

UMA ABORDAGEM PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO ESTADO DO PARANÁ

(Com ênfase sobre os Aquíferos Serra Geral e Karst)

Keiji Nakano (Equipe JICA)

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, à medida que a influência das atividades do ser humano sobre a destruição do meio ambiente foram se evidenciando, cresceu a demanda pela harmonia entre as atividades desenvolvidas pelo homem e o meio ambiente natural. Neste contexto, durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992, no Rio de Janeiro, foi apresentado o conceito do **Desenvolvimento Sustentável**, de que “a relação desarmônica entre o desenvolvimento e o meio ambiente coloca em risco o futuro da humanidade”, e que o desenvolvimento voltado para o futuro deveria ser na forma sustentável”.

Este conceito é igualmente importante para o desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos no Estado do Paraná, e foi aplicado no estudo para o desenvolvimento de águas subterrâneas, o qual faz parte do “Estudo para o Aproveitamento de Recursos Hídricos no Estado do Paraná”. O tema deste Seminário Técnico foi escolhido tendo em vista a aplicação deste conceito básico para estudo de recursos hídricos subterrâneos no Estado do Paraná quanto à produção sustentada da bacia subterrânea (vazão de sustentada/vazão permissível, nesta fase do Estudo).

II. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS SEGUNDO CONCEITO DE ÁGUA CIRCULANTE

Enfrentamos a dificuldade em conhecer o que é a água subterrânea, uma vez que ela se encontra sob a terra. Porém, tomamos contato diariamente, na sua forma alterada, ou seja, como água superficial ou quando esta toma parte do curso do rio. Para explanar este fato, vamos recorrer ao gráfico que ilustra a alteração diária do volume de precipitação e da vazão do médio Passaúna, cuja cabeceira está situada na região do Karst (Figura-1 e 2).

Neste gráfico podemos verificar a relação existente entre a precipitação e a vazão - aumento da vazão do rio, com a ocorrência de grandes precipitações, mostrando a influência do escoamento da água da chuva para o rio. Por outro lado, na época da estiagem, o Rio Passaúna mantém a sua vazão, mesmo com seguidos dias de estiagem. Esta vazão do rio é chamada de vazão de mínima e é alimentada principalmente pela água subterrânea (Figura-3). No período da chuva, aumenta o volume do escoamento superficial (água que escoar para o rio ou para o mar), o mesmo acontecendo com o volume de recarga da água subterrânea (água que se torna subterrânea, através da infiltração pelo solo), que aumenta o nível de água subterrânea, paralelamente ao aumento do volume de escoamento para o curso do rio. Assim, durante a época da chuva aumenta o volume da vazão de mínima (Figura-3).

Podemos observar, também, que o Q_7 , vazão mínima de 7 dias consecutivos, verificadas anualmente no Estado do Paraná, é quase análogo ao volume da vazão mínima observada anualmente na época da estiagem (Figura-3). Portanto, o valor do Q_7 , vazão mínima da época da estiagem, é um pouco menor do que a média da vazão mínima (escoamento médio anual da água subterrânea para o rio).

Podemos classificar os recursos hídricos subterrâneos em duas categorias. Aqueles com ciclo de recarga ou circulação rápida (precipitação \Rightarrow água subterrânea, água subterrânea \Rightarrow água superficial; e aqueles que praticamente não ocorre a circulação, como as águas termais da Formação Botucatu. O primeiro é denominado de águas subterrâneas de circulação e o segundo de águas subterrâneas armazenadas.

Quando o ser humano passa a aproveitar os recursos hídricos (captação - distribuição - aproveitamento - lançamento), a classificação dos recursos hídricos subterrâneos é de grande importância no seu aproveitamento, segundo a relação existente entre a velocidade da recarga da água utilizada e a velocidade da recarga da água subterrânea sob condições normais.

Água Subterrânea de Circulação:

São águas subterrâneas que recarregam em curto espaço de tempo (na escala do tempo planetário). Como já foi mencionado, são aquelas provenientes da água da chuva, que no processo de percolação pelo solo, se transforma em água subterrânea. As mesmas tornam à superfície através da descarga nas bacias hidrográficas, dentro do mesmo regime hídrico onde ocorreu a precipitação.

Podem, também, através da formação geológica local, se infiltrar no solo e se movimentar para regimes hídricos distintos e desaguar em outras bacias subterrâneas ou escoar diretamente para o mar. Estas duas formas de

ocorrências denominamos especificamente como: transitória ou por recarga profunda (Figura-4).

Como exemplo do primeiro caso, podemos citar parte dos aquíferos Guabirotuba e Karst. Para o segundo caso, uma parte do aquífero Karst e uma parte do aquífero Serra Geral correspondem a este exemplo.

Água Subterrânea Armazenada:

São águas subterrâneas que se circulam lentamente, levando dezenas, centenas e até milhares de anos, desde a infiltração no solo até o seu afloramento na superfície. Para o seu aproveitamento hídrico, do ponto de vista da escala de tempo da existência humana, aparenta estar parado, tal a lentidão da sua velocidade.

No Estado do Paraná, uma parte da formação Botucatu (mais especificamente na sua porção confinada) correspondem a este exemplo. De forma geral, os recursos hídricos subterrâneos de recarga profunda possuem capacidade dezenas de vezes maior do que aqueles da recarga transitória. Apesar da subdivisão estabelecida (recarga profunda e recarga transitória) os dois tipos de ocorrências se inter-relacionam. O primeiro quando seu potencial piezométrico positivo em relação ao segundo irá descarregá-lo aumentando sua descarga de base. Portanto, do ponto de vista superficial, são complementares.

Quando os recursos hídricos de recarga profunda forem consumidos pela velocidade do aproveitamento de recursos hídricos do ser humano, esgotarão rapidamente. Isto significa que o desenvolvimento deste manancial é realizado através da movimentação artificial da água subterrânea, que tem como fonte de realimentação a água subterrânea de recarga profunda, cuja circulação é lenta. Existe a possibilidade de transformar parte deste recurso para água subterrânea de recarga de transição, mas na maioria dos casos, o desenvolvimento em grande escala da água subterrânea de recarga profunda traz desequilíbrio na realimentação da água subterrânea, podendo dar origem a vários problemas nos poços ou até o esgotamento do manancial.

A água subterrânea de recarga transitória é uma parte do volume de água precipitada (cuja variação é grande, dependendo da condição climática), que se infiltra no aquífero, percolando lentamente, de acordo com os parâmetros hidráulicos deste (permeabilidade, transmissividade). Durante esse fluxo acontecem reações físico-químicas entre a água e rocha, chamada de inter-relação água-rocha, que dá origem a tipologia hidroquímica, tais como temperatura e específicas de acordo com a camada do reservatório.

Este manancial de recarga transitória possui função para coordenar de forma equilibrada, quantitativa e temporalmente, parte do volume precipitado o qual infiltra no solo, diminuindo assim o pico de vazão, através do retardamento do seu escoamento para o rio. O manancial de recarga transitória possui assim função para equilibrar o ambiente hídrico, regularizando o regime natural do rio, proporcionando condições para que a utilização/aproveitamento da água pelo ser humano possa ser efetuada de forma estável e planejada.

III. OCORRÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO ESTADO DO PARANÁ

Neste capítulo será feita a abordagem sobre a ocorrência dos principais aquíferos no Estado do Paraná com base no mapa hidrogeológico que ilustra a distribuição dos mesmos (Figura-5). Será feita uma abordagem mais detalhada com relação aos aquíferos Karst e Serra Geral (Basalto), ambos de grande importância para os dias de hoje.

(1) Ocorrência de águas subterrâneas no aquífero Karst

A região do Karst é produtora das principais águas minerais consumidas na cidade de Curitiba. A região tem como divisor o Rio Ribeira, localizada no Primeiro Planalto, que divide em 2 áreas de distribuição. Possui uma área de abrangência de cerca de 6.000Km². A porção situada na margem de jusante à direita do Rio Ribeira possui uma área de abrangência de cerca de 3.500Km² e está localizada próxima à cidade de Curitiba, atingindo uma ampla área que se estende de Norte a Oeste.

A palavra "Karst" é aplicada para formações geológicas sujeitas à corrosão química, que ocorre em regiões onde há presença de rochas de calcárea. No Estado do Paraná, denomina-se também de "Karst" àquelas formações geológicas que possuem esta característica peculiar. Em relação às formações geológicas, a área do Karst, é representada pelas Formações Setuva (idade de cerca de 2 bilhões de anos) e Grupo Açungui (idade de 600 milhões a 1 bilhão de anos). Com relação a litologia, as rochas carbonáticas são representadas por mármore calcítico e dolomítico e calcossilisto, e por rochas silicatadas representadas por mica-xisto, metabasitos, metaarenitos e metalamito, quartzito, etc.

Relativo a morfologia, como as rochas calcáreas são quimicamente susceptíveis à dissolução, apresentam sob forma de vales. Por outro lado, a região das rochas silicatadas, apresentam sob forma de espigões. A característica geológica da região do Karst no Estado do Paraná é a disposição repetida, em formato de cinturão, destes vales e cristas que acompanham a orientação das rochas metamórficas de NE-SW

para NEE SWW. Em subsuperfície o aparelho Karst desenvolve-se direção preferencial às estruturas características da kartificação, tais como como dolina no formato de funil e cavernas, ou estruturas no formato de colméia causadas pelas corrosões químicas, formando lençóis freáticos altamente permeáveis. Associados a esse contexto, existe a ocorrência de diques diabásio/dolerito (camada impermeável) e fraturas, que cortam verticalmente o pacote carbonático acima referido, o que divide em pequenos blocos a camada permeável dos vales com a camada impermeável das cristas.

Nas regiões mais deprimidas, coincidindo com áreas de maior dissolução, formam-se planícies fluviais abatidas, as quais estão preenchidas por cobertura aluvionar (areia, silte, cascalho), como por exemplo ocorre em Almirante Tamandaré.

A compartimentização dos pacotes carbonáticos permeável entre duas cristas de rochas silicatadas e diques de diabásio impermeáveis, gera unidades reservatório individualizadas similar a uma célula, conforme mencionado no relatório da SANEPAR (Fontana Lisboa e Souza, 1992; Figura-6). Estes reservatórios subterrâneos possuem uma relação como sistema de recarga entre água pluvial e fluvial, sob o ponto de vista hidrológico (Figura-7)

Podemos considerar a interligação de cada reservatório subterrâneo e dos demais reservatórios, a partir de 2 elementos, a seguir relacionados (Figura-8).

1) Interação recarga - vazão entre o sistema água superficial - água subterrânea.

