio do filtro mais o pré-filtro

r_c = raio do poço

$\ln (R_e/R_w)$ = parâmetro obtido com o auxílio de curvas análogas que levam em consideração a razão da espessura saturada do aquífero com o raio efetivo do poço (L_w/r_w).

No método Bouwer and Rice é necessário que seja conhecida a espessura saturada e, portanto, a espessura do aquífero. No caso do *slug test* executado neste trabalho, o piezômetro utilizado é parcialmente penetrante, então a espessura do aquífero foi inferida em 3,5m, baseado na informação sobre a espessura atingida durante a escavação da barragem subterrânea.

No software *Aquifertest* 4.2 foram inseridos os dados construtivos do piezômetro, as características do aquífero e os dados selecionados para as duas etapas do teste, obtendo os seguintes resultados, Tabela 5:

Tabela 5. Resultados de K obtidos para ambos os métodos empregados.

Método	K para a etapa 1 (m/s)	K para a etapa 2 (m/s)
Hvorslev	$1,42.10^{-5}$	$1,23.10^{-5}$
Bouwer and Rice	$1,25.10^{-5}$	$1,09.10^{-5}$

A média dos valores obtidos (Tabela 5) é de $K=1,25 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, e esta pode ser considerada a condutividade hidráulica do aquífero nas proximidades do piezômetro B14, não refletindo necessariamente o valor deste parâmetro para todo o aluvião, dada a heterogeneidade deste tipo de depósito.

O valor de médio de K obtido através das análises granulométricas foi de $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, porém a metodologia de Breddin utilizada foi desenvolvida para ser aplicada em uma área na Alemanha, sendo indicada para fornecer uma primeira ideia de K (Custódio e Llammas, 1976) na ausência de métodos diretos.

Portanto, o valor de K obtido pelo slug test, apesar de pontual, será extrapolado para todo o aquífero e utilizado para outros cálculos.

8.6. POROSIDADE EFETIVA

No caso dos sedimentos inconsolidados, onde não há cimentação, a porosidade é controlada pela distribuição granulométrica, a forma e o arranjo dos grãos. Nos sedimentos uniformes, a porosidade independe da dimensão dos grãos, em solos de grãos maiores, os vazios são maiores que em solos de grãos menores, mas a percentagem que estes vazios ocupam em relação ao volume total é a mesma. Sedimentos uniformes têm porosidade mais alta, em relação aos com grande variação das dimensões das partículas, nos quais os grãos menores tendem a preencher os espaços entre os maiores, resultando em um menor volume de vazios (menor porosidade).

A porosidade efetiva pode ser definida como a quantidade de água fornecida por unidade de volume de material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberado de um meio poroso e o seu volume total (CPRM, 2008). Portanto este parâmetro representa o volume de poros no qual a água se movimenta livremente e do qual a água é captada. É um conceito especialmente importante quando se trata de determinar as reservas e recursos exploráveis.

A medida da porosidade normalmente é feita por métodos laboratoriais ou de campo, sendo que os de campo apresentam melhores resultados pelo fato de estar usando o material em seu estado natural (Custódio & Llammas, 1976).

Uma alternativa proposta por autores como Otto (1988) e Poulsen et al. (1999a,b), é a estimativa da porosidade efetiva em função da condutividade hidráulica do sedimento inconsolidado saturado através de equações empíricas.

No presente estudo, a condutividade hidráulica foi determinada, tanto em campo, através do *slug test*, como em laboratório, por meio das análises granulométricas, obtendo um resultado relativamente confiável. Portanto, uma vez que a porosidade efetiva não pôde ser medida pelos métodos tradicionais, pelo fato de serem demorados e complexos fugindo ao escopo do trabalho, optou-se por fazer a estimativa da porosidade efetiva em função da condutividade hidráulica utilizando alguns dos modelos matemáticos existentes para esse fim.

Ribeiro et.al (2007) fizeram uma comparação entre os diversos métodos que relacionam matematicamente a porosidade efetiva e a condutividade hidráulica de um solo saturado. Os métodos com os menores erros nas estimativas, ainda que todos tenham algumas restrições pelo fato de terem sido desenvolvidos e testados em condições específicas, foram o van Beers (1965), Otto (1988)1 e 2, Poulsen et al. (1999a) e Poulsen et al. (1999b).

A Tabela 6 apresenta os métodos e as suas respectivas equações, bem como a porosidade específica (μ) calculada com cada um deles, considerando-se a condutividade hidráulica (K) como $1,25 \cdot 10^{-5}$ m/s (108 cm/d), tido como valor médio para o aquífero estudado.

Tabela 6. Métodos de estimativa de porosidade específica (μ) a partir da condutividade hidráulica (K). K em cm/d.

Método	Beers (1965)	Otto (1988)1	Otto (1988)2	Poulsen et al. (1999a)	Poulsen et al. (1999b).
Equação	$\mu = K^{1/2}$	$\mu = 6,37238 + 0,457879 K^{1/2}$	$\mu = 2,53619 \cdot K^{0,30950}$	$\mu = 0,066137 \cdot K^{1/3,15} \cdot \theta_s^{2/3}$	$\mu = 10^{[(\log K - 4,3)/2,8]}$
Valor de μ calculado	10,39%	11,13%	10,8%	-	15,5%

No caso do método Poulsen et al. (1999a) o parâmetro θ_s é a umidade de saturação, a qual é obtida em laboratório, razão pela qual μ não foi calculado por este método.

A média entre valores calculados pelos métodos utilizados fornece uma estimativa de $\mu=12\%$, o que é aceitável para o tipo de sedimento em questão e está dentro do previsto por

Johnson (1967) (in Custódio e Llammas, 1976) que estabelece a porosidade das areias finas entre 10 e 28% com média de 21%, e das areias médias entre 15 e 32% e média de 26%.

É importante ressaltar que a determinação da porosidade efetiva por métodos diretos, tanto de laboratório como de campo, resultaria em um valor muito mais confiável e o recurso aqui utilizado só é recomendado na ausência de outros métodos.

8.7. TRANSMISSIVIDADE

A transmissividade(T) de um aquífero corresponde à sua capacidade para transmitir água horizontalmente e é dada por $T = K.b$, onde K é a condutividade hidráulica e b é a espessura do aquífero. Para os valores de T aqui calculados, se considerou $K = 1,25.10^{-5} \text{ m/s}$, valor tido como médio para o aquífero, e b, as espessuras do pacote em cada sondagem, sendo que para os furos que não atingiram o embasamento cristalino, a espessura foi estimada com base na posição da sondagem nas seções transversais (Figura 14). Os valores obtidos encontram-se na Tabela 7:

Tabela 7. Valores de transmissividade calculados. As células marcadas com *, representam valores de espessura estimados, devido ao fato das sondagens não terem alcançado o embasamento cristalino.

Sondagem	Espessura do aquífero	T (m ² /s)
B1	1,2	$1,5. 10^{-5}$
B2	1,8	$2,25. 10^{-5}$
B3	2	$2,5. 10^{-5}$
B4	3,4*	$4,25. 10^{-5}$
B5	0,5	$6,25. 10^{-6}$
B6	0,3	$3,75. 10^{-6}$
B7	3,5*	$4,37. 10^{-5}$
B8	2,1	$2,62. 10^{-5}$
B9	2,5*	$3,12. 10^{-5}$
B10	2,1	$2,62. 10^{-5}$
B11	1,8*	$2,25. 10^{-5}$
B12	2,3*	$2,87. 10^{-5}$
B14	3,5*	$4,37. 10^{-5}$
B15	2,5*	$3,12. 10^{-5}$

Naturalmente, como K foi considerado constante, a transmissividade é tanto maior quanto maior for a espessura do aquífero, portanto, como se pode ver na Figura 17, as maiores

transmissividades tendem a ficar na porção mais espessa do aluvião, correspondente à *paleocalha* do riacho e ao local por onde ele corre atualmente.

Caso haja interesse por parte dos agricultores do sítio Caiçara de construção de uma nova cacimba, talvez para manejo da barragem em relação à salinidade, seria indicado entre as sondagens B3 e B8, o mais próximo do eixo da barragem possível, facilitando o descarte da água ou irrigação à jusante. Esta área está afastada do curso do riacho, o que prejudicaria a estrutura do poço, e possui boa transmissividade.

