

Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná

Celso Dal Ré Carneiro

Departamento de Geociências Aplicadas ao Ensino
Instituto de Geociências – Unicamp
cedrec@ige.unicamp.br

RESUMO

O presente roteiro consiste em uma breve viagem de reconhecimento a alguns locais de exposição de rochas dos arredores da cidade de Botucatu, Estado de São Paulo, nas quais se expõe o Aquífero Guarani, um imenso manancial de água doce cujos limites ultrapassam as fronteiras brasileiras. Embora seja virtual, para ser feita pela Internet, a viagem pode ser realizada no campo, com as indicações fornecidas. Buscou-se oferecer conhecimentos e sugerir cuidados ambientais que devem ser tomados para preservar um aquífero. Em Botucatu afloram camadas de rochas sedimentares da Bacia do Paraná formadas durante uma época em que o território nacional esteve recoberto por vasto deserto climático interior cujas dimensões devem ter sido maiores que as do atual deserto do Sahara. A água do Aquífero Guarani é utilizada no abastecimento público de centenas de cidades de médio e grande portes, por meio de poços de profundidade variada. A qualidade dos recursos corre o risco de ser prejudicada sobretudo por atividades inadequadas nos setores agrícola, industrial e de disposição de resíduos. Destacam-se características singulares do reservatório: (i) as condições formadoras das rochas decorrem de uma peculiar história geológica; (ii) as reservas são confinadas, fator que aumenta a fragilidade do sistema à poluição; (iii) ainda que sejam muito grandes, as reservas são finitas. O roteiro compreende três séries de pontos, cada qual envolvendo três paradas, que exibem aspectos notáveis da história geológica e da fragilidade desse sistema natural

ABSTRACT

This virtual trip comprises a short list of noticeable places around the city of Botucatu, State of São Paulo, where the exposed rocks compose the Guarani Aquifer. The Aquifer is an immense fresh water source whose limits exceed the Brazilian borders. The water of the Guarani Aquifer is mostly used for public supply of hundreds of medium- to large cities. The quality of the resource is at risk by inadequate human activities, of agriculture, industrial activity and unappropriate disposal of domestic and industrial waste. The trip helps understanding what is an aquifer and the environmental issues related to quality preservation of underground water sources. In the area the sedimentary layers of the Parana basin exposed in the surface have been formed during a time when the territory was covered by a vast interior climatic desert whose dimensions have been probably bigger than the present-day Sahara desert. To preserve the present-day conditions of the reservoir it seems to be useful to enhance three basic aspects: (i) the unique geologic conditions under which the rocks have originated; (II) the confinement of the reserves, an increasing fragility factor of the system to pollution; (III) the finitude of the reserves, in spite of the fact the reserves are very large. The virtual trip comprises three routes, each one involving three stops. All of them try to stress out a few essential aspects to give an idea of the singular geologic history and fragility of the natural system.

* Este documento deve ser referido como segue:

Carneiro C.D.R. 2007.
Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. *Terra Didática*, 3(1):50-73.
<<http://www.ige.unicamp.br/terraeducativa/>>

“A um quilômetro dali havia um morro com grande desbarrancado – a ‘barreira’, como se dizia no sítio. O Visconde levou-os para lá. Diante da barreira, parou e sorriu. Os meninos entreolharam-se. Não compreendiam que o Visconde encontrasse matéria para sorriso num barranco feio como todos os mais.

– Que gosto é esse Visconde? – perguntou Emília.

– Ah, o sorriso que tenho nos lábios é um sorriso geológico – o sorriso de quem sabe, olha, vê e compreende. Este barranco é para mim um livro aberto, uma página da história da terra na qual leio mil coisas interessantíssimas.

Os meninos olharam para o barranco e de novo se entreolharam com ar de quem pergunta: estará o Visconde a caçar conosco?

– Que engraçado! – exclamou Pedrinho. Agora compreendo o riso do Visconde depois que deu para estudar Geologia. Como tudo se esclarece! Como fica interessante! Aquele barranco e este corte nunca me fizeram vir à cabeça a menor idéia. Agora já me falam coisas, contam pedaços da vida da terra. Que engraçado!....

– Pois é isso, Pedrinho. Para o geólogo, o chão, o barranco, as ravinas, as margens dos rios, os cortes das estradas, tudo são páginas do livro da natureza, onde ele lê mil coisas que jamais passaram pela cabeça dos ignorantes.

– Que gostoso é saber, hein, Narizinho?

– Nem fale, Pedrinho. Cada vez tenho mais dó dos analfabetos.”

Monteiro Lobato. 1937. O poço do Visconde. São Paulo, Círculo do Livro. 199p. (Reedição)

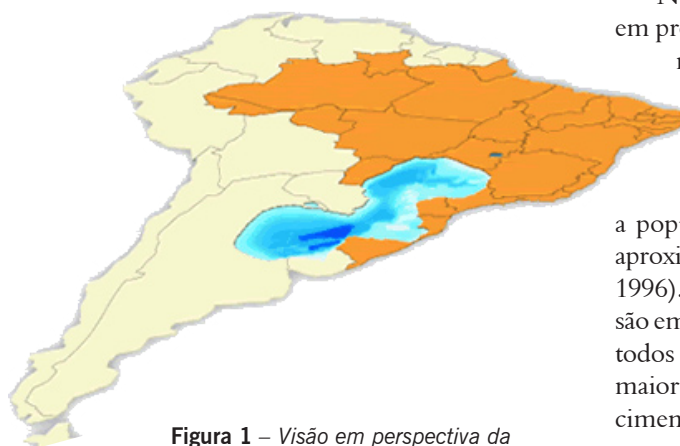


Figura 1 – Visão em perspectiva da área de ocorrência do Aquífero Guarani. Fonte: <<http://www.uniagua.org.br/website/default.asp?tp=3&pag=aquifero.htm>> (acesso em 22.2.2007)