- Ocorre a junção da água do rio (escoamento superficial do compartimento localizado de montante) com a descarga do reservatório subterrâneo para o rio. A água escoo como água superficial para o reservatório subterrâneo situada à jusante. Neste caso, podem ocorrer afloramento de água nos divisores, devido à barragem formada pelas divisórias impermeáveis dos reservatórios subterrâneos, que empurram as águas subterrâneas para a superfície.
- Conforme às condições hidrogeológicas (nível da água subterrânea, sedimentos aluviais e formação de dolinas), o reservatório subterrâneo situado à jusante poderá recarregar através da água superficial vinda de montante ou lançá-la do seu reservatório para o rio.
- Assim, na região do Karst, ocorre a função mútua de recarga e descarga entre águas superficiais e águas subterrâneas (similar a relação entre os rios das regiões com topografia em forma de leque com águas subterrâneas).

2) Ligação recarga profunda - descarga profunda por meio do escoamento

alimentada pelos reservatórios de água subterrânea através de sistema de fraturas.

- A recarga ou descarga profunda da drenagem ocorre através da circulação de águas subterrâneas que acompanham o sistema de fraturas, e não dependem da direção do curso do rio. A circulação entre os reservatórios subterrâneos ocorre pela movimentação de águas subterrâneas devido ao escoamento ou pela alimentação, causadas pela diferença do nível de água destes reservatórios.
- Geralmente, o fator circulação/diferença de nível de água subterrânea que corre ao longo do sistema de fraturas é definida pela característica topográfica de cada localidade. Assim como demonstra a pesquisa sobre a circulação de águas subterrâneas nas camadas de meios porosos (Figura-9, Toth, 1956), estas se movimentam ao longo das fraturas, em âmbito regional, intermediário e local, efetuando a ligação entre lençóis freáticos.

Portanto, existem dois tipos de circulação subterrânea na região do Karst:

- ① aquelas que possuem ligação com águas superficiais, obedecendo o curso do rio, como os rios Ribeira e Iguaçu, e que escoam promovendo os processos de descarga e e recarga para os reservatórios de águas subterrâneas localizadas à jusante do curso, e
- ② aquelas que, pela ligação entre recarga e descarga profunda, independentemente da configuração topográfica, escoam do Alto Iguaçu, localizada na Região Metropolitana de Curitiba, para direção do curso principal do Rio Ribeira ou para a Região Litorânea, segundo sistemas de fraturas. Porém, com base nos dados hidrogeológicos existentes, não podemos discutir de forma quantitativa, devido à falta de dados sobre evapotranspiração e monitoramento de águas subterrâneas.
Podemos acrescentar que do ponto de vista quantitativo, de modo geral, a recarga transitória é maior do que a recarga profunda.

(2) Formação Serra Geral (Rochas Basálticas)

Esta formação geológica está amplamente distribuída no Estado do Paraná, com área de cerca de 100.000Km² (cerca de 50% do Estado), cobrindo o Terceiro Planalto (excetuando a região da formação Caiuá, na Região Noroeste). A Terra Roxa, produto do intemperismo do basalto, propicia um solo fértil, o que tem sustentado o desenvolvimento da agricultura no Estado do Paraná.

Esta camada geológica é formada principalmente pelo afloramento do basalto à superfície, originado pelos derrames de lavas toleíticas. Derrames de composição andesítica ocorrem forma pontual na zona de contato do Segundo e Terceiro Planalto (Figura-10). Às vezes, a parte inferior dos primeiros derrames apresentam intercalações de arenito Botucatu (intertrapp). A profundidade máxima desta formação geológica atinge cerca de 1.400m.

No Estado do Paraná, a espessura de cada derrame basáltico pode variar de 5m a 50m. Especialmente na região Norte, a espessura média é de 15m (entre 5 a 20m), enquanto na região Sul ela se torna mais espessa (10 a 50m.), média de 30m. A seção tipo hipotética para um derrame é constituída a partir da base de: zona brechada inferior, zona de distribuição horizontal inferior, zona de disjunção colunar central, zona brechada superior e zona de disjunção horizontal superior (Figura-10). A formação Serra Geral, cuja espessura máxima atinge 1.400m., é composta pela intercalações sucessivas de derrames, na qual cada derrame apresenta espessura distinta entre si. Apesar da estrutura de juntas descritas dos derrames ocorrerem em todo o pacote da formação Serra Geral, constituindo assim um meio poroso de origem secundária, a circulação de água neste meio se efetiva em sua maior parte até as profundidades de 150m na Região Sul e 180m na Região Norte.

A Formação Serra Geral é também, a exemplo do Karst, seccionada por intrusões dos diques de diabásio e dolerito e por fraturamentos tectônicos. A direção principal das intrusões dos diques diabásio/dolerito é NW-SE, segundo o Arco de Ponta Grossa, representada pela linha que une a cidade de Maringá e Ponta Grossa. Podemos observar, através da imagem Landsat, fraturas tectônicas de grande escala que cortam não somente os derrames de lava basáltica, mas também os diques. Os basaltos da Formação Serra Geral sofreram processos de intenso intemperismo, principalmente na Região Norte, resultando em uma camada de solo e manto de alteração, aumentando a porosidade e conseqüentemente a capacidade de armazenamento do pacote como um todo.

Do ponto de vista hidrogeológico, a Formação Serra Geral apresenta armazenamento e circulação do manancial subterrâneo, segundo camadas horizontais representadas principalmente pelo intervalo de solo e manto de alteração e zonas brechadas (superior e inferior). Estes níveis produtores são interligados entre si pelos fraturamentos tectônicos, os quais apresentam desenvolvimento vertical, aumentando ainda mais o potencial produtivo. A camada de intemperismo, a exemplo das rochas graníticas, exerce importante papel no processo de recarga de águas subterrâneas da região basáltica.

Na porção Norte da Formação Serra Geral, as espessuras dos derrames são menores ocorrendo dessa maneira um maior número de níveis brachóides para uma mesma espessura total de basalto comparado à Região Sul, onde os derrames são

mais espessos. Outros fatores que tornam a região Norte da Formação Serra Geral mais produtiva que a Região Sul é a maior espessura da camada de solo, além da incidência de fraturamentos tectônicos mais significativos (como por exemplo nos arredores da cidade de Maringá). Portanto, para o desenvolvimento de águas subterrâneas, os aquíferos da Formação Serra Geral foram divididos em duas partes: a Norte e a Sul. (Figura-12 e 13).

(3) Demais ocorrências

Rochas graníticas, incluindo rochas graníticas e gnaisses:

Localizadas no Primeiro Planalto, são águas subterrâneas armazenadas nas fraturas e ocorrem na região da cidade de Curitiba. Como sistema de recarga, é importante o desenvolvimento das camadas de intemperismo. Constitui um importante manancial de águas subterrâneas para esta região.

Formação Furnas:

Localizada no Segundo Planalto, são formadas pelas fraturas e camadas porosas de arenito de cerca de 350 milhões de anos.

Formação Botucatu:

Localizada no Terceiro Planalto, os seus reservatórios armazenam imenso volume de águas subterrâneas, nas camadas porosas de arenitos (capacidade útil de 25%) de cerca de 200 milhões de anos (Figura-13).

Este aquífero possui uma abrangência bem mais ampla do que a Formação Serra Geral. À medida que aumenta a profundidade do aquífero, aumenta a temperatura da água. Atinge a temperatura entre 40°C a 60°C, e proporciona um grande manancial de águas térmicas com características alcalinas e levemente alcalinas (volume total estimado: cerca de 150 bilhões de toneladas). Possui grande potencial como manancial de águas subterrâneas do Estado do Paraná, importante como recurso hídrico subterrâneo e manancial de águas térmicas.

Formação Caiuá:

Localizada no Terceiro Planalto, tem como aquífero a camada homogênea de arenito, de cerca de 100 milhões de anos, com água subterrânea levemente acidificada (Figura 14). Numa abordagem ampla, mesmo sem considerar as condições geológicas específicas, a homogeneidade da camada do aquífero proporciona a perfuração do poço com resultado esperado.

Formação Guabirota:

Localizada na Região Metropolitana de Curitiba (Figura 5), é uma formação geológica de cerca de dez milhões de anos. Na porção inferior ocorrem camadas de arenito e conglomerados, que formam os aquíferos. A água armazenada é do tipo neutro com leve tendência à dureza. Atualmente, vem sendo utilizada para

fins industriais e domésticos (condomínios e edifícios) na Região Metropolitana de Curitiba. Pela sua localização e pelas características químicas, é um importante Manancial hídrico subterrâneo para abastecer as indústrias e localidades da Região Metropolitana de Curitiba. Devido ao seu atual estado de aproveitamento, é importante que seja consolidado urgentemente o sistema de monitoramento para observar o nível de água subterrânea.

IV. METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS.

(1) Aproveitamento de Recursos Hídricos Subterrâneos de Recarga de Transição

Como foi mencionado no Capítulo II, existem dois tipos de recursos hídricos subterrâneos segundo tipo de circulação: ① de recarga de transição e ② de recarga profunda. Simplificando, podemos dizer que se optarmos pela utilização de recarga profunda, estaremos enfrentando futuramente a crise do esgotamento do recurso hídrico subterrâneo de recarga transitória. Por outro lado, se utilizarmos de recarga transitória dentro da sua capacidade de recarga, é possível evitar que ocorra o exaurimento do manancial, uma vez que o volume captado é realimentado.

Assim, ao considerarmos o desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos de forma sustentável, é necessário pesquisar, em primeiro lugar, o aproveitamento do manancial de recarga de transição, e não o de recarga profunda.

(2) Estabelecimento da vazão sustentada

Para o desenvolvimento sustentável do recurso hídrico subterrâneo do tipo recarga de transição, acima referido, temos como limite do volume aproveitável o volume de recarga. Este manancial possui mecanismo próprio tais como vazão de recarga e descarga, condicionado as diferentes condições hidrogeológicas, topográficas de cada compartimento unitário. A utilização deste manancial subterrâneo deverá levar em conta não somente as necessidades humanas, mas a manutenção do ecossistema como um todo, sendo de grande importância.

- ① Descarga superficial: regularizar a vazão do rio, através da descarga de transição, proporcionando a conformação do meio físico (leito do rio, curso do rio) e manutenção do meio biológico (ecossistema do rio). Somados a esses usos, devemos considerar com especial ênfase as necessidades humanas, os quais interferem tanto no meio físico, quanto no meio biológico.

- ② Descarga subterrânea: a manutenção de um nível piezométrico adequado, possibilita que a permanência das surgências de fontes naturais, os quais alimentam os compartimentos de jusante, prevendo também situações de abatimentos de solo (subsidência do solo por rebaixamento do nível freático).

Uma vez que o ser humano deve viver em harmonia com o meio ambiente, é necessário que aproveite os recursos hídricos subterrâneos de maneira sustentável, sob condições econômicas e legais, não trazendo influências negativas sobre o meio ambiente, tanto no regime hídrico superficial quanto no subterrâneo, como já mencionado. Para tanto contamos como o gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos de caráter transitório. Do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, significa que podemos utilizar apenas uma parte desta vazão. Esta porção a ser desenvolvida de forma sustentável, é a vazão máxima que poderá ser captada e constitui a vazão de segurança/vazão permissível.