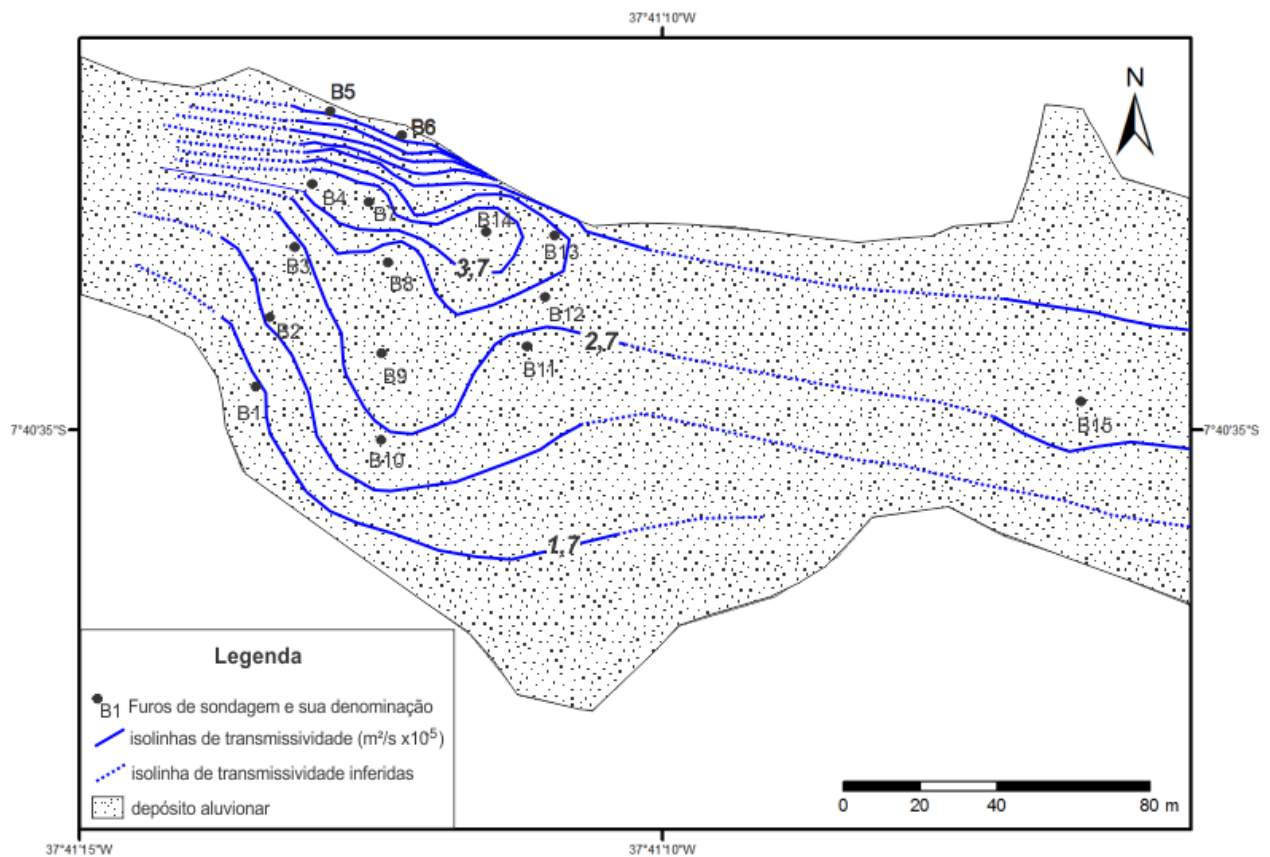


Figura 17. Mapa de isotransmissividade do aquífero aluvionar.

Para fins de cálculos da vazão de escoamento natural (VEN) foi considerado o valor médio de transmissividade do aquífero como $2,63.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

8.8. POTENCIOMETRIA

A partir das medidas dos níveis d'água nos poços de monitoramento, cacimbas e do nivelamento topográfico realizado em campo, foi possível construir mapas das superfícies potenciométricas com o intuito de entender a dinâmica de fluxo no aquífero estudado e a sua relação com a barragem subterrânea.

Pelo fato de os piezômetros se concentrarem nas proximidades à montante da barragem subterrânea, as condições de fluxo ficam mais claras nesta região do que em outras porções do aluvião, onde foi necessário inferir as curvas equipotenciais.

A Figura 18 mostra os mapas potenciométricos referentes às medições em 13/12/10, 28/03/11, 01/06/11 e 01/8/11, executadas por Cláudio José, morador do sítio Caiçara, e a Figura 19 representa o mapa potenciométrico com as medidas de nível estático de 20/09/11, obtidas durante a segunda etapa de trabalho de campo.

O gradiente hidráulico (i) representa a inclinação da superfície potenciométrica, e foi obtido medindo-se as distâncias entre curvas potenciométricas na direção do fluxo. Como a diferença de cargas hidráulicas entre as curvas é de 0,1m, temos: $i = \text{distâncias entre curvas (m)} / 0,1$. Os valores deste parâmetro variam de 0,005 a 0,013, o que representa um gradiente hidráulico elevado tendo em vista a existência de um septo impermeável que barre o fluxo de água.

Uma hipótese capaz de explicar este fato é que durante as escavações da barragem subterrânea não se tenha atingido o embasamento cristalino, se mantendo certa espessura arenosa abaixo do septo impermeável (lona de PVC), permitindo o escoamento. Isto é reforçado pelo relato dos agricultores de que a entrada de água dificultou a escavação do eixo da barragem e para auxiliar no rebaixamento do nível freático foi utilizado um compressor.

No mapa potenciométrico de 28/03/11 e nos subsequentes, pode-se notar algumas feições peculiares nas curvas potenciométricas, como a divergência de fluxo nas proximidades do poço de monitoramento B8 e o adensamento entre as curvas nos poços B12 e B14.

No mapa potenciométrico para o dia 13/12/10 (Figura 18) não é possível notar a mesma sinuosidades em torno do poço de monitoramento B8, observado nas curvas equipotenciais dos outros mapas. Isso pode estar relacionado à existência de uma lente argilosa, que não tenha sido detectada nos perfis de sondagem, posicionada logo acima do NE do dia 13/12/10. O fato de o

sedimento argiloso ter condutividade hidráulica menor do que as adjacências resulta nas feições de divergência de fluxo nas imediações de B8.

O adensamento das equipotenciais reflete um aumento no gradiente hidráulico, o que qualitativamente pode ser interpretado como diminuição da transmissividade. No entanto, a região do aluvião entre os poços de observação B12 e B14 corresponde à porção mais espessa do depósito, relacionada ao canal do riacho, e com tendência a transmissividades mais elevadas em relação às adjacências (ver item 8.6).

Uma hipótese que pode explicar a feição de adensamento observada é o fato de a barragem subterrânea estar retardando o fluxo de água, o qual, teoricamente se dá por baixo do septo impermeável. Assim sendo, o retardamento da frente de escoamento nas proximidades da barragem resulta em uma maior inclinação na superfície potenciométrica nesta região.