1. O sistema Aquífero Guarani

Um sistema aquífero de grandes proporções abrange amplo domínio da América do Sul. Araújo, França e Potter propuseram em 1995 denominá-lo Mercosul, para dar significado à provável distribuição transfronteiriça do aquífero entre quatro países vizinhos (Fig. 1). Utiliza-se atualmente o nome *Sistema Aquífero Guarani*, proposto pelo geólogo uruguaio Danilo Anton em 1996, que propôs fazer referência ao povo indígena habitante da região (Rocha 1997). O reservatório de águas subterrâneas se distribui por expressiva área, da ordem de 1,2 milhões de km², representada por partes dos territórios do Brasil (71 %), Argentina (19 %) e, em menor proporção, Paraguai (6 %) e Uruguai (4 %). O aquífero se estende sob oito estados brasileiros: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

O aquífero fôra considerado, com certo exagero, um megareservatório de água subterrânea doce e potável, cujas “reservas estratégicas poderiam abastecer a população brasileira por cerca de 2.500 anos” (Machado 2006). A impactante divulgação feita pela imprensa sobre a existência do vasto aquífero colocou em debate o papel da água subterrânea no abastecimento futuro desses países, e permitiu atrair o interesse das pessoas em geral pelo tema. Pesquisas com maior rigor científico estão sendo conduzidas para avaliar a natureza e distribuição dessas águas, o que permitirá avaliar sua real importância para o futuro desses países e, em paralelo, detectar suas vulnerabilidades.

Na maior parte da bacia, as camadas se situam em profundidades variáveis. As áreas em que afloram à superfície são relativamente contínuas, situando-se tanto na borda leste, como na borda oeste. O volume de água aproveitável do manancial atinge 40 km³/ano, 30 vezes superior à demanda por água de toda a população existente na área de ocorrência, de aproximadamente 15 milhões de habitantes (Rocha 1996). Os recursos hídricos do Aquífero Guarani são em geral de excelente qualidade, utilizáveis para todos os fins em quase toda a área. Atualmente, a maior parte da água extraída é utilizada no abastecimento público de centenas de cidades de médio e grande portes, por meio de poços de profundidade variada.

O presente *Roteiro de Viagem Virtual ao Aquífero Guarani* serve para ilustrar de que modo barrancos e cortes das estradas nos contam pedaços da história

da Terra como, inspiradamente, afirma o personagem Pedrinho, na citação do ilustre escritor Monteiro Lobato. Veremos que os pontos visitados são particularmente especiais; situam-se em Botucatu (SP), na borda leste da Bacia do Paraná.

O roteiro constitui versão ampliada e detalhada de caderneta de campo distribuída pela Prefeitura Municipal de Botucatu (Carneiro 2006) aos participantes da *Jornada Estadual Aquífero Guarani*, em 16-18 de agosto de 2006 (Fig. 2). A reunião teve como objetivos principais:

- Ampliar a informação sobre a importância do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo;
- Apresentar os resultados parciais do Projeto de Proteção e Desenvolvimento Sustentável do Aquífero Guarani, em execução;
- Discutir propostas de ampliação da participação dos Comitês de Bacia na gestão do Aquífero.

Junto com o *Roteiro de viagem de campo*, foi também reimpressa na caderneta de campo uma contribuição fundamental sobre a geologia das unidades estratigráficas que afloram em Botucatu. Trata-se de um dos textos clássicos elaborados por Almeida nos anos 1950 e publicado em 1954 (Almeida F.F.M.de. 1954. *Botucatu, um deserto triássico da América do Sul*. Div. Geol. Miner./Depto. Nac. Prod. Miner. Notas Prel. Estud. n. 86, 21p.), no qual o autor revela evidências de que a região se situava no interior de extenso deserto climático intracontinental.

A maior parte dos 338 participantes do Seminário sobre o Aquífero Guarani atua em gestão das reservas e no controle ambiental de diferentes áreas de domínio do aquífero. As atividades de campo, realizadas na parte da manhã do dia 17 de agosto, envolveram um grupo de monitores composto por geólogos, professores e estudantes do curso de Geologia da Unicamp, além de sete ônibus mais veículos de apoio, mobilizados pela Prefeitura Municipal de Botucatu para transporte de grupos de até 40 pessoas cada. Os deslocamentos, simultâneos, foram feitos de tal forma que em um mesmo ponto não mais que dois grupos estivessem reunidos; isso favoreceu a observação direta dos pontos visitados.



Figura 2 – Capa da caderneta de campo distribuída na Jornada Estadual Aquífero Guarani, agosto de 2006

Os resultados da visita podem ser considerados muito bons, porque possibilitaram a difusão ordenada de conhecimentos sobre uma reserva subterrânea de magnitude continental. Muitos participantes puderam dispor de conhecimento técnico especializado, avaliar a importância geológico-ambiental do aquífero e compreender o significado da expressão “aquífero confinado”. Os debates subsequentes na Jornada estadual foram positivamente influenciados pelas observações efetuadas durante a breve viagem de campo. Em função desses ótimos resultados e do interesse mais amplo despertado pelo Aquífero Guarani, decidimos publicar o roteiro da visita, na forma de uma viagem virtual.

Um exemplo similar a este, na mesma Bacia do Paraná, é o magnífico roteiro virtual da Coluna White, acessível na web, na Serra do Rio do Rastro, que faz um corte de referência das unidades gondwânicas no Sul do Brasil (Orlandi Filho et al. 2002). Essa seção inclui, na parte superior, os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, que são os principais integrantes do Aquífero Guarani no Brasil.

Preâmbulo

Antes de iniciar nossa viagem de reconhecimento ao Aquífero Guarani vamos exercitar um pouco de..., talvez não um seja um pouco, mas *bastante... imaginação*. O tamanho de nossa imaginação terá de ser também grande, muito grande, porque pensaremos segundo uma escala verdadeiramente... geológica.

No box anexo (viagem imaginária ao passado), veremos um cenário similar ao da fascinante história geológica da Bacia do Paraná, que inclui importantes eventos geológicos e biológicos.