Por outro lado, a vazão máxima de segurança por poço, é obtida através do teste de bombeamento, e determinada pelo seguinte mecanismo:

- Quando o aquífero a ser testado, for do tipo confinado (no Estado do Paraná, a maioria das águas subterrâneas pertencem a este tipo), a retirada da água subterrânea através do bombeamento, é compensada imediatamente pela infiltração nas áreas de descarga. Esta recarga suplementar é realizada por percolação que corre ao longo do corpo das áreas permeáveis com sentido vertical e descompressão do aquífero, que ocorre em sentido perpendicular a percolação. No reservatório subterrâneo do tipo aquífero confinado, possui movimento de elasticidade que, com a redução da pressão devido ao bombeamento, provoca uma descompressão, expelindo assim a água para o ponto bombeado.

- Como informação adicional, o cálculo do volume da água subterrânea aproveitável, obtida através do teste de bombeamento é feito como ilustra a Tabela-1.

Se considerarmos o desenvolvimento do aquífero confinado através da vazão máxima possível, obtida através do teste de bombeamento, estaremos utilizando inclusive as águas subterrâneas normalmente destinadas para recarga de transição. Isto significa que o volume de captação máxima sustentável de todo reservatório, calculado a partir do valor da vazão máxima possível por poço, obtida no teste de bombeamento resulta em um balanço hídrico deficitário.

Portanto, o cálculo do manancial disponível de cada reservatório (volume máximo de captação para aproveitamento sustentável) não poderá ter como base o resultado do teste de bombeamento do poço, mas os dados do balanço hídrico subterrâneo (Água Subterrânea de Recarga Transitória). No Estado do Paraná, pelos dados atuais disponíveis, correspondem ao valor médio do Q_r dos rios. O resultado

dos testes de bombeamento, deve ser utilizado para o estabelecimento do número e localização de poços.

O estabelecimento detalhado, do volume máximo aproveitável, deverá ter como premissa básica a influência de recursos hídricos subterrâneos de recarga transitória sobre o meio ambiente.

Devido às limitações impostas pelo estágio de desenvolvimento do conhecimento ambiental no campo de águas subterrâneas, e pelos dados atualmente disponíveis, não atingimos a completa compreensão do impacto que o desenvolvimento de águas subterrâneas poderá exercer sobre o meio ambiente. Podemos supor que a tendência é que a obtenção dos parâmetros para controlar o impacto que o desenvolvimento de águas subterrâneas poderá trazer sobre o meio ambiente, seja feita de forma mais completa. Podemos acrescentar ainda, que no Estado do Paraná, devido à carência de vários dados sobre o sistema de águas subterrâneas, não possuímos a visão global da situação. No entanto, no que se refere à recarga de transição, componente da água subterrânea circulante, podemos efetuar o cálculo a nível regional (Figura-15).

Assim, no Estado do Paraná, foi estabelecido hipoteticamente o valor 0 para a recarga subterrânea profunda em circulação (que é a base para o estabelecimento da vazão aproveitável). Esta hipótese torna o cálculo baseado apenas na recarga transitória, apesar de que em realidade o manancial hídrico em circulação é composto por dois tipos de recargas (transitória e profunda). O fato de não levar-se em conta os valores de recarga profunda permite, assim, o cálculo do desenvolvimento de águas subterrâneas com margem de segurança sobre o impacto ambiental. No capítulo II consideramos o volume do manancial hídrico em circulação como Q_7 (por sua vez igual a recarga de transição). Como já foi mencionado, o valor do Q_7 é menor do que a média da recarga de transição, esta hipótese estabelece também a vazão dentro do limite de segurança.

É necessário estabelecer de forma provisória o volume de aproveitamento permissível, com base nos seguintes itens: na vazão do manancial hídrico subterrâneo em circulação, obtida pela média do valor do Q_7 ; analisar o sistema de circulação e recarga de águas subterrâneas com base nos dados atualmente existentes e nas experiências e conhecimentos científicos; e prever e avaliar os possíveis impactos que o desenvolvimento de águas subterrâneas poderá acarretar sobre o meio ambiente.

O conceito provisório decorre com a necessidade de implantação de um monitoramento adequado, para o desenvolvimento definitivo das águas subterrâneas (monitoramento de águas subterrâneas, da vazão de águas superficiais, do rebaixamento do solo, das condições climáticas, entre outros), podendo assim checar o volume permissível estabelecido, e efetuar correções de acordo com a situação.

Através destes monitoramentos, será possível o aproveitamento de águas subterrâneas em grandes escalas.

Os diversos monitoramentos em conjunto com o desenvolvimento de águas subterrâneas, permite não só a fiscalização para evitar impactos negativos sobre o meio ambiente, mas também uma fonte de informações de grande importância com vistas aos seu aproveitamento.

Estas são as considerações básicas para estabelecimento da vazão de segurança e do desenvolvimento permissível no Estado do Paraná. Farei, a seguir algumas considerações sobre a forma concreta para o estabelecimento da vazão de segurança, considerando que o sistema de monitoramento de águas superficiais no Estado do Paraná são insuficientes.

Em primeiro lugar vamos considerar, com base nos valores obtidos, que o valor mínimo da vazão permissível/vazão de segurança corresponde a 10% do manancial de águas subterrâneas em circulação. A seguir, consideramos o mecanismo de circulação de águas subterrâneas de cada manancial subterrâneos e estabelecemos a porcentagem da vazão permissível, com relação ao seu volume em circulação (Tabela 2).

- **Região do Karst:** este manancial apresenta em meio com grande permeabilidade, estabelecendo a circulação de troca com as águas superficiais num espaço de tempo bastante rápido. Diante desta característica, de rápida realimentação, foi considerada como 30% a porcentagem da vazão permissível com relação ao valor médio do Q_7 . O valor médio do Q_7 normalmente é o dobro do valor de $Q_{10.7}$. Portanto, o valor da vazão permissível da região do Karst, é aproximadamente igual ao 50% do $Q_{10.7}$, aplicado usualmente no Estado do Paraná. Na prática, o desenvolvimento de águas subterrâneas é realizado numa determinada área, e não em todo manancial. Portanto, devemos considerar como reservatório o local determinado para captação, e como área de influência, a área da bacia à montante, sendo a vazão permissível 30% do valor médio do Q_7 desta bacia hidrográfica. No que se refere a escolha do local para perfuração do poço será necessário analisar diversas características hidrogeológicas peculiares, como por exemplo, volume de captação pretendido e consequente rebaixamento do nível de água em cada poço, as camadas de aluviões e o desenvolvimento das dolinas, estabelecer corretamente a localização e o espaçamento dos poços. Neste caso, é de grande importância o monitoramento da vazão principalmente nos trechos da drenagem correspondentes a sua entrada e saída de cada compartimento possibilitando assim quantificar o potencial dos mesmos, localizada à foz da região onde vai ocorrer o desenvolvimento de águas subterrâneas e outra à entrada da montante do reservatório (se houver afluentes, poderá ser vários).

- **Formação Serra Geral:** devido a diferença de potencial produtivo entre Formação Serra Geral porção Norte e Sul, a estimativa para vazão permissível para a parte Norte é de 20% do valor médio do Q_7 e para a parte Sul, 15%. Quanto ao aproveitamento, devemos tomar algumas providências para proteger a área de recarga para cada bateria de poços, levando em consideração também a economia com adução. Para cada bateria de poços (máximo 8) distanciados entre si de um valor maior que a distância de interferência avaliada nos testes de bombeamento, sendo a vazão total explorável em função da vazão permissível pela área disponível. O monitoramento será efetivado com a localização dos poços piezométricos, para observação dos níveis piezométricos, geograficamente a montante e a jusante segundo as principais direções de fraturamento.

Com base nestas considerações, foram feitas as estimativas da vazão permissível de cada aquífero do Estado do Paraná. O resultado está ilustrado na Tabela 2.

V. CONCLUSÃO

A vazão permissível analisada e proposta é provisória, calculada a partir dos dados existentes. Considero a necessidade da revisão periódica deste valor provisório, através da implementação do monitoramento, o qual deverá ser realizado paralelamente ao desenvolvimento dos recursos hídricos. Os problemas geotécnicos relacionados ao aproveitamento de águas subterrâneas (como abatimento de solo), bem como de ordem hidráulica, poderão ocorrer não só pelo esgotamento do manancial, como também provindo de problemas localizados, tais como condições hidrogeológicas, seleção da localização dos poços, ou distância entre os mesmos. Estes problemas poderão ser solucionados através da mudança dos locais selecionados. Portanto, é necessário que a origem de cada problema seja esclarecida, e conforme a necessidade, revisar a vazão permissível.

Tabela-1 Avaliação dos Recursos de Água Subterrânea baseado no Teste de Bombeamento e Informações Geológicas

Aquifero	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	Armazenamento Total x milhão m ³
	Área km ²	Produção do Poço x 10 ⁻³ m ³ /s	Capacidade Específica m ³ /h/m	Raio de Interferência m	Potencial Aparente x 10 ⁻³ m ³ /s/km ²	
Karst	5,740	44.40	70	400	89.0	1,200
Crystalline Rocks	7,540	5.56	1	500	6.9	5,200
Early Paleozoic	7,150			500	3.6	
Middle-Late Paleozoic	17,400	0.00	1	400	5.6	3,500
Late Paleozoic	15,700			500	3.6	
All of Botucatu F. & Serra Geral	101,110	*1	124	-	-	*2
6. Botucatu F. & Serra Geral F. north	(59,050)	11.11		2	400	24,000
7. Botucatu F. & Serra Geral F. south	(42,060)	3.33		1	500	2,100
Caíua F.	30,450	8.33		2	300	7,300
Curitiba Metro. Area	1,130					
10. Guabiroba F.	(920)	3.33		2	500	1.2
11. Alluvium System	(180)					
12. Granitic Rocks	(300)	4.17		1	500	75
Quaternary System in Coastal Range	1,950					
14. Quaternary River Bed (Delta/River bed)	(380)	5.56		20	150	4.5
15. Marine Terrace Deposit	(1,570)	0.28		3	200	0.63

- 1) Raio de Interferência no momento do bombeamento da Produção do Poço
 2) Potencial aparente dos aquíferos confinados
 3) Produção do posto do Aquífero Confinado de Botucatu
 4) estimado pela porosidade efetiva, espessura e área da Formação de Botucatu

Tabela-2 Avaliação Potencial dos Recursos de Água Subterrânea baseada na Circulação da Água