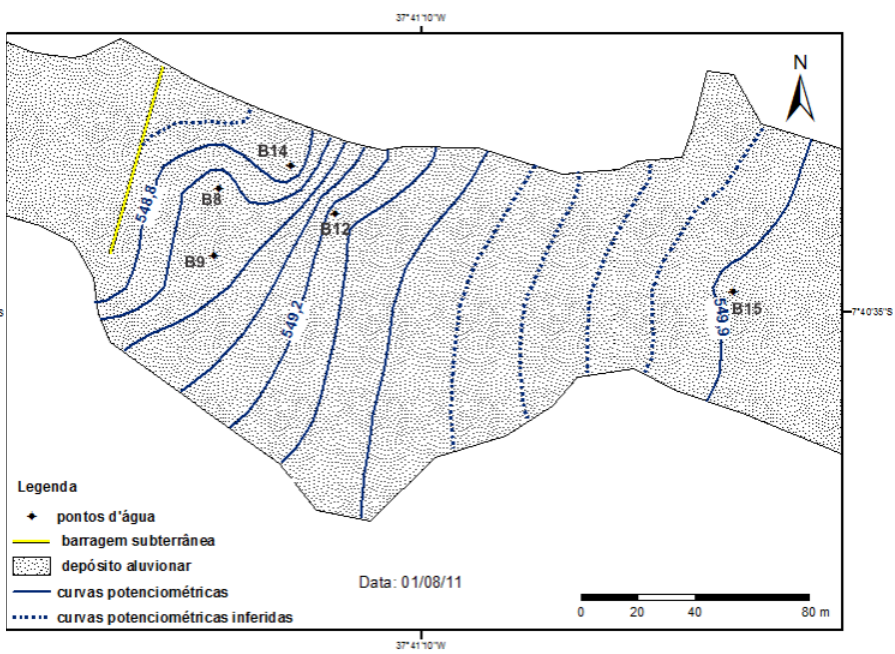
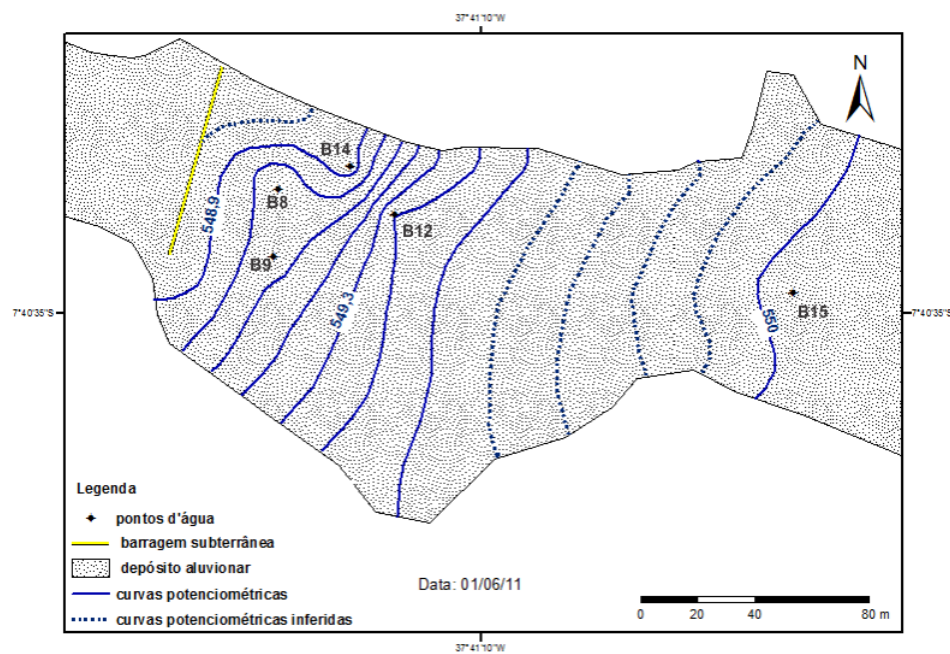
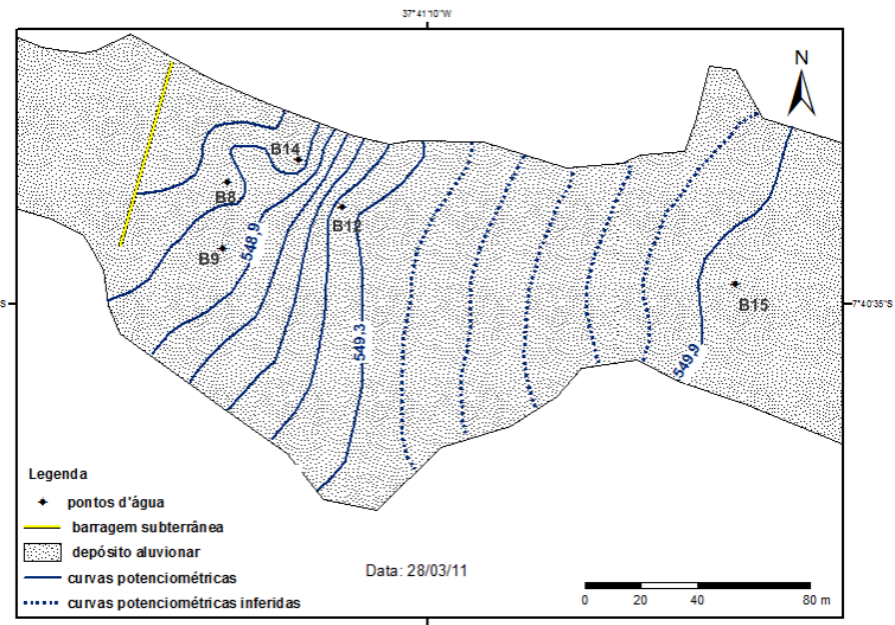
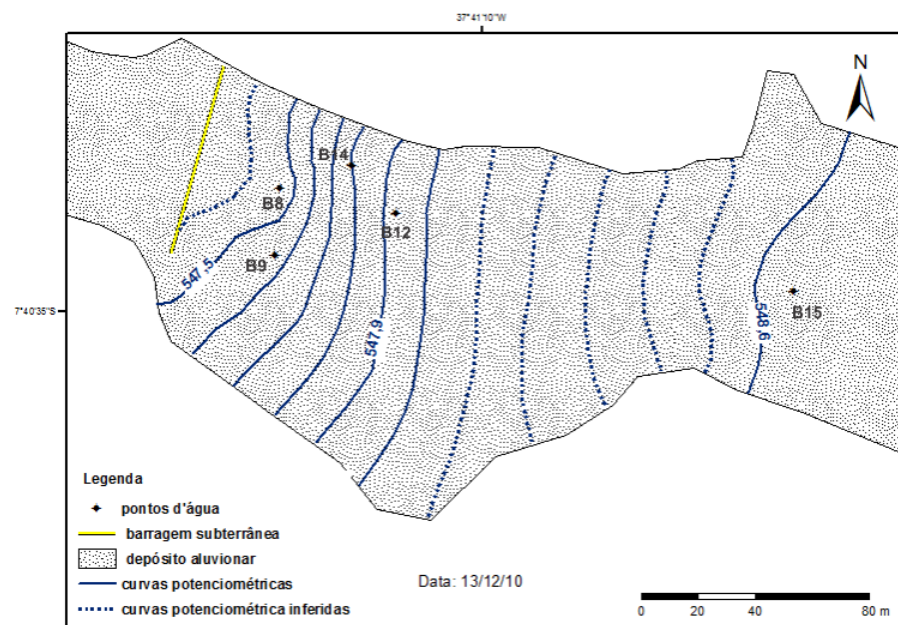


Figura 18. Mapas potenciométricos do depósito aluvionar em diferentes datas.

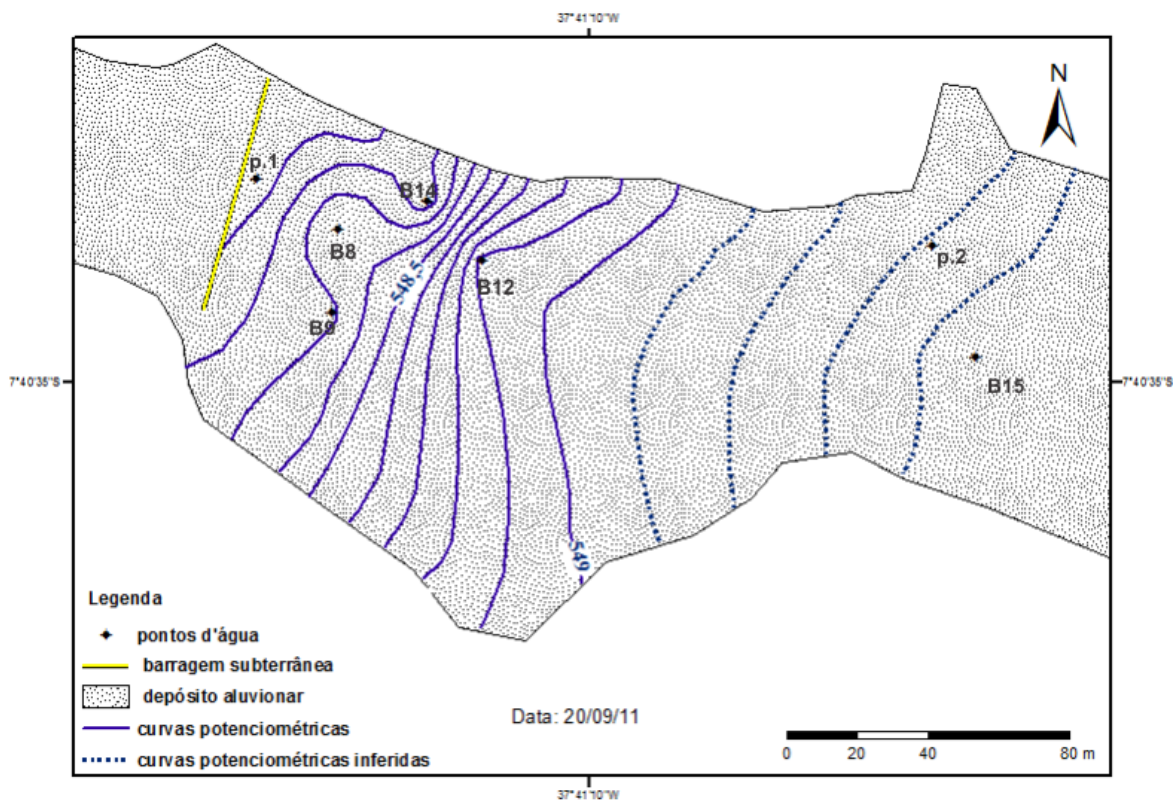


Figura 19. Mapa potenciométrico do depósito aluvionar em 20/09/11.

8.9. ESTIMATIVA DAS RESERVAS

A estimativa das reservas é um importante dado para a avaliação e gestão da exploração de um aquífero. A totalidade de água livre existente em uma formação aquífera é representada pela soma das reservas permanentes com os recursos renováveis, sendo que, por reservas permanentes entende-se o volume de água acumulado que não varia de acordo com as precipitações anuais e permite uma exploração regularizada ao longo de anos. Já os recursos renováveis representam o volume de água livre armazenada em um aquífero submetida às variações sazonais ou interanuais das precipitações pluviométricas (CPRM, 2008).

O conceito de reserva de exploração refere-se à quantidade de água máxima que poderia ser explorada de um aquífero, sem riscos de prejuízos ao manancial, expresso em volume/tempo (vazão). No entanto, há muitas controvérsias em torno da definição deste parâmetro, tendo em vistas os muitos fatores que o influenciam, tais como: a distribuição da exploração, o tipo de agricultura, o retorno de águas usadas (CPRM, 2008).

O manejo dos recursos hídricos em regiões de clima semiárido é baseado, fundamentalmente, em uma eficiente captação de água no período chuvoso e utilização no período de estiagem imediato. Se na bacia não houver estruturas como barragens e açudes que acumulem o escoamento superficial, somente a captação direta do aquífero aluvial, ou eventualmente de poços tubulares profundos, proverá o abastecimento de água para a agricultura.

Portanto, o conhecimento das reservas dos aquíferos aluvionares deve ser o ponto de partida para uma gestão adequada, em escala local, dos recursos hídricos no semiárido.

8.9.1. Reserva permanente

A reserva permanente em um aquífero livre representa o volume de água abaixo da posição mínima de nível de oscilação sazonal da superfície piezométrica, e é calculada neste caso pelo volume de saturação, dado por:

$$V_s = A \cdot b \cdot n_e$$

Onde:

A= área de ocorrência do aquífero (L²)

b= espessura saturada média (L)

n_e= porosidade efetiva

Considerando a posição mínima de nível da superfície piezométrica como sendo as medidas de 13/12/10, a única porção saturada do aluvião corresponde à *paleocalha* do riacho, como pode ser visto no perfil transversal B-B' (Figura 14, item 8.3.). Portanto, para a estimativa da reserva permanente considerou-se b=1,5m, correspondente à espessura saturada na *paleocalha* abaixo do nível estático de 13/12/10 e extrapolada para o restante do aquífero.