Viagem imaginária ao passado

Imagine uma situação muito inusitada. Imagine que uma civilização extragaláctica avançada tenha colocado uma câmera filmadora no meio de uma região que está sofrendo, lentamente, um processo de desertificação. A superfície plana do terreno é atravessada por rios que terminam, muitas vezes, em grandes lagos. Esse local será o ponto de partida de nossa longa viagem através do tempo. Aos poucos, a escassez de água e o sol inclemente transformam a região em um deserto, parecido com o do Sahara. A câmera filmadora acaba ficando em meio a um deserto antigo, na verdade muito maior ainda do que o atual Sahara. Estamos no meio de um campo de dunas gigantes. A câmera filmadora fez imagens dos rios e lagos e, depois, das dunas que os sucederam. Ficou registrado tudo o que aconteceu ali de importante durante muitos séculos... Séculos tão numerosos que a câmera somente foi resgatada pelos humanos muitos milhões de anos depois. Depois de muitas tentativas e muita pesquisa, os especialistas conseguiram transformar em cenas inteligíveis tudo aquilo que a câmera registrou.

Imagine que se tenha produzido um vídeo, contendo as sucessivas imagens.

Assistiremos, pois, a um filme fantástico, como aqueles de ficção. Trata-se de um filme de ficção “natural”, porém nada irreal. Como o registro durou mais de 200 milhões de anos, teremos muito tempo para observar o que aconteceu no local.

Na primeira parte do filme podemos ver rios caudalosos que percorrem vastas áreas planas, em movimentos sinuosos, deixando atrás de si, e ao lado, enormes campos de areia. As colinas são recobertas por vegetação rasteira, que pode ser arbustiva em alguns locais. Em inúmeros pontos os rios atingem lagos, de tamanhos variados, onde se depositam sedimentos mais finos, porque as águas perdem velocidade. Séculos a fio se passam... e nada de diferente acontece,



Figura 3 – Campos de dunas em desertos atuais, semelhantes aos do filme de ficção natural. Fonte Assine et al. (2004)

apenas o movimento das águas dos rios e os sedimentos que se acumulam. Não, alguma coisa a mais vem acontecendo...

Chove cada vez menos e parece que a região está se tornando cada vez mais seca. De fato, com o passar dos séculos, os rios perdem vitalidade e a região vai se tornando progressivamente desértica. Desertos são regiões que recebem baixíssima precipitação – menos de 250 mm de água por ano.

Mais adiante, decorridos alguns milhões de anos, nosso filme mostra que os rios deixaram de ser perenes, até desaparecer por completo. Passamos a ver apenas movimentos incessantes de dunas de um lado para o outro. Uma paisagem monótona (Fig. 3), com dinossauros e



outros animais primitivos passeando aqui e ali (Fig. 4). O Sol fortíssimo, inclemente durante os dias, somado às baixas temperaturas à noite, e a falta de água impediam que a vegetação crescesse e se desenvolvesse. Alguns oásis aparecem ocasionalmente, atraindo outros animais. Alguns deles deixam impressas suas pegadas sobre as areias finas do deserto. Na maior parte das vezes, os movimentos da areia de um lado para outro apagaram as pistas, mas em alguns lugares elas foram soterradas com delizadeza suficiente para evitar sua destruição.

Séculos a fio se passam... e, outra vez, nada de diferente acontece. A região é baixa e plana, permitindo o livre trânsito das dunas, no interior de um megacontinente muito maior do que os atuais. As areias transportadas pelos ventos formaram dunas sobrepostas, chegando a acumular camadas espessas de areias, que podem atingir 200 m ou mais. Podemos visualizar os imensos campos de dunas e perceber que, com as variações de direção dos ventos, a sua forma externa também mudou muitas vezes. As camadas de areia que sustentam as dunas apresentam-se bem estratificadas (Fig. 5).

A região começa a ser sacudida por tremores de terra. Embora não seja ainda possível perceber esse fato, os tremores marcam o início de movimentos que romperão todo esse megacontinente em pedaços menores (Fig. 6). No início, os tremores são poucos e de baixa intensidade, mas, lentamente, com o passar de mais alguns séculos, tornam-se cada vez mais fortes. Na superfície do



Figura 4 – Há mais de 100 milhões de anos atrás, os Saurópodes, como por exemplo o *Diplodocus*, caminhavam sobre quatro ou até mesmo duas patas. Fonte: <<http://www.earth.rochester.edu/ees201/labs/dinosaurs.pdf>>, acesso em 28.06.2006

deserto, começam a aparecer fraturas compridas, revelando que algo de muito estranho vem acontecendo nas profundezas da Terra.

De repente, através das numerosas fraturas, aparece uma lava quente, escura, quase preta, que percorre com facilidade a superfície e começa a preencher todas as partes baixas do terreno. O volume de lava expelido pelas fraturas vai aumentando, e se movimenta com extrema fluidez tal como se pode observar hoje nos vulcões do Hawaii. Os volumes de lava, entretanto, não podem ser comparados com os do Hawaii, pois são muito maiores: seria como comparar a saída de água da mangueira de carro de bombeiros com aquela expelida por uma torneira de jardim.

Cessados os primeiros fluxos de lava, as dunas continuam a se movimentar, provenientes das áreas mais distantes e que ainda não haviam

sido atingidas. Formam-se assim novas dunas sobre as primeiras camadas de lavas, e novas emissões continuam a surgir, lentamente recobrimdo os novos campos de dunas. Ao longo de mais alguns séculos, toda a paisagem vai se enchendo de lava escura, que recobre as dunas mais baixas, deixando-as imobilizadas.

A lava consolidada forma uma rocha escura, fina, repleta de pequenos cristais e algum vidro, pois não houve tempo de o material fundido cristalizar-se adequadamente.

Um cenário monótono, embora terrível e infernal: dunas vão sendo literalmente enterradas por lavas que se solidificam (Fig. 7). Se as criaturas então viventes já tinham de se adaptar às condições de seca rigorosa do deserto, a presença de imensos lençóis de lava espalhando-se pela superfície devia ser absolutamente mortífera.

Passam-se os séculos, com suas primaveras,

verões, outonos e invernos silenciosos. Mais lava é emitida a partir das fraturas, enormes terremotos sacodem a área, animais que conseguem fugir correm para locais distantes, mas muitos são mortos e seus cadáveres são destruídos. Para alguns estudiosos, essas condições perduraram por dois milhões de anos, enquanto outros admitem que esse inferno tenha durado cerca de 10 milhões de anos ou mais, até cessar.