Aquifero	(2)	(3)	(4)		(5)		(6)	
	Área km ²	Precipitação x 10 ⁻³ m ³ /s/km ²	Vazão Média x 10 ⁻³ m ³ /s/km ²	% *	Potencial da Água Subterrânea x 10 ⁻³ m ³ /s/km ²	% *2	Permissividade da Produção %	x 10 ⁻³ m ³ /s/km ²
Karst	5,740	53	22	41	8.29	38	30	2.87
Crystalline Rocks	7,540	58	18	31	6.37	35	10	0.637
Early Paleozoic	7,150	49	21	44	3.61	17	10	0.361
Middle-Late Paleozoic	17,400	48	19	40	4.69	23	10	0.469
Late Paleozoic	15,700	49	22	45	4.66	21	10	0.466
All of Botucatu F. & Serra Geral F.	101,110							
6. Botucatu F. & Serra Geral F. north	(59,050)	52	25	48	7.78	31	20	1.58
7. Botucatu F. & Serra Geral F. south	(42,060)	53	39	73	5.56	14	15	0.834
Caíua F.	30,450	53	20	38	12.22	61	10	1.22
Curitiba Metro. Area	1,130	53	8	15	3.53	44	10	0.353
10. Guabiroba F.	(920)	53					20	0.706
11. Alluvium System	(180)	53						
12. Granitic Rocks	(300)	53						
13. Quaternary System in Coastal Range	1,950	53	90	169	13.5	15	30	4.05
14. Quaternary River Bed (Delta/River bed)	(380)	53	78	147				
15. Marine Terrace Deposit	(1,570)	53						

- 1) Vazão média de do rio de cada aquífero
 2) Estimada como recursos de água subterrânea pela análise da vazão de base baseada na média Q7de cada aquífero
 3) Estimada através de experiências de desenvolvimento da água subterrânea e sistema de recarga de cada aquífero
 4) Vazão média do rio de precipitação de cada aquífero
 5) Potencial da água subterrânea da vazão do rio de cada aquífero

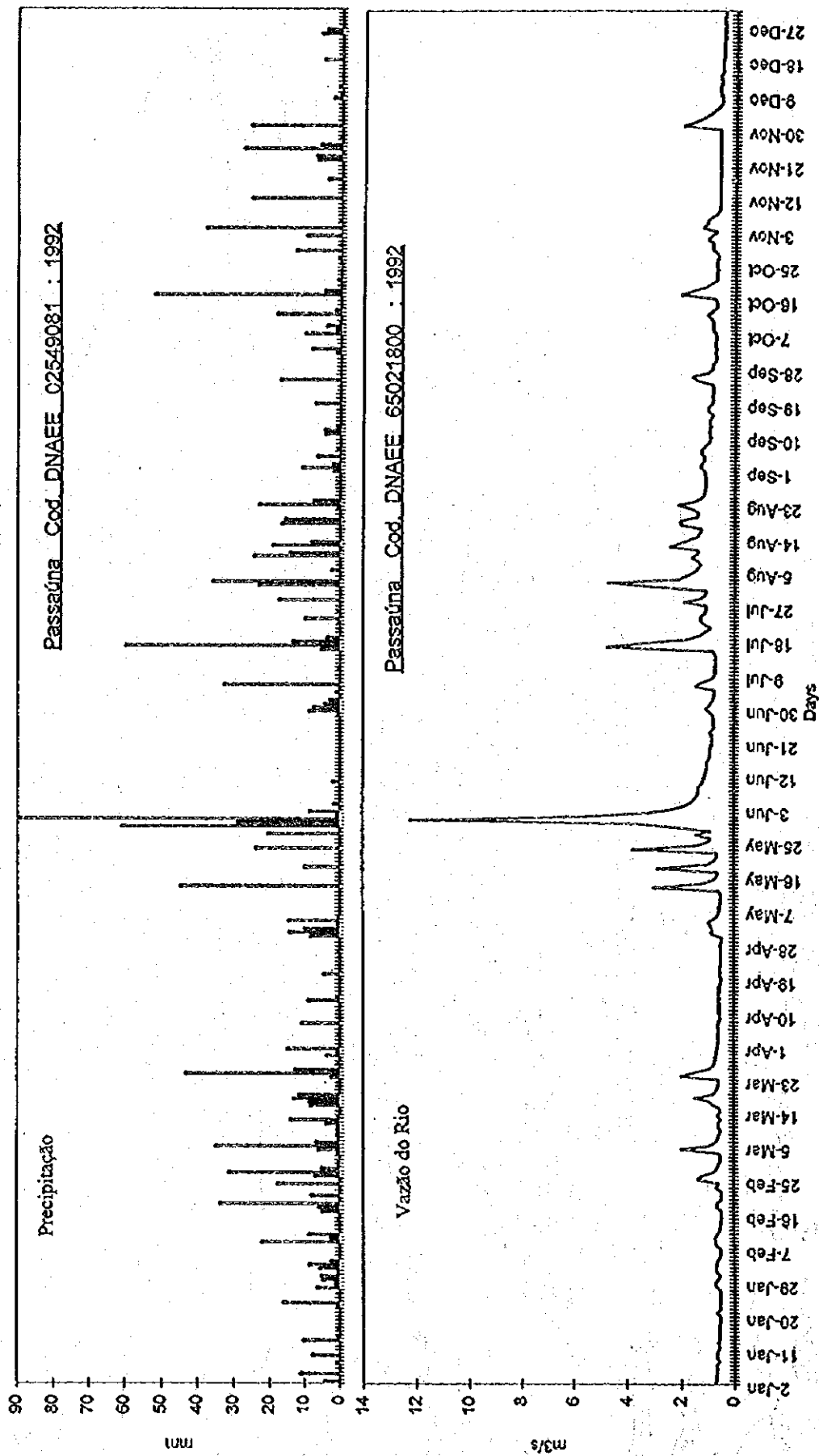
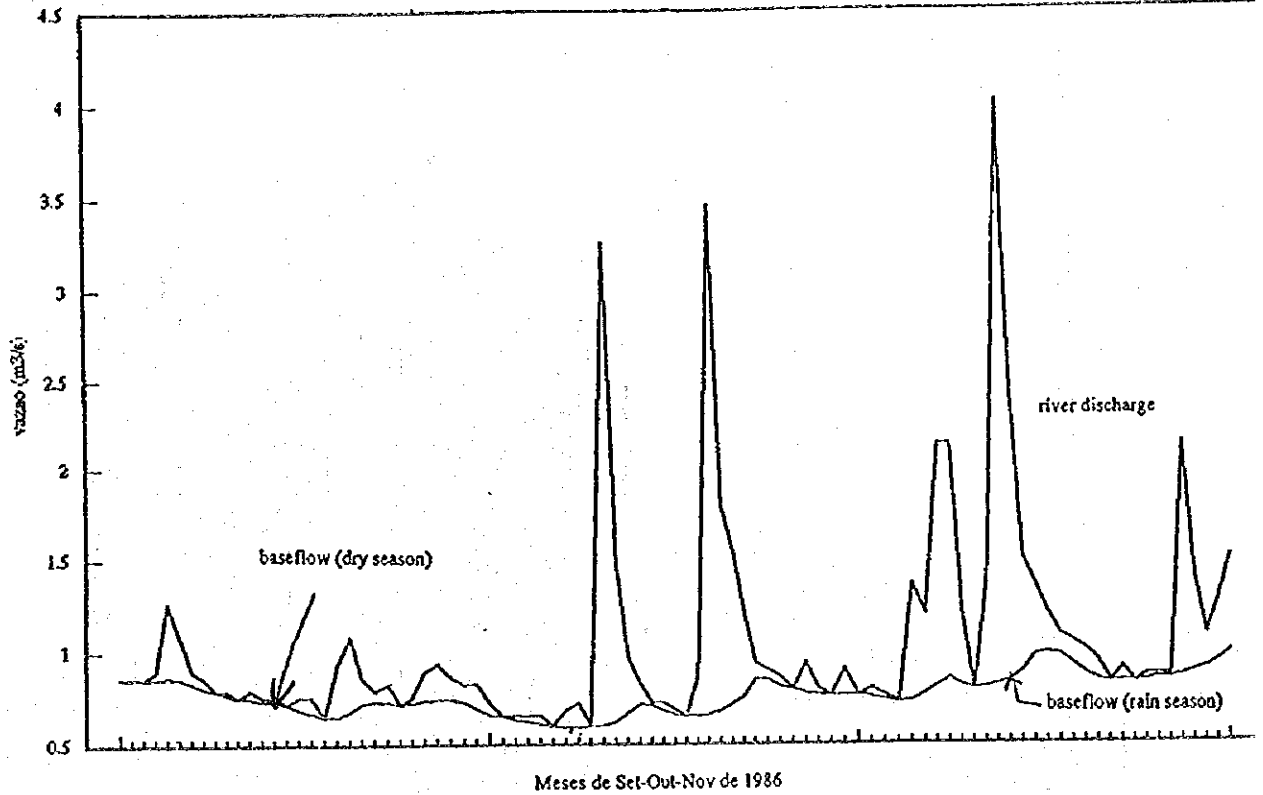


Figura - 2 Correlação Entre Precipitação Diária e Vazão Diária do Rio

RIO PASSAUNA
Estação Fluviométrica : Olaria Pioli



SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO (Vaine: 1994)