No entanto, o acompanhamento dos níveis estáticos foi feito com poucas medidas e em um ano de precipitações pluviométricas acima da média para a região, logo, o valor de b pode ser inferior ao estimado.

O valor de A foi estimado com base nas imagens orbitais e com o auxílio do software *Arcgis 9*, delimitando-se somente a área que, aproximadamente, corresponde à *paleocalha*, a qual

tem cerca de 10m de largura. Assim, considerando o comprimento da porção mais larga de aluvião à montante da barragem subterrânea, temos $A=4652\text{m}^2$.

A porosidade efetiva (n_e) calculada no item 8.5. é de 12%.

Aplicando os dados na equação acima se chega ao valor de $V_s=837\text{m}^3$

A construção de uma barragem subterrânea tende a aumentar as reservas permanentes dos aquíferos aluvionares. No entanto, a hipótese de o septo impermeável da barragem do sítio Caiçara não fazer contato com o embasamento cristalino na base do aluvião, discutida no item 8.7., permite concluir que a água acumulada continua a escoar durante o período de estiagem. Isto faz com que o valor de reserva permanente calculado seja baixo, quando comparado com uma suposta estrutura que barrasse completamente o fluxo de água.

Um exemplo do significado da reserva permanente aqui calculada, no caso do sítio Caiçara, está na hipótese de em determinado ano se exaurir os recursos renováveis. Assim sendo, uma vez que se consiga captar o volume saturado na *paleocalha* do aluvião, haverá 873m^3 de água disponível. Ou seja, se considerarmos a demanda de $7\text{m}^3/\text{dia}$, esta reserva poderia abastecer o sítio por aproximadamente 124 dias sem recarga.

8.9.2. Recursos renováveis

No que diz respeito à relação entre exploração e recarga de um aquífero, deve se levar em conta a variável tempo, representando valores em termos de descargas ou vazões.

Para um aquífero aluvial, na condição de aquífero livre, as variações sazonais no armazenamento, em decorrência das precipitações pluviométricas, acarretam uma oscilação do nível potenciométrico, e os recursos renováveis podem ser calculados por ela.

A metodologia para o cálculo da reserva renovável (R_r), utilizada para aquíferos livres pouco profundos é dada por:

$$R_r = A \cdot n_e \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)$$

Onde:

A = área de ocorrência do aquífero(L^2)

n_e = porosidade efetiva

Δh = variação de nível estático (L)

Δt =período de tempo considerado para as medidas de nível(T)

Para o cálculo de R_r por esta metodologia, foi considerada uma área de ocorrência (A) de 32762m², representando a porção mais larga de aluvião à montante da barragem subterrânea, sendo descontadas as manchas aluvionares das nascentes pelo fato de possuírem largura de 15 à 20m e provavelmente espessuras arenosas ínfimas.

A variação de nível estático (Δh) deve ser obtida através de medições mensais em relação a um ano hidrológico($\Delta t=1$). Como só se dispõe de medições de nível das datas 13/12/10, 28/03/10, 1/6/10, 1/8/10 e 20/09/11, foi considerada a diferença entre os níveis d'água mais elevados, correspondentes à 1/6/11, e os níveis mais baixos, que se deram em 13/12/10, final do período de seca. A média de variação de nível estático para os diferentes poços de monitoramento é 1,4m.

A porosidade efetiva (n_e) calculada no item 8.5. é de 12%.

Aplicando os dados na equação acima temos $R_r= 5504 \text{ m}^3/\text{ano}$

Considerando que este método utiliza a variação de nível estático em um ano hidrológico, é importante ressaltar que o período observado, de set/2010 à set/2011 teve precipitações pluviométricas acima da média para a região, chegando à 1088mm, enquanto a média é de 600mm. Isso certamente resultou em uma oscilação de nível freático maior, e a tendência é que a vazão acima calculada seja um pouco menor em anos com pluviosidade normal.

8.9.3. Vazão de escoamento natural (VEN)

Outra maneira de se calcular os recursos renováveis é através da vazão de escoamento natural (VEN), que em condições de equilíbrio natural pode ser encarado como o volume de infiltração efetiva anual (CPRM, 2008). No entanto, a existência da barragem subterrânea, ainda que não barre completamente o fluxo de água, altera o equilíbrio natural retardando a frente de escoamento e, em teoria, diminuindo o gradiente hidráulico.

Portanto o valor de VEN aqui calculado tem o significado de ser o volume de água que a barragem subterrânea permite que escoe, pelas suas laterais ou pela base.

A metodologia comumente utilizada para o cálculo deste parâmetro, é por meio da equação:

$$VEN = T.i.L$$

Onde:

T: transmissividade hidráulica do aquífero(L^2/T)

i: gradiente hidráulico do escoamento

L: comprimento da frente de escoamento considerada (L)

O cálculo do gradiente hidráulico (i) conforme descrito no item 8.7., resultou em valores que variam de 0,005 a 0,013.

O comprimento da frente de escoamento(L) foi considerado como a largura do aluvião nas proximidades do eixo da barragem subterrânea, 90m.

A partir destes dados, o valor de VEN calculado, para o menor e o maior gradiente hidráulico, é de 373 e 972 m³/ano, respectivamente. Para um gradiente médio de 0,009, VEN=672m³/ano.

O valor de VEN, em condições naturais, deve ser equivalente aos recursos renováveis (R_r), o que não acontece neste caso. O motivo pode estar no fato que a barragem subterrânea ao impedir (ou retardar) o fluxo de água, diminui a descarga do aquífero, tornando o valor de VEN incompatível ao de R_r , cujo cálculo não se baseia na descarga e sim na oscilação de nível estático no aquífero.

Portanto a estimativa de VEN aqui calculada pode ser considerada como a descarga de água que escoar sob a barragem subterrânea.

8.9.4. Recursos exploráveis

Recursos exploráveis, sendo o volume extraído sem que se acarretem efeitos indesejáveis ao aquífero, é um conceito controvertido em hidrogeologia, já que contempla desde aspectos relativos ao volume e qualidade da água a fatores socioeconômicos.

No entanto, em um estudo de caso em que se conhece a realidade local, podemos analisar os efeitos indesejáveis relativos ao uso de água e definir estratégias de exploração úteis à gestão de recursos hídricos.

O uso de água proveniente do depósito aluvionar no sítio Caiçara é de aproximadamente $7\text{m}^3/\text{dia}$, ou $2555\text{m}^3/\text{ano}$, somando-se irrigação, dessedentação animal e usos domésticos. Porém deve se considerar o aumento desta demanda por conta da ampliação da área de agricultura irrigada feita após a construção da barragem subterrânea. É provável que o aumento na demanda não ultrapasse 50% do consumo atual, visto que cerca de 70% da propriedade já é ocupada pela agricultura irrigada. Mas se superestimarmos o aumento de demanda em 50%, teremos o valor de $3832\text{ m}^3/\text{ano}$ de vazão explorada futuramente.

Como visto anteriormente, a estimativa de recursos renováveis é de $R_r = 5504\text{ m}^3/\text{ano}$, com a ressalva de o cálculo basear-se na oscilação do nível estático de 1,4m, correspondente a um ano de pluviosidades acima da média na região. Se, hipoteticamente, reduzirmos o valor de oscilação de nível para 1m, na equação para cálculo de recursos renováveis do item 8.8.2, teremos $R_r = 3932\text{ m}^3/\text{ano}$. Este valor ainda está um pouco acima da estimativa de volume futuramente explorado com aumento de 50% na demanda, acima descrito.

Portanto o aumento de demanda suposto acima é aceitável, estando garantida a segurança hídrica na propriedade no que diz respeito ao volume de água. É recomendado que este aumento de demanda se dê pela irrigação da área a jusante da barragem subterrânea, o que diminuiria o risco de salinização, visto que promoveria maior circulação de água e dissolução dos sais.

O aumento da demanda também é justificado pelo fato de que o volume de R_r que não é captado é “perdido” por escoamento ou evaporação. Ou seja, se considerarmos $R_r = 3932\text{m}^3/\text{ano}$, e a demanda $2555\text{m}^3/\text{ano}$, teremos aproximadamente $1377\text{m}^3/\text{ano}$ de água que poderia ser usada para a produção de alimento, e uma vez que não haja outros projetos de agricultura nas proximidades a jusante da barragem subterrânea, este volume deve ser usado.

8.10. ANÁLISE DA TÉCNICA DE BARRAGEM SUBTERRÂNEA

No depósito aluvionar estudado, no sítio Caiçara, é empregada a técnica de barragem subterrânea, a qual pode ser definida como uma estrutura que objetiva barrar o fluxo subterrâneo de um aquífero pré-existente ou criado concomitantemente à construção da barreira impermeável (Santos & Frangipani, 1978). A construção desta estrutura consiste na escavação do aluvião até o embasamento cristalino, em sentido transversal ao curso d’água, fazendo a impermeabilização da vala. Isso fará com que o escoamento subsuperficial seja barrado, elevando o nível freático,

aumentando o armazenamento de água e estabelecendo condições favoráveis de captação a montante.

Embora a barragem subterrânea seja uma obra de baixo custo, alguns critérios técnicos básicos de locação, construção e manejo devem ser seguidos para que ela possa atingir seus objetivos de armazenar água em qualidade e quantidade satisfatórias. Além disso, é necessário que a população esteja inserida no processo, e interessada na obra, compreendendo os benefícios que ela pode trazer, seus limites e a necessidade de manejo.

Nesse contexto pretende-se fazer uma análise crítica da barragem subterrânea construída no sítio Caiçara auxiliando na construção do conhecimento sobre a técnica.