As areias dos antigos desertos foram enterradas para sempre sob as lavas à medida que a crosta da Terra cedeu e afundou sob o peso das lavas e das próprias camadas de areia. Essa situação particular formou sucessão parecida com um bolo de camadas, em que as camadas mais antigas repousam sob as mais novas.

Se os primeiros momentos desse filme parecem incríveis, prepare-se agora para a segunda parte. Quando acabam as lavas, o vento incessante continua a mover areias de um lado



Figura 5 – Estratificação formada por sucessivas camadas de areia em campo de dunas em um deserto, dispostas sob camadas formadas com orientação diferente. Fonte: American Geological Institute (2006). Créditos: imgssb © Larry Fellows; Fonte da imagem: Earth Science World Image Bank, <<http://www.earthscienceworld.org/images>>, obtida em 28.06.2006

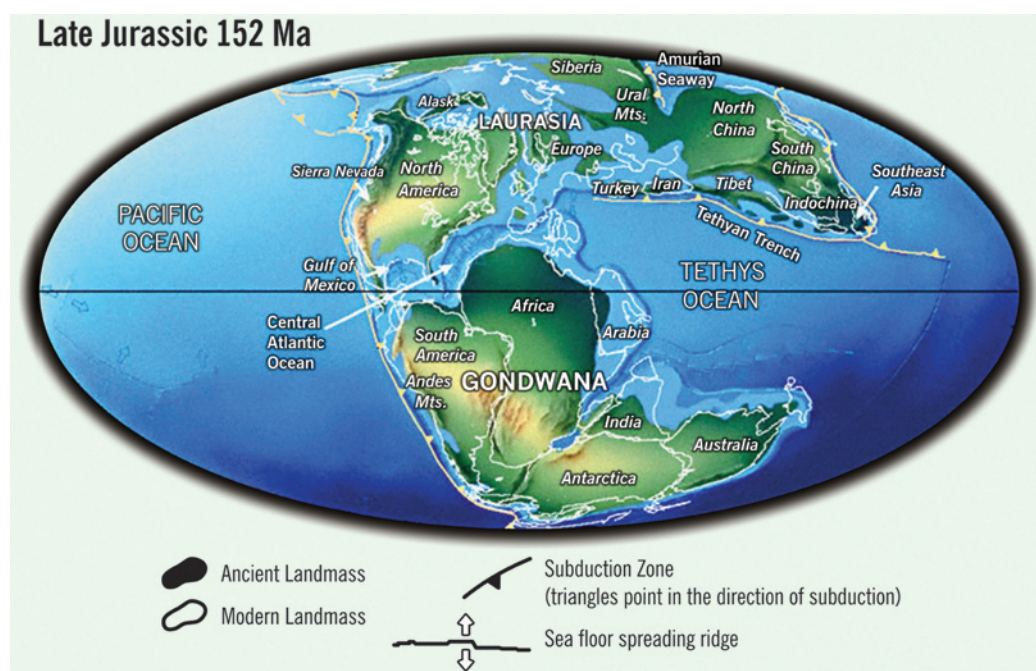


Figura 6 – Reconstrução dos continentes no final do Jurássico Superior e o extenso paleodeserto Botucatu, com seu equivalente do hemisfério norte. A fragmentação dos continentes do hemisfério sul permitiria o distanciamento entre América do Sul e África e a gradual formação do Oceano Atlântico Sul. Fonte: <<http://www.scotese.com/late1.htm>>, acesso em 3.12.2007

para outro. Entretanto, algumas condições gerais mudaram por completo. Do espaço, pode-se observar a paisagem e nota-se que o supercontinente no qual ficava nosso deserto rompeu-se em grandes pedaços, formadores

de novos continentes. As imensas fendas que surgiram, e pelas quais passaram rochas fundidas na forma de magma, são também os primeiros indícios de que a crosta terrestre estava começando a rachar-se. Esse acontecimento não foi um fenômeno isolado, desligado de qualquer outro fato, mas faz parte de um conjunto grandioso de fenômenos que acompanham o nascimento de um grande oceano.

Bem, se sua cota de imaginação já parece ter se esgotado, acalme-se: temos muitas evidências de que tudo isso realmente aconteceu no passado remoto da Terra. Os geólogos são, mesmo, muito imaginativos, mas é preciso dizer que não basta imaginar, é preciso obter pistas que nos indiquem como comprovar as idéias e modelos que nossa criatividade possa construir. As provas desses acontecimentos estão aqui mesmo, abaixo de nossos pés... e também do outro lado do oceano, na região entre Angola, Namíbia e África do Sul.

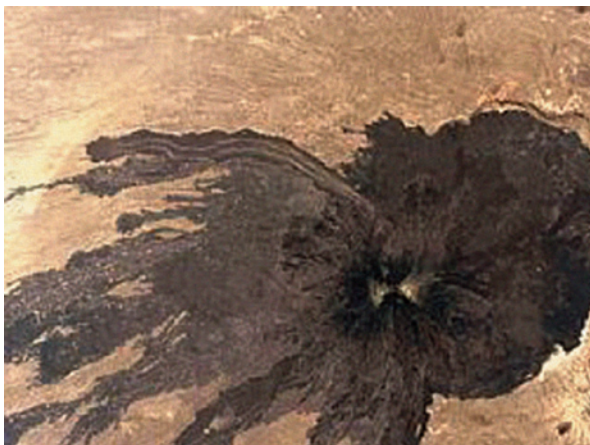


Figura 7 – Imagem de lavas vulcânicas pretas que o Vulcão Toussidé vem espalhando sobre o assoalho de um deserto do Chad, África. Fonte: NASA Space Shuttle image STS111-367-29, 2002 (<<http://eol.jsc.nasa.gov/>>, acesso em 28.06.2006)

2. Lavas derramadas sobre desertos

As camadas sedimentares depositadas no antigo megadeserto de Botucatu fizeram parte de um longo intervalo de estabilidade do supercontinente Gondwana (Zalán 2004). As condições estáveis foram interrompidas, na parte centro-sul da América do Sul, há aproximadamente 133 Ma, quando as areias passaram a ser recobertas por sucessivos fluxos de lava. A maioria dos autores admite que o vulcanismo Serra Geral tenha se estendido por cerca de 10 milhões de anos, muito embora datações de rochas obtidas por métodos radiométricos como o método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, indiquem diferentes intervalos de idade: valores de 133 ± 1 Ma segundo Renne et al. (1988), ou uma variação entre 137 e 128 Ma segundo Turner et al. (1994).