IAP-GTZ
1893

Figura - 3 Desvio Sazonal de Vazão de Base

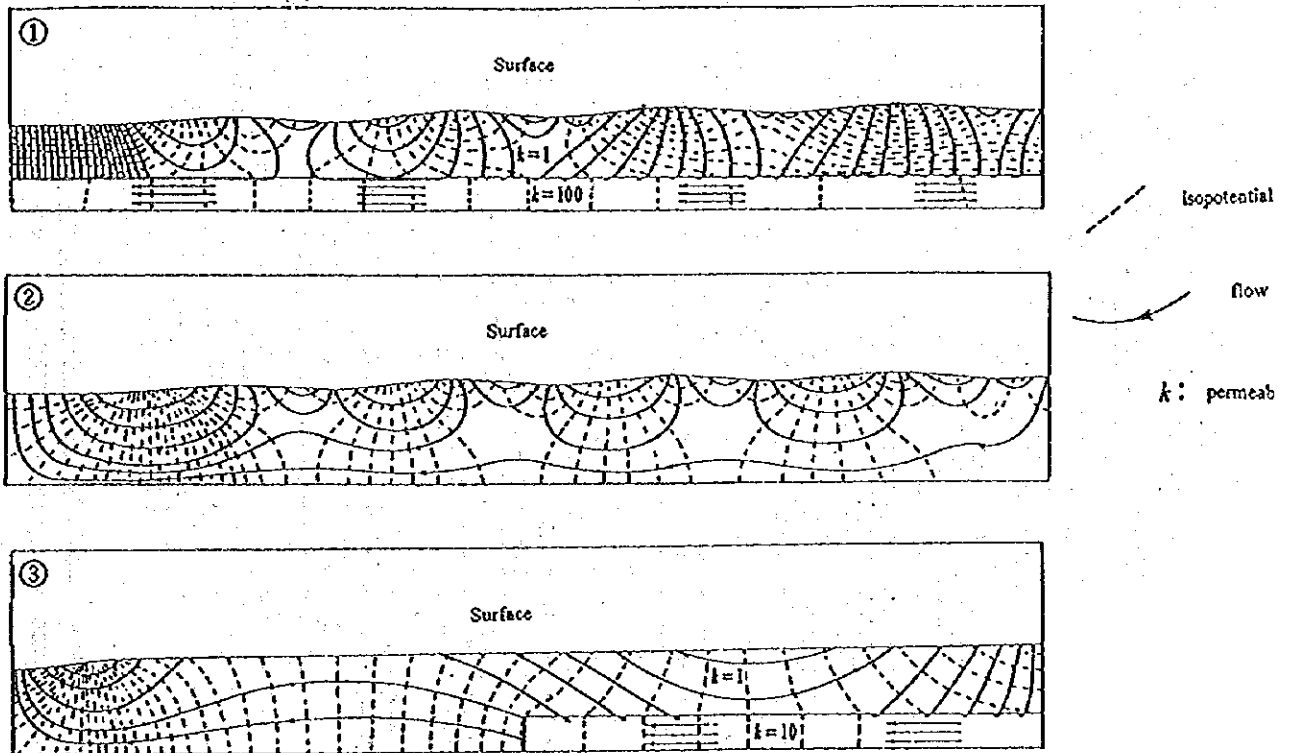


Figura - 4 Padrão de Sistema de fluxo em alguns Modelos de Perfil de Hidrogeologia (Freeze, witherspoon; 1967)

LEGENDA en La Folha Segunda

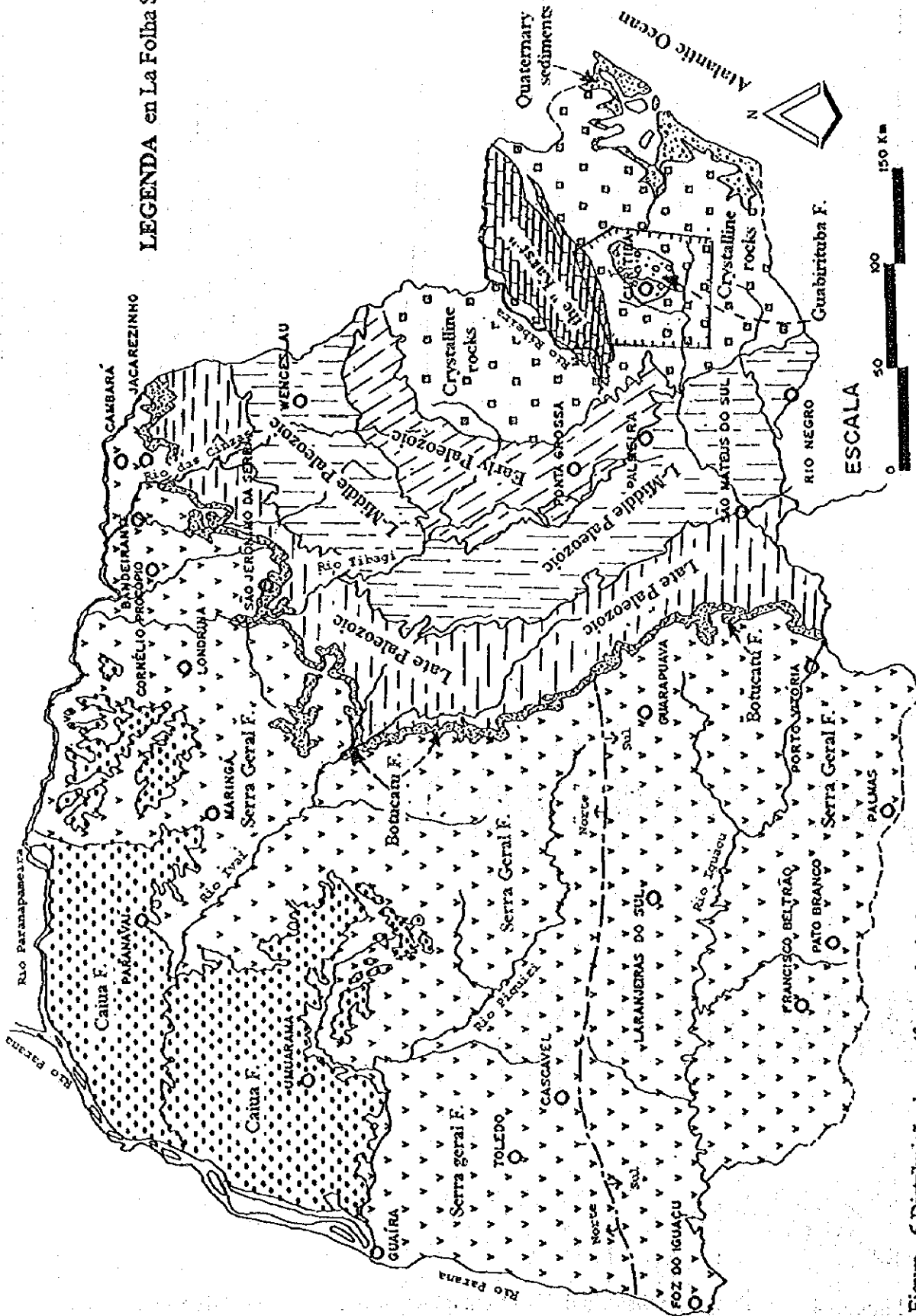





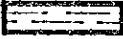
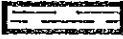




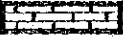


Figura - 5 Distribuição dos aquíferos principais no Estado do Paraná (do mapa geológico da MINEROPAR (1986), figura do Dr. Fraga (1993))

LEGENDA

Symbol	Description :	Aquifer Type and Potential	
		porous	Fracture
	Guabirubá F. sd. & silt intercalated with gravel, deposited in river bed and faciesine	B	X
	Quaternary sediments medium-fine sand, silt, and thin gravel bed, deposit in river bed and lagoon.	A	X
	Calua Formation mainly fine-medium sand stone, oxidation and cross lamina, deposited in desert, mainly.	A	X
	Serra Geral Formation tholeiite basalt flow, massive, amygdaloidal, aphanitic, accompanied with some andesite in last stage. related with basic intrusion as like dike and sill.	X	A - AA
	Botucatu Formation fine-medium sand stone, mainly cross lamina with some parallel lamina and some silicified due to basic intrusion. deposited as sand dune of desert	AAA	
	Passa Dois Group composed with formations of Rio do Rasto, Teresina, Serra Alto, Itaiti. mainly silt stone and mud stone with few sand stone, well bedded, deposited in shallow marine to delta.	X b	b - c
	Guata Group composed with formations of Palermo and Rio Bonito silt stone and sand stone intercalated with some limestone. deposited in shallow marine to delta.	B	b - c
	Itararé Group composed with formations of Rio do Sul, Mafra and Campo Tenente. silt stone and coarse-fine sand stone intercalated with calcareous sand stone. deposited in beach, delta and fluvio-glacial.	C	b - c
	Parana Group composed with formations of Ponta Grossa and Furnas. silt stone and medium-coarse sand stone deposited in shallow marine, beach to delta.	X	b - c
	Castro Group composed with formation of Vila Maria. limestone intercalated with silt stone and sand stone. deposited in shallow marine.	X	b - c
	Pre-Silurian Crystalline rock granite, gneiss, crystalline schist and "green rock" except carbonate rocks.	X	b - c
	the "Karst" composed with carbonate rocks in Acungui G. and Setuva G. limestone, dolomite and their schist intercalated meta-silt, meta-sand, meta-conglomerate and crystalline schist.		AAA