8.10.1. Locação

8.10.1.1. Salinidade

A água não deve ter salinidade elevada, pois tenderia a aumentar a concentração de sais e trazer prejuízos à agricultura (Costa, 2004).

As amostras de água coletadas em cacimbas no sítio Caiçara, antes da construção da barragem subterrânea, revelaram condutividades elétricas de 404 e 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$, quando medidas com um condutivímetro portátil no campo durante a locação (20/09/10). Estes valores são considerados como salinidade média segundo Ayres & Westcot (1991), Tabela 8.

Tabela 8. Indicando os valores de condutividade elétrica e o que eles representam. Modificado de Ayres & Westcot (1991).

Condutividade elétrica, em $\mu\text{S}/\text{cm}$	Salinidade	Qualidade para uso em irrigação
Inferior a 250	Baixa	Uso sem restrição
250 a 750	Média	Problemas somente com solos muito pouco permeáveis e plantas muito sensíveis
750 a 2250	Alta	Necessita de manejo e plantas resistentes
2250 a 5000	Muito Alta	Uso desaconselhado, fora solos extremamente permeáveis e plantas muito resistentes
Superior 5000	Excepcionalmente Alta	Não usar

Portanto, quanto à qualidade da água não houve restrições para a construção da barragem no local, uma vez que o uso dado à água é agricultura, dessedentação animal e usos domésticos (lavar roupa, banho, limpeza). Naturalmente o recomendado é utilizar técnicas manejo que não permitam o aumento da concentração de sais, como a irrigação à jusante da barragem promovendo a circulação de água, irrigação por gotejamento, evitando as grandes taxas de evaporação.

No caso do sítio Caiçara, a barragem subterrânea não impede completamente o fluxo da água (como visto no item 8.7.), o que por um lado tem um impacto negativo, pois limita sua capacidade de armazenamento, por outro é um aspecto positivo, pois promove maior fluxo de água, carreando os sais dissolvidos na água da área de armazenamento da barragem.

No entanto, a última medição de condutividade elétrica (CE) em 21/09/11 apontou o valor de 875 $\mu\text{S}/\text{cm}$, considerado representante de salinidade alta. Embora não se tenha uma série histórica de medições de CE, o valor citado acima merece atenção, e pode significar aumento da salinidade em decorrência da irrigação por aspersão e sobre a área de armazenamento da barragem subterrânea.

Nesse aspecto, é recomendado um monitoramento periódico da CE, gerando informações concretas sobre a evolução da salinidade da água armazenada.

8.10.1.2. Espessura do aluvião

O aluvião deve ter no mínimo 1,5m de espessura, na sua porção mais profunda, que normalmente é na calha do rio ou riacho, para que se justifique a construção da barragem subterrânea (Costa, 2004). Este critério existe pelo fato de que, quanto mais próximo da superfície o nível d'água estiver, maiores serão as perdas por evaporação no reservatório, tornando a barragem subterrânea pouco eficiente. Logicamente cada caso deve ser analisado individualmente de acordo com a demanda requerida.

Para a verificação da espessura do depósito aluvionar, em casos onde se espera pequenas espessuras como esse, o mais recomendado é o uso do trado manual pelo seu simples manuseio, operação e manutenção de baixo custo.

No caso da barragem subterrânea do sítio Caiçara esta verificação foi feita com as sondagens à trado manual, as quais alcançaram profundidade máxima de 2,8m, sendo interrompida a sondagem pela entrada de água e desmoronamento das paredes do furo. Portanto sob este aspecto o local satisfaz as condições técnicas de locação da barragem subterrânea.

No entanto, para as locações de outras barragens executadas pela Diaconia, ONG que auxiliou nos trabalhos de campo desse estudo, são feitas escavações manuais de 1m² principalmente com o objetivo de localizar as “ombreiras”, ou seja, o contato lateral do aluvião com o embasamento cristalino, ou no centro do depósito porém não alcançando mais do que 1,5m de profundidade.

Portanto recomenda-se o uso do trado pelas razões já citadas acima e, quando necessário, o uso de fluido de perfuração, como bentonita ou até argila do próprio local, a partir da zona saturada, evitando desmoronamentos.

8.10.1.3. Constituição granulométrica e controle estrutural

Naturalmente a constituição granulométrica do aluvião deve ter predominância de areias sobre as frações mais finas, e a caracterização sedimentológica no campo é o suficiente para avaliar preliminarmente o potencial do aquífero para a locação da barragem subterrânea. Para a coleta de amostras também é recomendado o uso do trado manual.

As amostras coletadas no campo na ocasião da locação da barragem, foram descritas, em sua maioria, como areias moderadamente selecionadas de granulometria fina à média, o que viabilizou a construção da obra sob este aspecto.

O controle estrutural refere-se à existência de falhas/fraturas que possivelmente possam servir de zona de recarga do aquífero fissural sotoposto ao depósito aluvionar, que quando localizadas na área de armazenamento da barragem subterrânea, podem subtrair um volume considerado de água, diminuindo a capacidade do aquífero aluvionar. Outro aspecto estrutural importante é a existência de elevações do embasamento cristalino no assoalho do aluvião, causadas principalmente por veios e diques. Estas feições podem gerar barramentos naturais que podem ser aproveitados.

Fotografias aéreas e imagens orbitais são de grande utilidade na identificação destas estruturas.

8.10.1.4. Área de recarga, estreitamento do aluvião e declividade

Para que haja uma recarga natural com um volume considerável, a barragem subterrânea deve ser feita o mais distante possível das nascentes do rio ou riacho. Costa (2004) estabelece como medida preliminar de locação, uma distância mínima de 1km, porém cada caso deve ser analisado individualmente, de acordo com as características do aluvião e a demanda de água.

A barragem do sítio Caiçara localiza-se à cerca de 1,5 km das nascentes do riacho, e como é demonstrado no item 8.8.4. a recarga anual do aquífero é capaz de atender as demandas, como já esperado na ocasião da locação.

Quanto ao estreitamento do aluvião, é um fator amplamente recomendado no sentido de diminuir os custos com a escavação e material impermeabilizante (lona), ou seja quanto menor o eixo da barragem subterrânea melhor.

Este aspecto também foi observado de forma adequada na ocasião da locação da barragem, como é possível observar na Figura 9, na qual esta delimitado os limites do aluvião.

Um dos critérios amplamente aceito é que sejam evitados locais com fortes declividades, pois quanto maior ela for menor será o alcance longitudinal do reservatório criado pela barragem Costa(2004). Silva et. al. (2007) recomendam declividades de até 4% para proporcionar maior extensão no armazenamento de água.

Quanto a isso o terreno no qual foi locada a barragem apresenta declividade de 1,4%, calculado através do nivelamento topográfico feito em campo, o que representa um valor baixo e, portanto, adequado. A extensão de armazenamento do seu reservatório, considerando a declividade do embasamento cristalino abaixo do aluvião igual à declividade da topografia, e o gradiente hidráulico médio obtido nos mapas potenciométricos de 0,009, é de aproximadamente 550m.

8.10.2. Aspectos construtivos

Segundo Costa (2000), o modelo de barragem subterrânea Costa & Melo (Figura 20) é o mais eficiente, de mais rápida construção e de menor custo, e consta das seguintes etapas construtivas:

- Escava-se uma vala transversalmente ao leito do rio até alcançar o substrato rochoso; essa escavação pode ser manual ou mecanizada com trator de esteira ou retro-escavadeira;
- Reveste-se a parede da vala que fica oposta ao sentido de escoamento do rio com uma lona plástica para formar o septo impermeável;
- Forra-se o leito rochoso na parte mais profunda, com uma camada de brita de 0,3m de espessura numa área circular com pelo menos 2m de diâmetro;
- Colocam-se os tubulões de anéis semi-porosos de cimento, um superposto ao outro até chegar à superfície, ficando pelo menos 0,5m acima da superfície; o conjunto formará o poço amazonas; essa construção também poderá ser feita com tijolo e argamassa desde que se mantenham furos para entrada d'água na parede;
- Tubos plásticos perfurados ou ranhurados devem ser colocados ao longo da vala (um para cada lado) e encaixados no depósito de brita (abaixo do poço amazonas),
- Fecha-se a vala com o mesmo material dela retirado, sem qualquer compactação;
- Constrói-se um enrocamento de pedras a jusante da barragem.

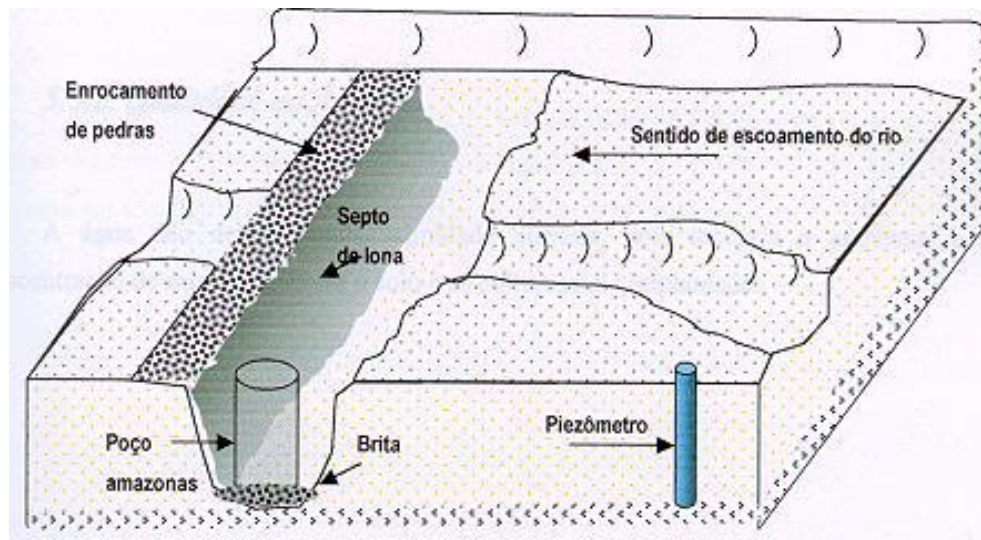


Figura 20. Modelo de barragem subterrânea COSTA & MELO. Fonte: Costa(2000).