Em Botucatu a relação entre os arenitos e as lavas foi bem documentada por Almeida (1953a, 1953b, 1954). Durante milhões de anos, a movimentação incessante das dunas recobria os derrames e formava novas dunas. A dificuldade de separar os arenitos e basaltos levou pesquisadores brasileiros a propor uma denominação geral para o pacote, Grupo São Bento, formado por arenitos das Fms. Pirambóia e Botucatu e as lavas da Formação Serra Geral. Uma parte dos arenitos

formou camadas confinadas em armadilhas (*traps* em inglês) causadas pelas novas emissões de lavas, que lentamente recobriram os campos de dunas. São chamados arenitos intertrapeanos.

O supercontinente Gondwana, que abrigara o antigo deserto, rompeu-se dando origem aos continentes atuais. Quando começa a surgir o Oceano Atlântico, entre a América do Sul e a África (Figs. 6 e 8), formam-se imensos golfos, semelhantes ao atual Mar Vermelho, nos quais a água do mar penetra e é aprisionada, até que evapora por completo. Passados mais cerca de 2 milhões de anos, aumenta o afastamento dos continentes e as águas do oceano conseguem entrar e permanecer, de modo que nunca mais saíram da região (ver Carneiro & Almeida 1996). A região Nordeste do Brasil foi a última a se separar da África, quando o distanciamento entre América do Sul e África permitiu que os dois continentes se desligassem por completo, entre 104 e 90 Ma atrás. Aos poucos, no sul do Brasil, as condições desérticas foram se tornando mais brandas, até que rios voltassem a circular na região. Os desertos acabaram desaparecendo.

As áreas antes ocupadas pelos desertos, atualmente separadas pelo Oceano Atlântico Sul, foram sendo progressivamente transformadas em paisagem de campos e florestas, atravessados por rios

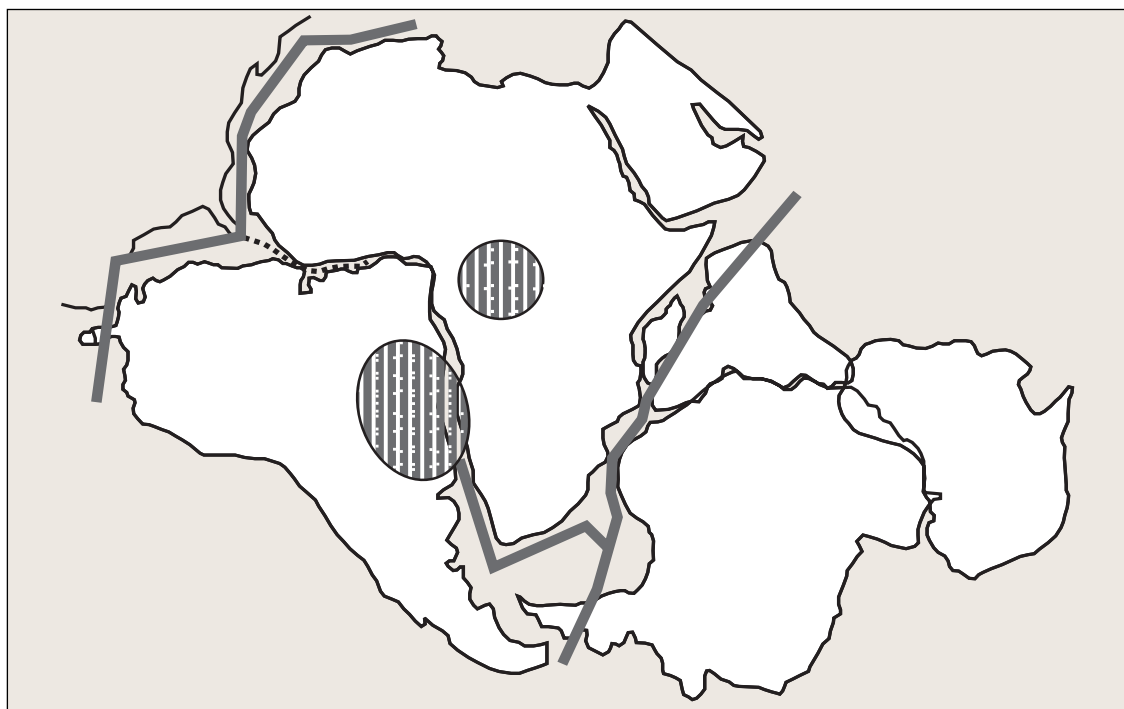


Figura 8 – O supercontinente Gondwana, há aproximadamente 170 Ma, formado pelos continentes atuais reunidos. As elipses marcam locais onde surgiram grandes erupções de lava basáltica, há 137-128 Ma, na América do Sul e na África

importantes, como o Tietê, o Grande, o Parana-panema, o Iguçu e o próprio Rio Paraná, além de tantos outros. A circulação de água em superfície e as chuvas, quando as condições ambientais permitiram a presença de água abundante, possibilitou a lenta infiltração de água no subsolo.

Talvez seja oportuno explicar em que consiste a penetração da água subterrânea no subsolo, um fenômeno bem conhecido, cujo principal efeito é a acumulação de água nas profundezas da Terra, embebendo os bolos de camadas de sedimentos soterrados. Tal como se faz rotineiramente em uma investigação científica, no decorrer da viagem de reconhecimento ao Aquífero Guarani, trabalharemos com essas pistas, evidências e provas, para conhecer como se formou e como funciona o Aquífero Guarani na parte paulista da Bacia do Paraná.

Para fazer isso, porém, precisamos saber um pouco mais sobre como a água pode ser armazenada em espaços vazios dentro das rochas, denominados poros; veremos como se dividem os tamanhos das partículas que formam sedimentos como os encontrados na área ocupada pelo Aquífero Guarani, e de que modo esses espaços armazenam e transmitem água no interior da Terra. Depois, trataremos dos pontos de nossa viagem virtual.