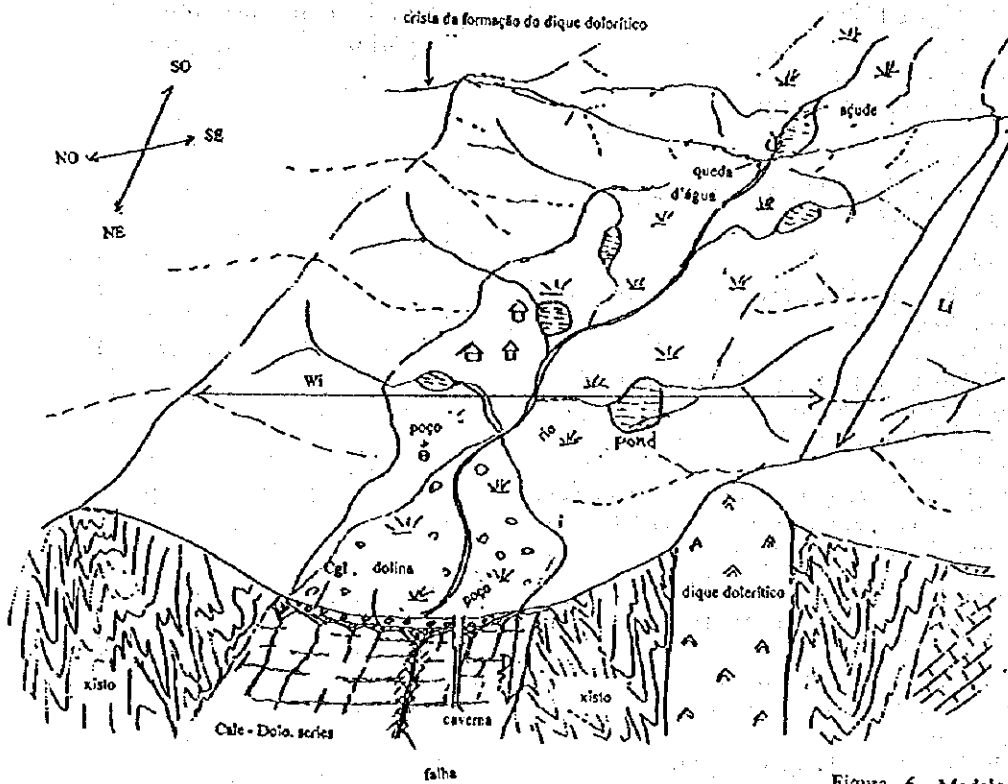


Figura - 6 Modelo de Aquífero do Karst

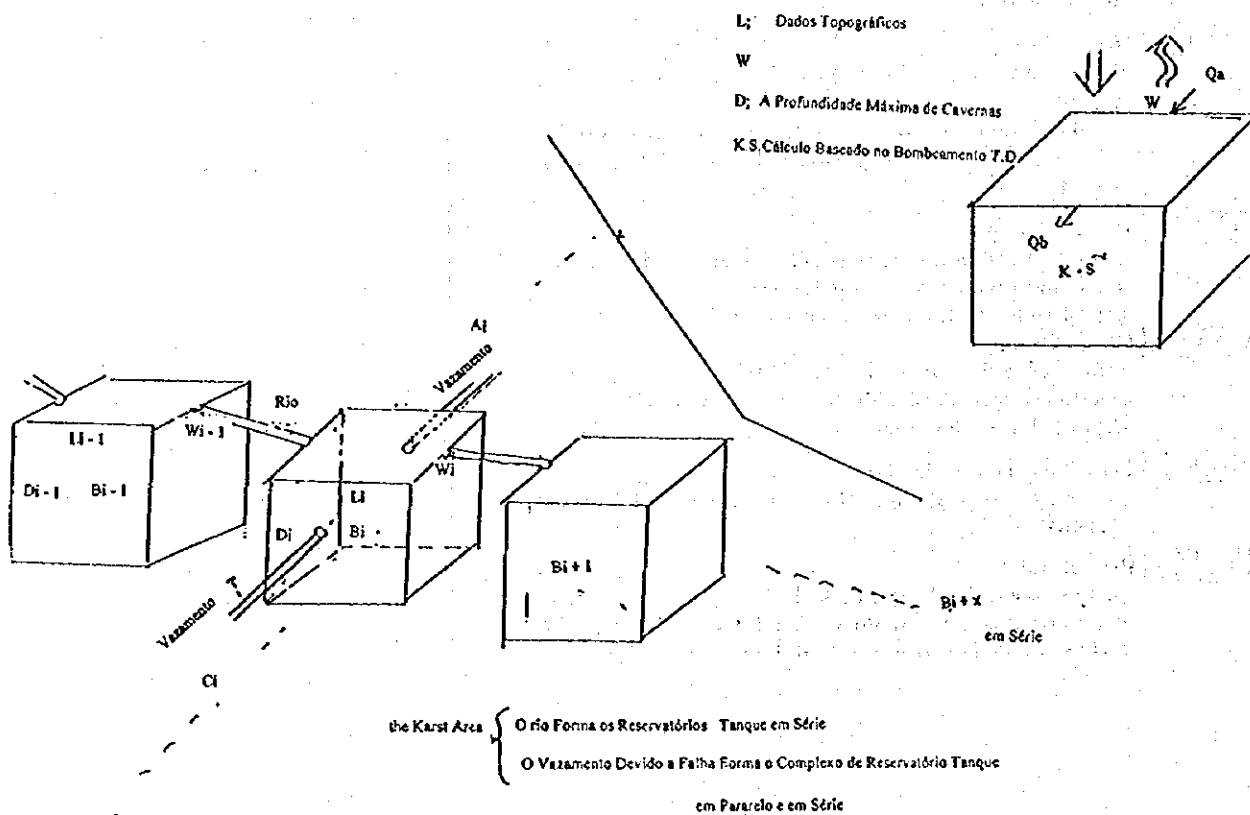
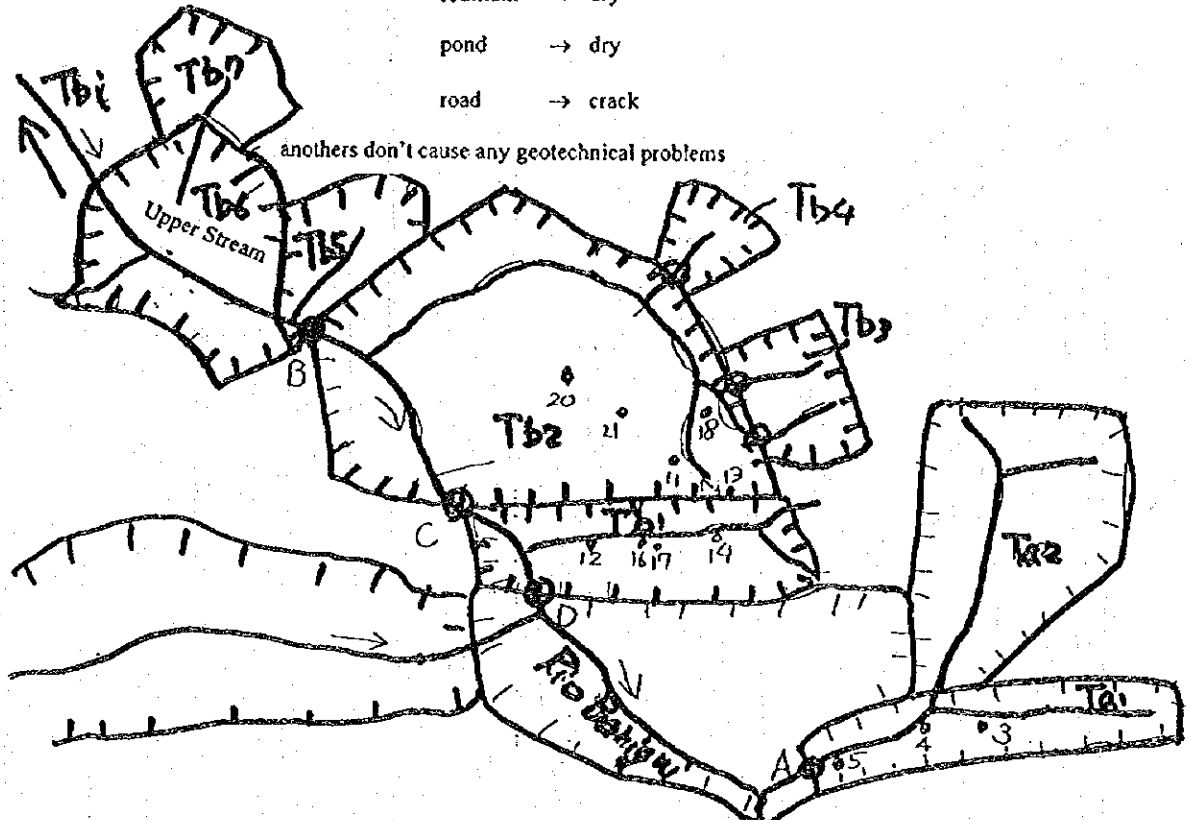


Figura - 7 Tanque Modelo da Área do "Karst"

Spatial permissive yield
For example in the "Karst"