A construção da barragem subterrânea do sítio Caiçara não foi acompanhada em campo, porem a partir de informações dos agricultores e conforme o observado em outras barragens na região, algumas considerações serão feitas.

O septo impermeável da barragem, neste caso lona plástica de 200 micra, deve cortar transversalmente todo o aluvião, fazendo contato com o embasamento cristalino em toda a extensão do eixo barrado, impedindo o escoamento por completo. No entanto, o gradiente hidráulico observado nos mapas potenciométricos (Figuras 18 e 19) indica que ainda há um fluxo de água considerável e uma das hipóteses é que este escoamento se dê entre a lona plástica e o embasamento cristalino. Por informações verbais dos agricultores se sabe que, durante as escavações, foi atingido o nível freático dificultando a abertura da vala, optando-se pelo uso de um compressor para bombear a água durante os trabalhos. Nas Figuras 21 e 22 se pode notar a entrada da água e os desmoronamentos de sedimento, respectivamente, que dificultaram as escavações.



Figura 21. Entrada de água durante o preenchimento da vala da barragem subterrânea.



Figura 22. Entrada de água durante o preenchimento da vala da barragem subterrânea.

É possível que por estas dificuldades de escavação, não se tenha alcançado o embasamento cristalino totalmente, o que explicaria o fluxo observado nos mapas potenciométricos.

O problema dos desmoronamentos, segundo informações dos moradores da região, normalmente é contornado com o uso de escoras de madeira, colocadas durante as escavações.

Outro aspecto construtivo observado durante os trabalhos de campo na barragem subterrânea do sítio Caiçara e demais barragens nas proximidades, é a existência de um “sangradouro”, que se trata de uma estrutura de alvenaria construída na posição da calha do riacho com o objetivo de facilitar o escoamento da água represada superficialmente, tal como nas barragens superficiais. No entanto, segundo informações de técnicos da Diaconia que atuam com barragens subterrâneas em Afogados da Ingazeira, a grande maioria de “sangradores” quebra durante as enxurradas, e como em teoria, todo o armazenamento das barragens subterrâneas deve ser abaixo do nível topográfico, esta estrutura torna-se sem sentido.

O enrocamento de pedras a jusante da barragem, o qual tem por objetivo retardar o fluxo superficial aumentando o tempo de infiltração sobre o aluvião, também não foi uma prática

adotada na barragem subterrânea aqui estudada, tampouco nas demais observadas na região. No entanto, uma pequena elevação topográfica, feita com solo compactado, é construída sobre o eixo da barragem com a mesma finalidade.

A Figura 23 mostra de forma esquemática os componentes construtivos da barragem estudada.

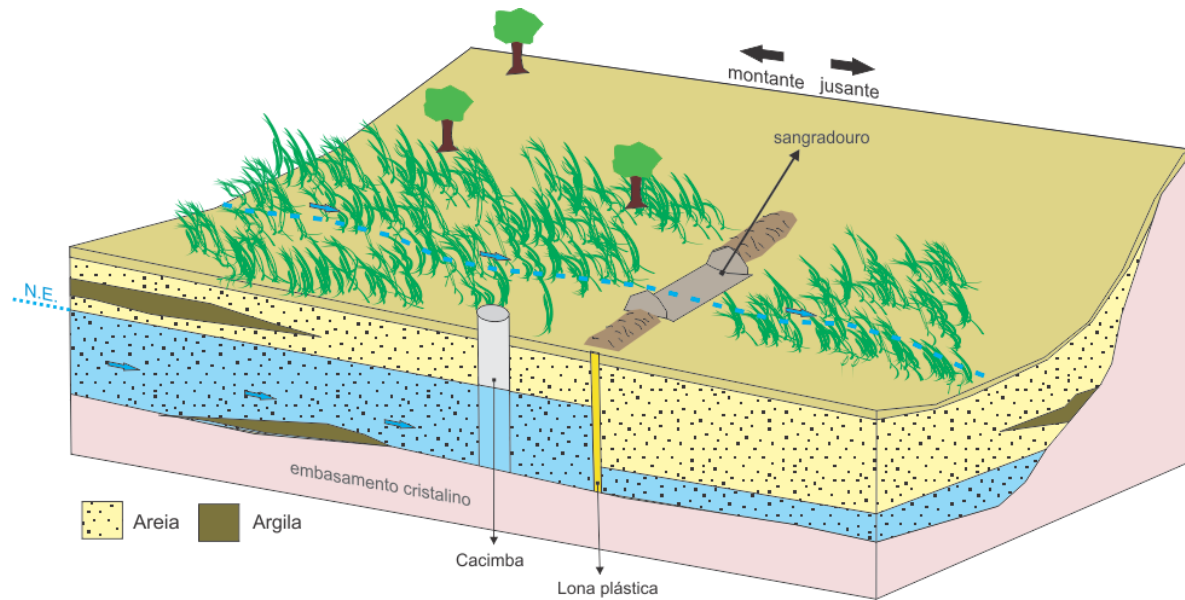


Figura 23. Representação esquemática da barragem subterrânea construída no sítio Caiçara.

8.10.3. Manejo da água

O reservatório criado pela barragem subterrânea tem como principais vantagens ser mais resistentes à evaporação e à contaminação, e a água proveniente dele vem sendo utilizada, na maioria das vezes, na agricultura irrigada.

A irrigação é uma questão que merece muita atenção quando se fala em manejo de água no semiárido nordestino, em especial tratando-se da pequena agricultura. Segundo Audry & Suassuna (1995), o pequeno produtor rural que não tem tradição na prática da irrigação, tem uma tendência geral em superirrigar, pensando que, quanto mais água colocar, melhor. Deve-se tomar providências para se mudar esta mentalidade, pois, de imediato, este procedimento aumenta a necessidade de uma drenagem eficiente, que muitas vezes não é feita.

Em terras agrícolas considera-se que a água está em excesso quando interfere na produção das culturas de tal forma que a drenagem destas terras é a obtenção de condições ótimas para a

produção agrícola, envolvendo o controle da altura do lençol freático com o objetivo de proporcionar umidade e aeração ao sistema radicular das culturas (Millar, 1978).

O desenvolvimento das culturas também é fortemente afetado pela salinidade da água e do solo, e considerando que toda a irrigação leva consigo determinada quantidade de sais, é fundamental aplicá-la de forma adequada.

O impacto das barragens subterrâneas sobre os processos de irrigação, drenagem e salinização é maximizado pelo fato de que, em todos os casos observados no município de Afogados da Ingazeira, incluindo o sítio Caiçara, a agricultura irrigada é desenvolvida sobre a área de armazenamento da barragem e muitas vezes por aspersão.

A técnica de barramento subterrâneo tem como objetivo a elevação do nível freático, e Millar (1978) ressalta que a presença de lençóis freáticos altos além de agravar o problema da salinização, devido ao transporte de sais através do fluxo capilar, limita o desenvolvimento normal dos sistemas radiculares das culturas.

No caso da barragem subterrânea do sítio Caiçara, uma vez aceita a hipótese de que ela não barre completamente o fluxo da água, o nível freático fica elevado por um período curto. E já que a magnitude dos danos provocados pelo encharcamento está diretamente relacionado à duração da inundação, o fato de ela não represar totalmente o escoamento é benéfico.

Na zona topograficamente mais baixa do aluvião, onde o nível freático está mais próximo à superfície, é plantado capim para forragem, o que é correto, visto que estas plantas são tolerantes ao excesso de água (Millar, op.cit.). O início da prática de irrigação por gotejamento na localidade também é outro fator positivo.

Como aspectos negativos, no que diz respeito ao manejo de água na área de estudo, está a irrigação por aspersão na maior parte dos terrenos cultivados, prática pouco eficiente no clima semiárido por permitir alta evapotranspiração e, conseqüentemente, acúmulo de sais; e a irrigação sobre a área de armazenamento da barragem, também aumentando o risco de salinização, como já mencionado.

A propriedade dispõe de uma pequena área à jusante da barragem, e é recomendado o uso dela para agricultura irrigada, o que promoveria maior circulação de água e dissolução dos sais.

De maneira geral, é recomendada a prática de irrigação dos terrenos à jusante das barragens, pelo motivo acima citado. No entanto, nas localidades observadas, a questão fundiária durante a locação não possibilita esta atitude, visto que cada barragem é construída para uma

propriedade específica, e embora algumas vezes a água seja compartilhada, não existem termos de uso comum para irrigação. Assim sendo, o mesmo terreno que armazena a água da barragem, é irrigado.

É necessário, portanto, um planejamento de uso de água compartilhado entre os agricultores das proximidades, tanto à jusante quanto à montante, de cada barragem subterrânea.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em se tratando de um estudo de caso, a metodologia empregada neste trabalho deve ser analisada quanto a sua aplicabilidade em um contexto mais amplo, assim contribuindo para a construção do conhecimento sobre o tema abordado.