3. Como se sabe que uma areia pertenceu a um deserto?

Em ambiente desértico, grãos de areia podem ser formados por diversos minerais, dos quais os mais comuns são feldspato e quartzo. O termo *areia* refere-se a uma classe de *sedimento*, nome atribuído a todo material sólido transportado por algum agente, e posteriormente depositado em um dado local. Os agentes transportadores podem ser a água, o vento, o gelo ou a queda de partículas em encostas,

provocada pela ação da gravidade. Alguns nomes técnicos são utilizados para designar os tamanhos das partículas detríticas envolvidas. Partículas cujo diâmetro varia entre 0,062 mm (ou 62 micra) e 2 mm são referidas como areia. Partículas de tamanhos menores do que esses são denominadas silte e argila (Tab. 1).

O transporte de sedimentos pode gerar grãos cujas formas são bem arredondadas porque o impacto entre as partículas elimina progressivamente as arestas e cantos vivos; os materiais tendem ainda a se tornar esféricos. A distância do transporte afeta a forma das partículas, porque, normalmente, quanto maior a distância, maiores são os graus de arredondamento e esfericidade. Uma diferença fundamental entre o transporte por água e o transporte eólico é que no ar, sem a presença de um invólucro protetor como a água, a superfície dos grãos torna-se fosca devido aos inúmeros impactos de um grão contra o outro. É notável que, notadamente no caso de quartzo, grãos de areia de desertos atuais e antigos apresentem superfície fosca, dando origem a um aspecto opaco. Areias finas a médias transportadas por vento normalmente são arredondadas, enquanto areias de ambientes glacial e fluvial são angulosas.

Há, igualmente, nomes padronizados para rochas com tamanhos definidos de grãos. Arenitos são rochas formadas principalmente por grãos de areia, enquanto siltitos são rochas compostas somente de silte. Argilito, lamito e folhelho são nomes adotados para rochas formadas por argila. No caso de sedimentos de granulação maior utilizam-se vários termos (como matacão, bloco, seixo e grânulo), mas em geral as rochas correspondentes são designadas conglomerados.

Um deserto é uma região da Terra onde não há chuvas, ou se elas existirem, serão muito poucas e escassas. Então, como se explica que o Aquífero

Tabela 1 – Alguns tamanhos padronizados de granulação de sedimentos (modificado de Almeida e Carneiro 1998)

Nome da partícula	Diâmetro mínimo (mm)	Diâmetro máximo (mm)	Nome da rocha correspondente
Grânulo, cascalho ou seixo	2	64	Arenito grosso ou Conglomerado
Areia	0,062 ou 62micra	2	Arenito
Silte	0,004 ou 4 micra	0,062 ou 62 micra	Siltito
Argila	—	< 0,004 ou < 4 micra	Argilito, lamito ou folhelho

Obs: O micron (μ) é a unidade de medida que corresponde à milésima parte de um milímetro. Micra é o plural de micron

Guarani esteja implantado exatamente em uma área que no passado foi totalmente árida? Para compreender melhor este ponto, é preciso dispor de alguns conhecimentos sobre circulação da água no planeta.

4. Areias de desertos como reservatórios de água doce

A circulação da água na Terra, conhecida como ciclo hidrológico ou ciclo das águas, caracteriza-se pelo contínuo movimento dessa substância nos três estados físicos, na atmosfera, nas massas de água e de gelo, na superfície e sub-superfície terrestre. A água se movimenta pela atmosfera depois de ter sido evaporada dos mais diferentes lugares, como os rios, lagos, oceanos, terrenos ou plantas. Ao condensar e cair na forma líquida, a água regressa ao oceano e aos continentes. Nos continentes a precipitação possui várias trajetórias, na forma de chuva em zonas quentes, ou neve nas regiões frias. O escoamento da água na superfície do terreno sulca a terra e forma canais de drenagem, que por sua vez formam ribeirões, rios e lagos. Os corpos de água podem chegar até o oceano, reiniciando o ciclo, ou voltam para a atmosfera graças à evaporação.

O ciclo das águas na superfície dos continentes se desenvolve em bacias hidrográficas, que são porções da superfície terrestre para onde toda a rede de canais de drenagem se dirige rumo a um canal principal, em geral o rio que lhes dá o nome, como por exemplo a Bacia Hidrográfica do Rio Paraná. Toda bacia hidrográfica é limitada por terrenos mais elevados, chamados divisores de água. No caso da bacia do Rio Paraná as elevações situadas nas regiões de Minas Gerais, Goiás e Mato Gros-



Figura 9 – Distribuição do Aquífero Guarani no Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Convenções: 1. Embasamento e unidades mais jovens, 2. Cadeia Andina, 3. Parte confinada do aquífero; 4. Parte aflorante, composta pela Formação Botucatu e unidades correlatas. A-B: perfil geológico da Fig. 12 (Modificado de Assine et al. 2004 e Machado 2006)

so, aproximadamente ao redor da latitude de 16° Sul (Fig. 9) representam limites de várias bacias hidrográficas, uma vez que possuem caimentos em diferentes direções.

Qualquer bacia hidrográfica é um sistema aberto que contém entradas e saídas de água. As entradas de água ocorrem principalmente pelo ingresso de águas de chuva, pelo fluxo de água subterrânea que entra na bacia e, eventualmente, pela importação artificial de água. As saídas acontecem por meio da descarga da água dos rios para fora da bacia, e pela evapotranspiração, que consiste na combinação, simultânea, de dois processos: a evaporação da água da superfície e a transpiração das plantas. O fenômeno de evapotranspiração pelas folhas é alimentado desde os primeiros horizontes de solo, onde se encontram as raízes das plantas. Também fazem parte da saída de água a retirada de água do subsolo em direção aos rios ou a algumas estruturas geológicas, após lenta circulação no aquífero, e o aproveitamento de água pelo homem.