Well number: 3 and 5 see well location map on a wall

- fountain → dry
- pond → dry
- road → crack



others don't cause any geotechnical problems

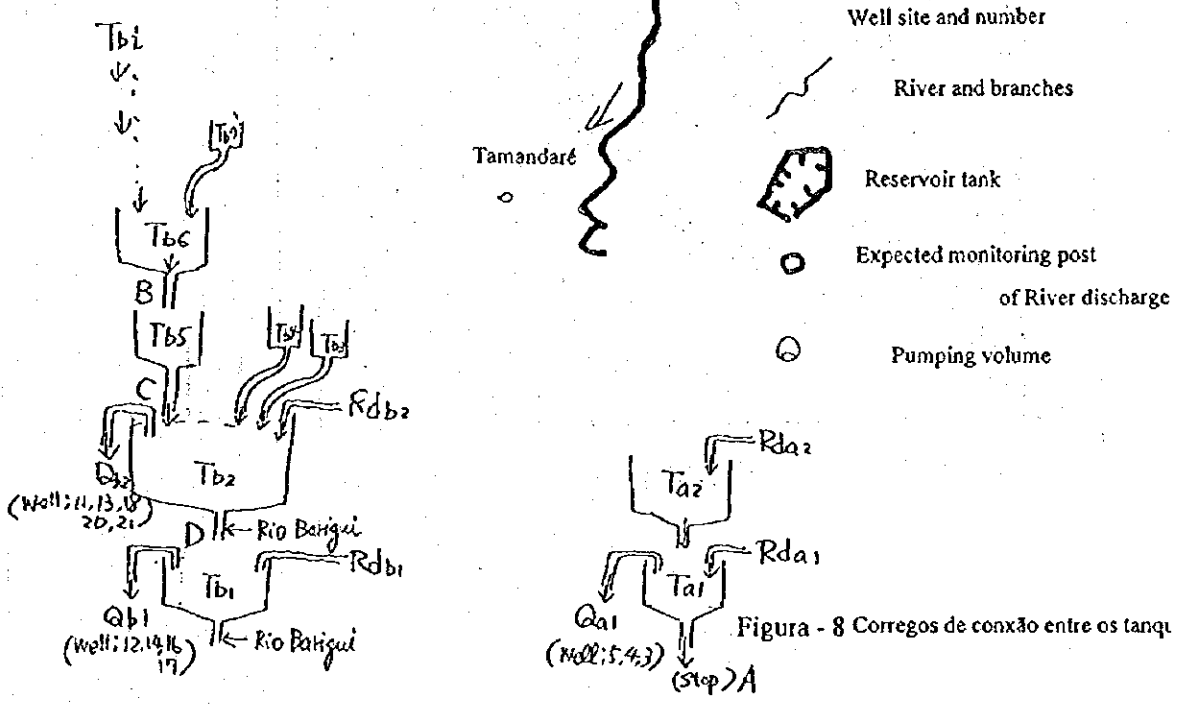


Figura - 8 Corregos de conxão entre os tanqi

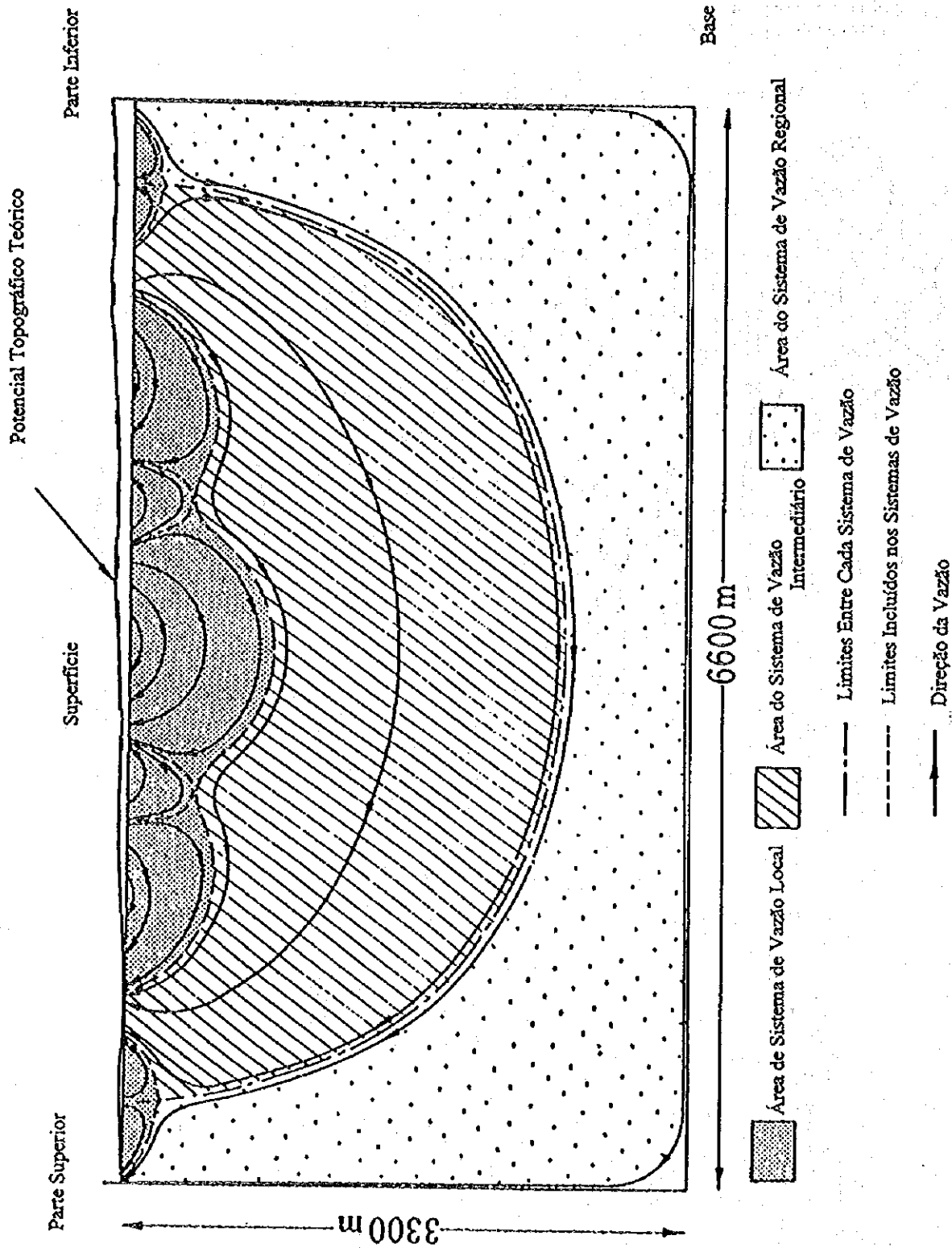


Figura - 9 - Sistema de Vazão Teórico Dentro de um Perfil Simples de Bacia de Água Subterrânea (Toth:1956)

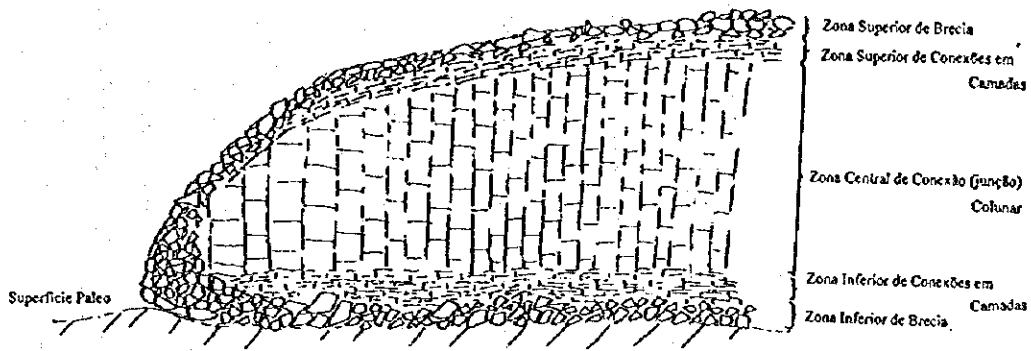


Figura - 10 Ocorrência Típica de Lava Basáltico na Formação de Serra Geral

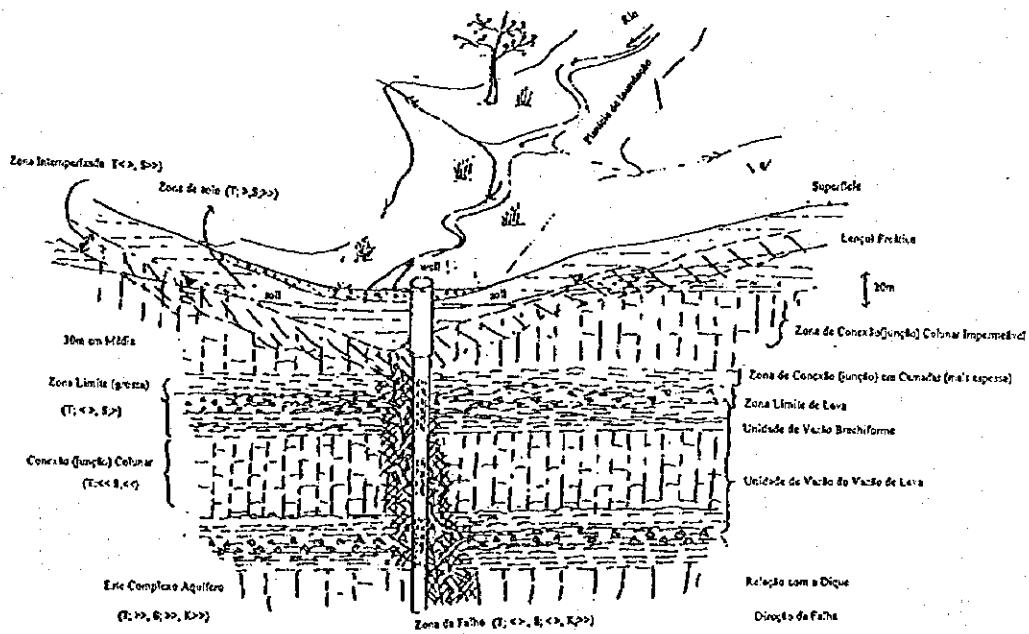


Figura - 11 Formação Serra Geral (no Sítio de Escavação)

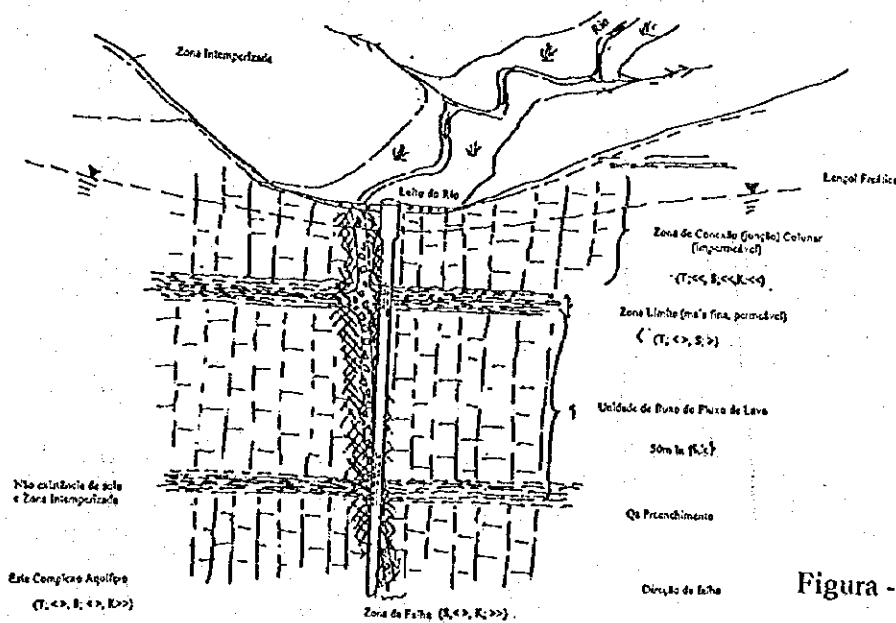
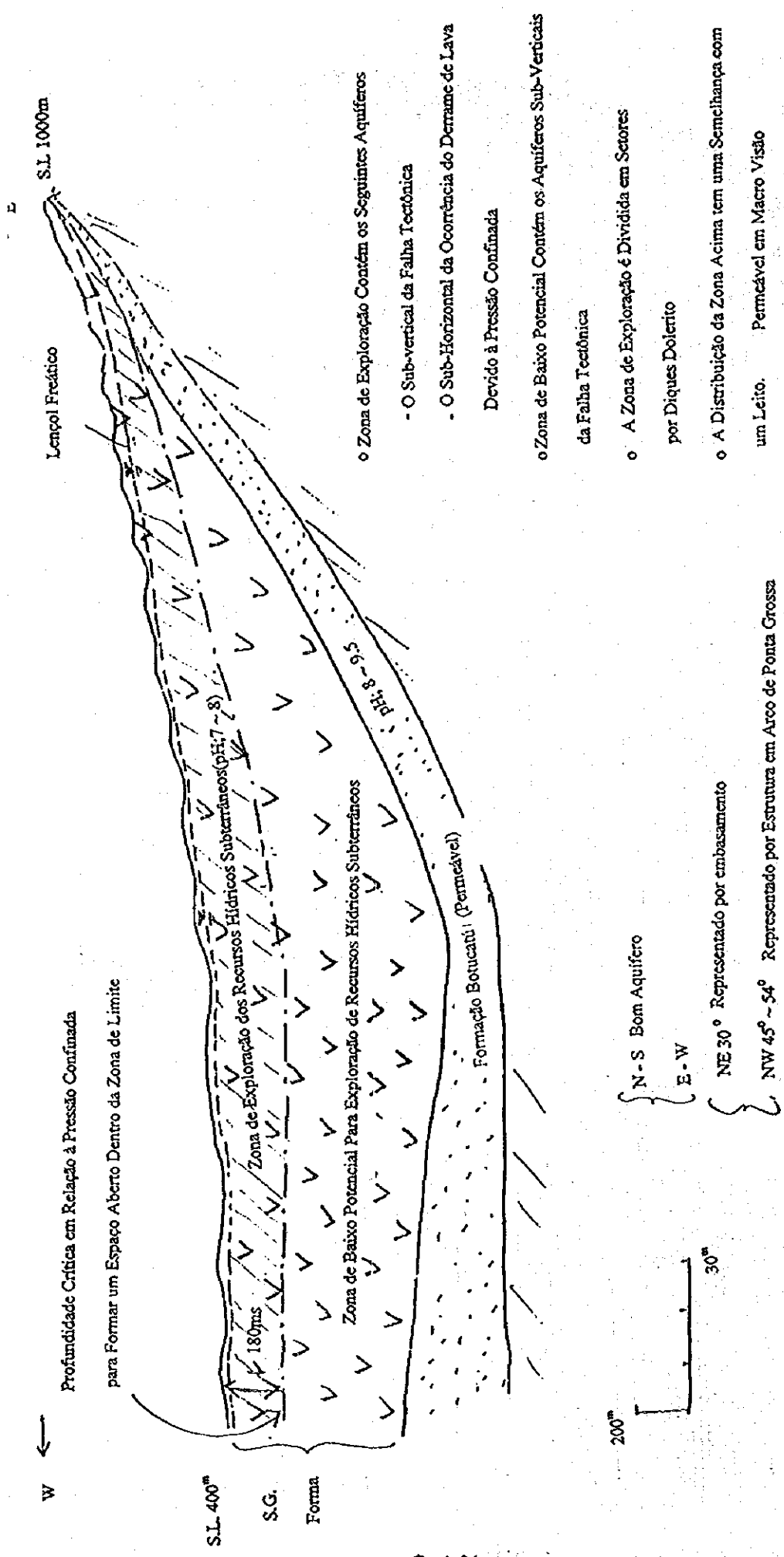