No que diz respeito à demarcação dos limites do aluvião, conclui-se que, em estudos de detalhe, o controle de campo é a alternativa mais segura de delimitação, e nas proximidades do eixo da barragem subterrânea este foi o procedimento de demarcação do contato lateral do aluvião com o embasamento cristalino. Nas imagens orbitais, algumas culturas irrigadas sobre solos não aluvionares podem ser interpretadas como aluvião.

A metodologia de determinação da condutividade hidráulica através das análises granulométricas, utilizando as curvas de Breddin, demonstrou-se eficaz para uma primeira aproximação do valor de K , na ausência de métodos diretos. O valor médio encontrado por esta técnica, de $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, é próximo ao obtido pelo *slug test*, com o qual se obteve o resultado de $K=1,25 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, ambos dentro da faixa esperada para o tipo de sedimento, segundo os referenciais bibliográficos.

Ainda sobre as análises granulométricas, as curvas de frequência acumulativa, a determinação da média gráfica (M_z) e do coeficiente de uniformidade (f), permitiram conhecer a distribuição granulométrica geral do aluvião, muito embora a coleta de amostras tenha sido feita em uma porção restrita às imediações da montante da barragem subterrânea, e seja conhecida a natureza heterogênea deste tipo de depósito.

Os perfis de sondagens auxiliaram na visualização da distribuição vertical e horizontal dos estratos e no conhecimento da geometria do depósito aluvionar, porém com a restrição de contemplar uma pequena porção do aluvião.

Os mapas potenciométricos demonstraram gradientes hidráulicos elevados, e com base neste fato e no relato dos agricultores sobre as dificuldades nas escavações pela entrada de água, levantou-se a hipótese de que a barragem subterrânea não tenha atingido o embasamento

cristalino, mantendo certa espessura arenosa abaixo do septo impermeável (lona de PVC), e permitindo o escoamento da água.

Quanto às reservas, o aquífero possui um volume de saturação (V_s) de 837m³, correspondente às reservas permanentes, porém com pouco potencial de aproveitamento, visto que é o volume referente à *paleocalha* do riacho, correlata verticalmente à calha atual, o que dificulta a construção de uma cacimba, pois ela estaria sujeita a força das enxurradas. No entanto, se aproveitada esta reserva, ela poderia abastecer o sítio por aproximadamente 124 dias sem recarga, em uma situação hipotética em que se esgotem os recursos renováveis.

Os recursos renováveis (R_r) foram estimados em 5504 m³/ano, com a ressalva de o cálculo basear-se na oscilação do nível estático de 1,4m, correspondente a um ano de pluviosidades acima da média na região. Para um ano dentro da média de pluviosidade se estimou um valor aproximado de $R_r = 3932$ m³/ano. Já a estimativa da vazão de escoamento natural (VEN) foi calculada em 672m³/ano, e foi interpretada como sendo a descarga de água que escoar sob a barragem subterrânea.

O balanço entre R_r , VEN e a vazão explorada anualmente no sítio Caiçara (2555m³/ano), permitiu concluir que, um aumento de demanda de 50%, ainda que seja superestimado, é plausível, estando garantida a segurança hídrica na propriedade no que diz respeito ao volume de água, e é recomendado que este aumento se dê pela irrigação da área a jusante da barragem subterrânea.

Sobre a análise da técnica de barragem subterrânea foi observado que, no caso da barragem do sítio Caiçara, o fato de ela não impedir completamente o fluxo da água, por um lado tem um impacto negativo, pois limita sua capacidade armazenamento, mas por outro é um aspecto positivo, pois promove maior fluxo de água, carreando os sais dissolvidos na água da área de armazenamento da barragem. A extensão do reservatório criado pela barragem é de aproximadamente 550m.

Quanto ao manejo de água é recomendada a prática de irrigação dos terrenos à jusante das barragens, e o maior uso de técnicas eficientes de irrigação, como o gotejamento, além de um planejamento de uso de água compartilhado entre os agricultores das proximidades de cada barragem subterrânea.

As barragens subterrâneas podem ser vistas como uma alternativa relativamente simples e de baixo custo, no sentido de incrementar a captação de água em pequenas propriedades rurais.

No entanto, é essencial um amparo técnico no processo de implantação desta técnica, pois ela induz a práticas agrícolas com as quais o pequeno produtor rural ainda não tem tradição, e se mal manejadas, podem trazer alguns danos, como a salinização.

O dimensionamento do uso da água em função das reservas disponíveis tem um papel fundamental no aproveitamento local dos aquíferos aluvionares e no caso do uso de barragens subterrâneas, cuja influência afeta diretamente as reservas, cada caso deve ser analisado individualmente, formulando estratégias de gestão adequadas.

10. REFÊRENCIAS

- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1995. *Norma NBR6502 - Rochas e solos*. Rio de Janeiro, ABNT. 18p.
- Aguiar, R. B. de, Veríssimo, L. S., Oliveira, L. T., Galvão, M. J. da T. G., Feitosa, F. A. C. 2010. *Pesquisa hidrogeológica em bacias sedimentares no Nordeste Brasileiro*. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16. São Luís, MA. Anais...[São Paulo]: ABAS.
- Andrade, G. O. de. 1977. Alguns aspectos do quadro natural do Nordeste. *Estudos Regionais*, 2.Recife: SUDENE.
- Ayres, R.S. & Westcot, D.W. A Qualidade da Água na Agricultura. Tradução de H.R. Gheyi, J.F. Medeiros, F.A.V. Damasceno. Campina Grande, UFPB, 1991. xxviii, 218p: il, (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado 1).
- Audry, P.; Suassuna, J.A. 1995. *Salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação, no sertão nordestino*. Recife: Fundação Joaquim Nabuco/CNPq,, 128p.
- Bouwer, H., Rice, R.C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*. vol. 12, no. 3, pp. 423-428.
- Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Kozuch, M., Santos, E. J., Petronilho, L. 2005. *A Zona Tectônica Teixeira Terra Nova - ZTTN - Fundamentos da geologia regional e isotópica*. Geologia USP. Série Científica, São Paulo, v. 5, p. 57-80.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2005. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Afogados da Ingazeira, Estado de Pernambuco*. (Org. por) Mascarenhas, J. de C., Beltrão, B. A., Junior, L. C. de S., Galvão, M. J. da T. G. Pereira, S. N , Miranda, J. L. F. de. Recife: CPRM/PRODEEM.12 p. + anexos.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2008. *Hidrogeologia - Conceitos e aplicações*. 3ª Ed. ver. e ampl. (Coord. por) Feitosa, F.A.C., Filho, J.M., Feitosa, E.C. e Demetrio, J.G.A. Rio de Janeiro : CPRM; LABHID/UFPE 812p.il.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2009. *Caracterização Regional e Difusão Tecnológica Para Uso Sustentável dos Recursos Hídricos das Aluviões do Semiárido Brasileiro – PROALUV*. CD-ROM.

- Costa, W. D. 1997. *Manual de barragens subterrâneas. Conceitos básicos, Aspectos Locacionais e Construtivos*. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco. Recife.
- Costa, W.D. 2004. Barragens subterrâneas: conceitos básicos, aspectos locacionais e construtivos. In: Cabral et al. (Org.) *Água Subterrânea: Aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. Tópicos Especiais em Recursos Hídricos Vol. 4*. UFPE, Recife, p.13-60.
- Costa, W.D., Ciril, J.A., Abreu, G.H.F.G., Costa, M.R. 2000. O aparente insucesso das barragens subterrâneas em Pernambuco. In: Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 1., e Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11. Fortaleza: ABAS/AHLSUD/IAH. CD-ROM.
- Costa, W.D., Santos, M.A.V., Lucas, A.A., Branco, R.L.C., Maranhão, C.M.L. 2006. *Estudo Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de São José do Belmonte e Diagnóstico das Condições Hidrogeológicas da Bacia Sedimentar de Fátima, Visando a Instalação de Sensores Telemétricos*. Projeto Proágua Semiárido. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco. p. 113-145.
- Custodio, E., Llamas, M.R. 1976. *Hidrologia subterrânea*. Ediciones Omega S.A. Barcelona. vol 1. 1157p.
- Duque, J.G. 1980. *O Nordeste e as lavouras xerófilas*. 3ª Ed. Mossoró: Fundação Guimarães Duque. p. 337
- EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2004. *Zoneamento Agroecológico de Pernambuco – ZAPE*. Recife, Embrapa Solos – UEP Recife. II. 1CD-ROM.
- Feitosa, F. A. C., Vidal, C. 2004. *Estudos Hidrogeológicos de Pequenas Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste Brasileiro - Proposta*. CPRM. 85p.
- Ferreira, G. B., Silva, M. S. L. da, Costa, M. B. B. da, Moreira, M. M., Gava, C. A. T., Alves, C. de A., Mendonça, C. E. S. M., Chaves, V. C. 2010. *A influência das barragens subterrâneas na sustentabilidade social em assentamentos da Paraíba - Uma abordagem participativa*. In: Simpósio Sobre Reforma Agrária e Assentamentos Rurais, 4. Anais. Araraquara, SP
- Folk, R.L. & Ward, W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain parameters. *J. Sed. Petr.*, 27 : 3 - 27
- Gomes, H.A. 2001. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Serra Talhada. Folha SB.24-Z-C. Estados de Pernambuco, Paraíba e Ceará. Escala 1:250.000 / (Org. por) Gomes, H. A. – Brasília: CPRM
- Hvorslev, M.J., 1951. *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. Vicksburg, Miss., U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin 36, 50 p.