A água subterrânea faz parte do ciclo da água, mas sua dinâmica embaixo da superfície da Terra é totalmente especial. A água penetra no solo por

um processo chamado infiltração. Ao infiltrar-se, as águas podem atravessar duas grandes zonas:

1. **Zona de aeração**, ou zona não-saturada: é a região caracterizada pela presença de poros preenchidos por ar e água. Estende-se desde a superfície do terreno, até a zona de saturação de água. O preenchimento dos poros pela água é gradativo, até que todos fiquem preenchidos. A superfície-limite faz parte do topo da zona saturada; possui formato irregular, sendo denominada superfície freática – ou, popularmente, lençol freático.
2. **Zona saturada** ou de saturação: é a região caracterizada pelo preenchimento de todos os poros vazios por água. Situa-se logo abaixo da superfície freática, até profundidades muitíssimo variáveis, limitadas pela existência de espaços dentro das rochas. Os movimentos das águas na zona saturada são muito mais lentos do que os das águas superficiais. Dependendo das diferenças de altura do nível de água, a água se movimenta lateralmente, uma vez que se desloca dos terrenos com altura mais elevada do nível de água para terrenos com níveis de água mais baixos.

A água não-infiltrada pode ser removida da superfície por evaporação, enquanto a água infiltrada atravessa a zona de aeração para atingir a zona saturada. Caso seja removida pelas raízes das plantas, ou subir por capilaridade, a água pode voltar para a atmosfera por evapotranspiração, circular pelo subsolo e sair em nascentes depois de percorrer distâncias longas ou curtas; pode também se infiltrar até chegar na zona saturada. Na zona saturada, a água pode se movimentar até chegar a outro tipo de área de descarga, que pode ser um rio ou lago, ou atingir o oceano outra vez, onde recomeçará todo o ciclo. As águas subterrâneas podem ser também utilizadas pelo homem, quando captadas por poços tubulares, os chamados poços profundos.

Um aspecto importante aqui é o papel da cobertura vegetal, que minimiza a evaporação direta e reduz a velocidade das águas em superfície, diminuindo sua capacidade erosiva. Além disso, a presença de umidade nos restos vegetais de superfície ajuda a promover infiltração, alimentando os reservatórios subterrâneos.

A água subterrânea é armazenada nas rochas de diferentes maneiras, dependendo do tipo de rocha existente. De que modo a rocha é ocupada

pela água? A água preenche os vazios da rocha, que podem ser de vários tipos, os vazios ficam entre:

- os grãos que compõem as rochas sedimentares – como, por exemplo, a areia encharcada de uma praia;
- as fraturas de uma rocha dura – como um granito comum;
- espaços em certos tipos de rochas calcárias – onde, sob determinadas condições particulares –, os canais de dissolução podem formar verdadeiros rios subterrâneos – tais como aqueles existentes em cavernas.

No caso do Aquífero Guarani sedimentos acumulados foram, com o tempo, transformados em rochas porosas. Enterradas, as areias de nosso antigo deserto formado pelos processos de sedimentação fluvial e eólica durante os períodos Triássico e Eocretáceo (entre 200 e 120 Ma atrás) constituem os reservatórios de água do Aquífero Guarani.

4.1 Armazenamento de água em rochas sedimentares

As rochas armazenadoras e transmissoras de água (que possibilitam os movimentos) são denominadas aquíferos. Os arenitos são típicas rochas aquíferas. A figura 10 mostra os tipos de aquíferos e as camadas impermeáveis que os confinam.

Os aquíferos variam segundo a capacidade de armazenar e de transmitir água (Pereira 2000):

1. Aquífero **livre**: quando seu limite superior é a superfície freática e seu movimento é controlado pela inclinação da superfície freática, sob condições de pressão atmosférica.
2. Aquífero **suspenso**: é um tipo especial de aquífero livre, definido como uma área de acumulação de água acima de uma camada impermeável de curta extensão, na zona não saturada.
3. Aquífero **confinado**: aparece quando a rocha aquífera é limitada por camadas confinantes e está sob uma pressão interna maior que a atmosférica.
4. Aquífero **costeiro**: é aquele que se situa na região litorânea e possui comunicação com a água do mar. A água doce flutua acima da água salgada em razão da diferença de densidade. As águas doce e salgada são separadas por uma

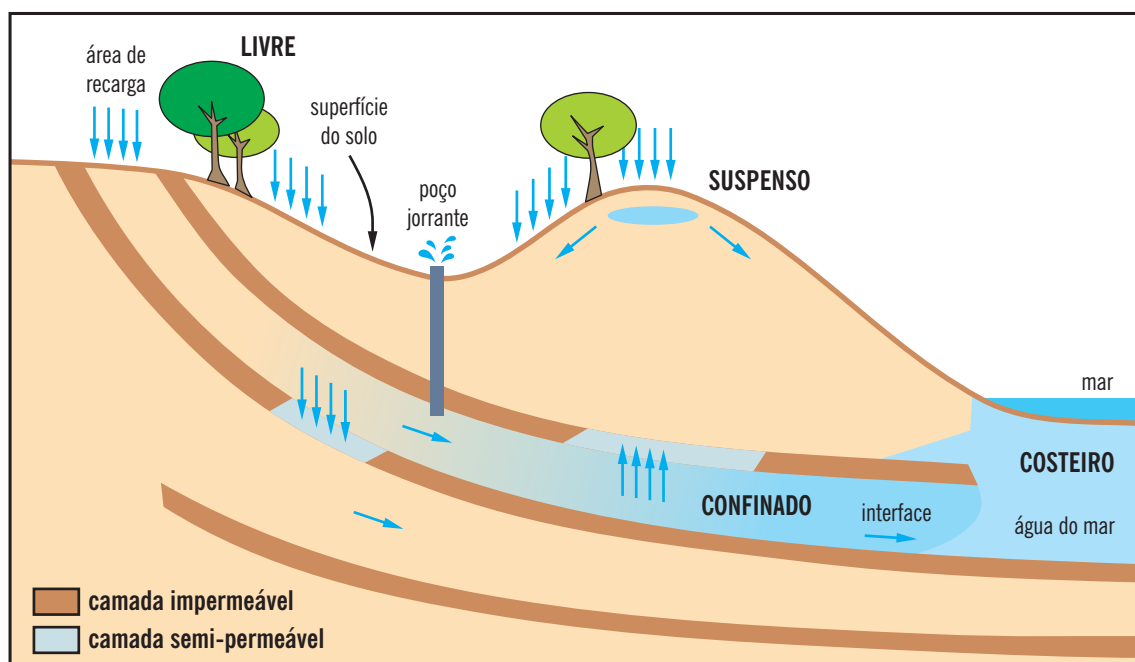


Figura 10 – Tipos de aquíferos: livre, suspenso, confinado e costeiro. Na maior parte das rochas indicadas no desenho há um aquífero livre onde, ao contrário do aquífero confinado, a água pode fluir livremente até chegar a uma área de descarga, onde o ciclo recomeça (Fonte: Pereira 2000)

zona difusa, denominada de interface salina ou cunha salina.