Figura - 12 Formação Serra geral. (SULU)



- o Zona de Exploração Contém os Seguintes Aquiferos
 - O Sub-vertical da Falha Tectônica
 - O Sub-Horizontal da Ocorrência do Derrame de Lava Devido à Pressão Confinada
- o Zona de Baixo Potencial Contém os Aquiferos Sub-Verticais da Falha Tectônica
- o A Zona de Exploração é Dividida em Setores por Diques Dolerito
- o A Distribuição da Zona Acima tem uma Semelhança com um Leito. Permeável em Macro Visão
- o Na Macro Visão as Áreas Norte e Sul Parecem Similares na Estratificação do Aquifero e Falha Tectônica
- Exceto o Solo e Zona Intemperizada
- o Hidrogeológico

Figura - 13 Concepção Regional Modelo HG da Formação Serra Geral (Norte) (Sul)

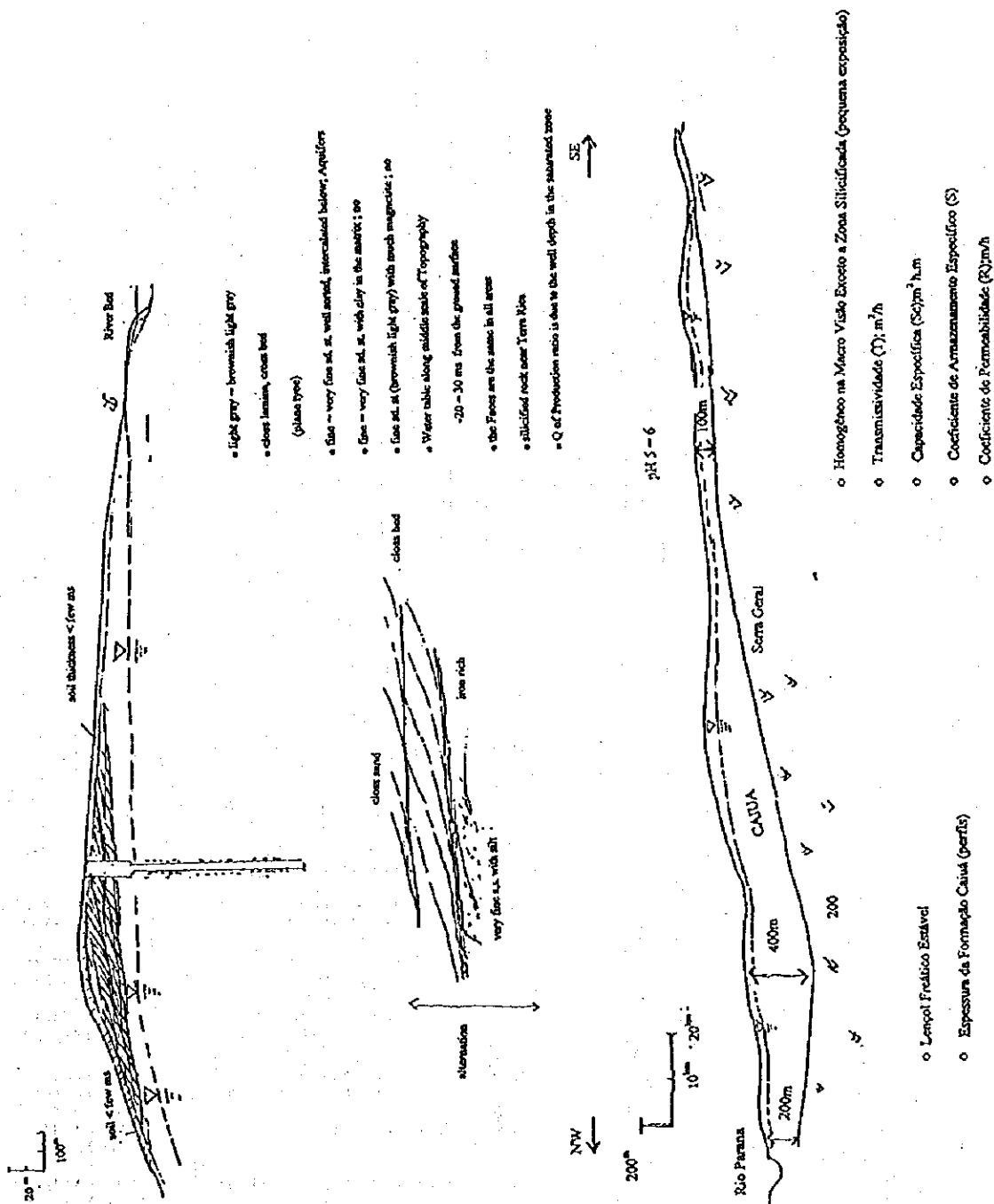
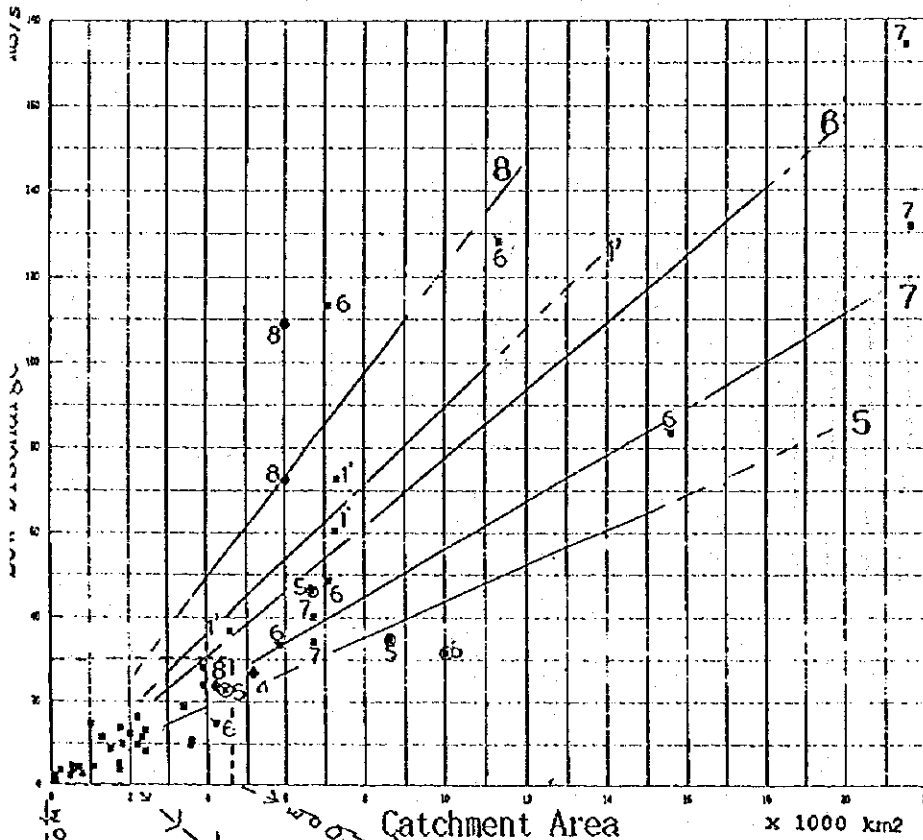
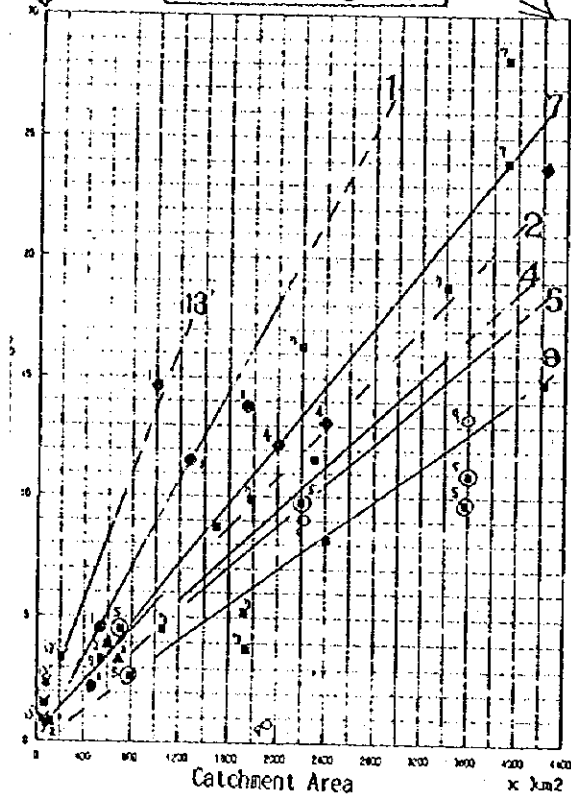


Figura - 14 Modelo Conceitual Regional da Formação Caiuá

Low Discharge - Catchment Area



Low Discharge - Area



No	Aquifer	Low Discharge
1: ●	the Karst in Acungui & Setuva G.	785 m ³ /d/km ² 9.09 l/s/km ²
2: ▲	the Granitics in Pre-Ordovician	550 m ³ /d/km ² 6.37 l/s/km ²
4: ◆	Mid-Late Paleozoic Itarete/Guata G.	405 m ³ /d/km ² 4.69 l/s/km ²
5: ⊙	Late Paleozoic Passa dois G.	403 m ³ /d/km ² 4.66 l/s/km ²
6: ■	Northern part of Botucatu & Serra Geral F.	672 m ³ /d/km ² 7.78 l/s/km ²
7: ◆	Southern part of Botucatu & Serra Geral F.	480 m ³ /d/km ² 5.56 l/s/km ²
8: ◆	Caiua Formation	1056 m ³ /d/km ² 12.22 l/s/km ²
9: ○	(Metropolitan Curitiba Area :)	305 m ³ /d/km ² 3.53 l/s/km ²
13: ■	the Crystalline rocks in the Coastal Range	1166 m ³ /d/km ² 13.5 l/s/km ²
14: ●	(RIBEIRA BASIN : the Karst and Granitics)	778 m ³ /d/km ² 9 l/s/km ²

Figura - 15 Relação Entre a Baixa Vazão e Área de Captação

JICA