- Jatobá, L. 1999. *Relevo*. In: Andrade, M.C.O. (Org.). Atlas Escolar de Pernambuco. João Pessoa: GRAFSET. p. 26-32.
- Lacerda, F.F., Barros, A.H.C., Encranção, C.R.F., Reis, A.C.S., Neto, J.R.S., Ferreira, N.S. 1994. Climatologia das Estações Experimentais do IPA, Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária- IPA. Recife. 137p.
- Leal, O. 1998. Trabalhos de pesquisa e estudos hidrogeológicos efetuados nas aluviões. Fase I - Coleta de dados. Série Hidrogeologia, Informações Básicas, volume 22. Recife: CPRM. 25 p. il.
- Leite, J.F., Pires, S. de T. M., Rocha, D. E. G. A. da. 2000. Estudo hidrogeológico da bacia de Fátima - PE. Recife: CPRM. 16 p. + anexos.
- Morais, F. 1999. Estudo hidrogeológico sucinto para a locação de poços nas localidades de Parreira, Santana e Pau de Leite-Iguaraci/PE. Programa Água Subterrânea para a Região Nordeste. Projeto Centro de Pesquisa das Águas Subterrâneas. Recife: CPRM. 16 p. il
- Moreira, M. M., Santos, M. H. L. C., Rocha, J. C. da, Silva, M. S. L. da, Anjos, J. B. dos. 2007. *Avaliação dos impactos da barragem subterrânea em duas propriedades de agricultura familiar agroecológica no sertão da Paraíba*. In: Congresso Brasileiro de Agroecologia, 5., 2007, Guarapari. CD-ROM.
- Millar, A.A. 1978. *Drenagem de Terras Agrícolas: bases agronômicas*. São Paulo: McGraw-Hill, 276p.
- Oliveira, A. K. C. de, Silva, M. S. L. da, Mendonça, C. E. S., Ferreira, G. B., Chaves, V. C., Silva, D. J. 2007. *Avaliação qualitativa da água de barragens subterrâneas no semiárido nordestino brasileiro*. In: Congresso Brasileiro de Agroecologia, 5., 2007, Guarapari. Edição dos Resumos do V Congresso Brasileiro de Agroecologia na Revista Brasileira de Agroecologia, v. 2, n. 2. p.1402-1404.
- Otto, S. R. L. 1988. Estimativa da porosidade drenável em função das propriedades de solo orgânico. *Dissertação Mestrado UFV*. Viçosa. 89p.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R. 1987. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, New York, 553p.
- Poulsen, T. G., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Jacobsen, O. H. 1999b. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. *Soil Science*, v.164, n.2, p.877-887.
- Prefeitura Municipal de Afogados da Ingazeira. s.d. (*Disponível em: <http://www.pmafogadosdaingazeira.com.br/index.php?exibir=secoes&ID=12>, acesso em 14 de abril de 2011.*)

- Ribeiro, K. D.; Nascimento, J. M. S. do; Gomes, N.M.; Lima L.A.; Menezes, S.M. 2007. Relações matemáticas entre porosidade drenável e condutividade hidráulica do solo saturado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.11, n.6, p.600–606.
- Salgueiro, J. H. P. de B. & Montenegro, S. M. G. L. 2008. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo o método geoestatístico. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, v. 29, n. 2, p.174-185.
- Santos, J.P. dos & Frangipani, A. 1978. *Barragens submersas - uma alternativa para o Nordeste brasileiro*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 2, São Paulo, SP. Anais... São Paulo, ABGE, V.1. p.119-126.
- Santos, E. J. & Medeiros, W. C. 1999. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29, n. 1, p. 73-84.
- Santos, E. J. dos, Nutman, A. P., Neves, B. B. de B. 2004. Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: implicações sobre a evolução tectônica da Zona Transversal, Província Borborema. *Geol. USP, Sér. Cient.*, São Paulo, v.4, n.1 . Disponível em: <http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-874X2004000100001&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 14 set. 2011.
- SECTMA - Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco. Diretoria de Recursos hídricos. 1998. – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. Recife. 223p.
- Silva, A.O., Moura, G., Silva, E. F. F., Lopes, P.M.O., Silva, A. P. N. 2011. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência sob diferentes regimes de precipitações em Pernambuco. *Revista Caatinga* (UFERSA. Impresso), v. 24, p. 135-142.
- Silva, S. M. P. da. 1994. *Sistema de Informações para Gestão e Monitoramento dos Recursos Naturais da Microrregião do Pajeú-PE*. Projeto Alto Pajeú; Água no Sertão do Pajeú – O Município de Afogados da Ingazeira. Série Recursos Hídricos, 3. Recife: CPRM. 25p.il.
- Silva, M.S.L.da, Mendonça, C.E.S., Anjos, J.B.dos, Honório, A.P.M., Silva A. de S., Brito L. T. de L. 2007. *Barragem subterrânea: água para a produção de alimentos*. In Brito, L. T. de L., Moura, M. S. B. de, Gama, G. F. B. (Ed.). Potencialidades da água de chuva no semiárido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, p. 121-137.
- Silva, M. S. L. da, Anjos, J. B. dos, Mendonça, C. E. S., Ferreira, G.B., Silva, S. dos A. B. da. 2006. *Barragem subterrânea uma opção para exploração agrícola no semiárido*. In: Congresso Brasileiro de Agroecologia, 4., Belo Horizonte. Construindo horizontes sustentáveis: anais. Belo Horizonte: EMATER-MG. 1 CD-ROM.
- Soares, D.B.; Nóbrega, R.S. 2009. Detecção de tendência na ocorrência de veranicos na Microrregião do Pajeú-PE. *Revista de Geografia*. Recife: UFPE DCG/NAPA, v. 26, n. 3, set/dez.

van Beers, W. F. J. 1979. Some monographs for the calculation of drain spacings. Bulletin Volume 8, International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen. 48p.

SUDENE. Dados pluviométricos mensais do Nordeste: Pernambuco. Recife, 1990f. 363p.

Veiga Júnior, J. P. 1990. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional. Escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-C-VI Afogados da Ingazeira) Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM/CPRM. 121p.il. 2 mapas.

Weight, W.D. & Sonderegger, J.L. 2000. *Manual of applied field hydrogeology*. New York: McGraw-Hill, 609 p.

APÊNCIE I- Sondagens realizadas no trabalho de campo e descrição dos sedimentos.

Sondagem	Profundidade(m)	Descrição de campo	Observação
B1	1,2	0-1,2m: areia fina à média com grânulos dispersos. Cor castanho claro.	Atingiu o embasamento cristalino.
B2	1,8	0-1,8m: areia fina à média de cor castanho claro.	Atingiu o embasamento cristalino.
B3	2	0-1,2m: areia fina à média com matriz argilosa. Cor castanho escuro. 1,2-2m: semelhante ao nível sobreposto, porém com maior teor de argila.	Atingiu o embasamento cristalino.
B4	2,8	0-1,5m: areia mal selecionada; variando a granulometria de argila à areia média. Cor castanho escuro. 1,5-2,8m: areia argilosa de cor cinza escuro, c/ grânulos.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à entrada de água.
B5	0,5	0-0,5m: areia fina à média, cor marrom claro muito seca.	Atingiu o embasamento cristalino.
B6	0,3	0-0,3m: areia fina à média, cor marrom claro muito seca.	Atingiu o embasamento cristalino.
B7	3,1	0-1,2m: areia mal selecionada; granulometria variando de areia muito fina a fina e matriz argilosa. Cor castanho escuro. 1,2m-3,1m: areia fina com matriz argilosa. Cor cinza escuro. Material de textura plástica.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à entrada de água.
B8	2,1	0-1,7m: areia média bem selecionada de cor castanho claro. 1,7-2,1m: areia mal selecionada ;granulometria varia de silte a areia média. Cor castanho.	Atingiu o embasamento cristalino. Piezômetro instalado.

Sondagem	Profundidade(m)	Descrição de campo	Observação
B9	2,2	0-0,8m: areia mal selecionada; variando a granulometria de silte a areia média. Cor castanho claro. 0,8-1,4m: areia fina com matriz argilosa de cor castanho médio. 1,4-2,2m: argila com areia, bastante coesa, de cor castanho amarelado.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à presença de argila muito rígida. Piezômetro instalado.
B10	2,1	0-1,4m: areia média à grossa, cor castanho claro. 1,4-2,1m: areia argilosa de cor cinza. Com grânulos e seixos do embasamento.	Atingiu o embasamento cristalino.
B11	1,5	0-1,5m: areia média à grossa de cor cinza claro.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à camada de argila muito rígida.
B12	2	0-2m: areia mal selecionada; granulometria variando de silte à areia média. Cor cinza claro.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à entrada de água. Piezômetro instalado
B13	0,13	-----	Não foi possível atingir maior profundidade devido à camada de argila muito rígida.
B14	2,8	0-1,8m: areia fina à média de cor castanho 1,8-2,5m: argila plástica de cor cinza 2,5-2,8m: areia mal selecionada (gran. variando de silte a areia grossa) com grânulos e matriz siltosa de cor cinza.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à entrada de água. Piezômetro instalado
B15	2	0-2m: areia mal selecionada; granulometria variando de silte à areia média. Cor cinza claro.	Não foi possível atingir maior profundidade devido à entrada de água. Piezômetro instalado

APÊNDICE II- - Curvas granulométricas de cada amostra analisada e as classes de Breddin, utilizadas para a estimativa de K.