É importante lembrar que o Aquífero Guarani é limitado geograficamente à área onde foram depositadas as areias de nosso antigo deserto (Fig. 9). Essa é a principal característica do Aquífero Guarani: a disponibilidade de água em profundidades pequenas a grandes, dependendo do local considerado. O aquífero consiste de horizontes (também chamados níveis estratigráficos) de arenitos.

Atualmente, mais de 90% da área total de arenitos está recoberta por basaltos cretáceos pouco permeáveis, que propiciam alto grau de confinamento (aquífero confinado, Fig. 10). Esse fator reduz as taxas de infiltração e recarga, além de isolar o aquífero da zona de aeração e das perdas superficiais por evaporação e evapotranspiração (Wikipedia 2006). Na área de afloramento das formações Pirambóia e Botucatu, que em São Paulo se estende por aproximadamente 16.000 km², a taxa de precipitação é da ordem de 1.200 a 1.500 mm/ano. A *recarga* consiste na realimentação do aquífero, e ocorre sobretudo por infiltração direta de águas de chuva nas áreas de afloramento dos arenitos ou mais lentamente por meio de infiltração vertical ao longo de descontinuidades nas áreas onde os arenitos acham-se confinados e recobertos por basaltos.

4.2 Botucatu, uma cidade situada na borda do Aquífero Guarani

A cidade de Botucatu localiza-se na borda de um planalto elevado, cujos limites se destacam na paisagem ao longo de escarpas longas, sinuosas e contínuas, que delimitam toda a elevação. Esse tipo de feição de relevo é chamada cuesta. A Cuesta de Botucatu, também conhecida como Serra de Botucatu (Fig. 11), possui altitude variável entre 700 e 950 metros.

A frente (ou borda) da cuesta constitui um dos melhores locais, na parte paulista da Bacia do Paraná, para observação de algumas feições que caracterizam os antigos desertos que formam o atual Aquífero Guarani. Do alto das elevações, ou seja, a partir da crista da cuesta, encontramos rochas vulcânicas que se sobrepõem aos arenitos vermelhos da Formação Botucatu. Abaixo desta unidade, sustentando campos verdes em extensas colinas, aparecem rochas vermelho-esbranquiçadas do Arenito Pirambóia.

De modo geral, solos formados a partir dos basaltos cretáceos possuem cor vermelho-escuro (a popular terra-roxa). Aqueles que se desenvolveram sobre os arenitos Botucatu e Pirambóia são avermelhados a róseos, apresentam consistência arenosa e são extremamente frágeis do ponto de vista

da resistência à erosão. Na figura 11, pode-se dizer que toda a área cinzenta da ilustração corresponde a zonas onde afloram rochas da Formação Botucatu, enquanto na parte baixa, em cor clara, predomina o Arenito Pirambóia. A situação geral pode ser mais bem compreendida se examinarmos um perfil geológico através da bacia (Fig. 12), que corta o conjunto de unidades identificadas, dispostas de baixo para cima desde o embasamento (rochas mais antigas).

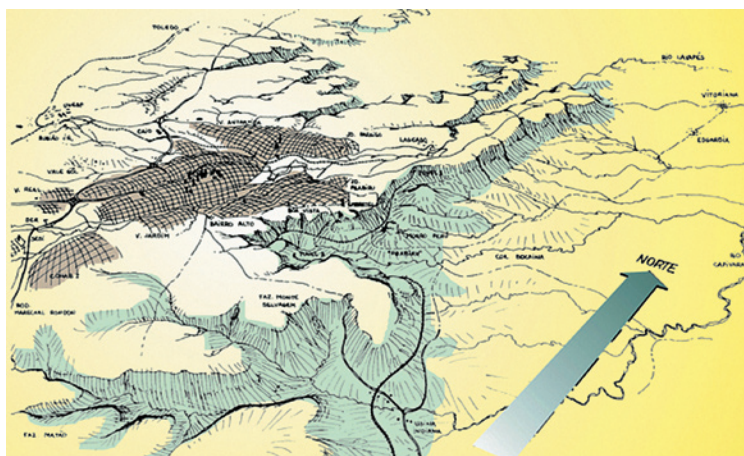


Figura 11 – Reconstrução artística da Cuesta ou Serra de Botucatu. Largura da parte central da figura de aproximadamente 22 km (baseada em <http://br.geocities.com/historiadebotucatu/rev-001.htm>, acesso em 28.06.2006)

5. Geologia do Aquífero Guaraní

A Bacia do Paraná possui duas seções principais: as rochas paleozóicas e as rochas mesozóicas. Esta última tem grande importância econômica, porque os arenitos depositados no intervalo constituem excelentes rochas-reservatórios. O Projeto Aquífero Guaraní (2006) descreve o **Sistema Aquífero Guaraní** como sendo caracterizado por duas grandes unidades estratigráficas: a *Unidade Estratigráfica I*, mais antiga, integrada pelas formações Buena Vista (Argentina e Uruguai) e Grupo Rosário do Sul (Brasil) e Formações Tapytá e Cabacué (Paraguai); e a *Unidade Estratigráfica II*, integrada

pelos formações Botucatu-Pirambóia (estados de SP-PR-SC, Brasil), Botucatu-Guará (Estado do RS, Brasil), Tacuarembó (Uruguai e Argentina) e Misiones (Argentina e Paraguai).

No Brasil, o sistema perfaz área total de cerca de 839.800 km², na qual predominam amplamente os arenitos das formações Botucatu e Pirambóia. Nos oito estados brasileiros que abrigam partes do Aquífero Guaraní, os estudos indicam grande diversidade de composição das águas e descontinuidade na estrutura geológica. Trata-se em realidade de um conjunto heterogêneo de “unidades

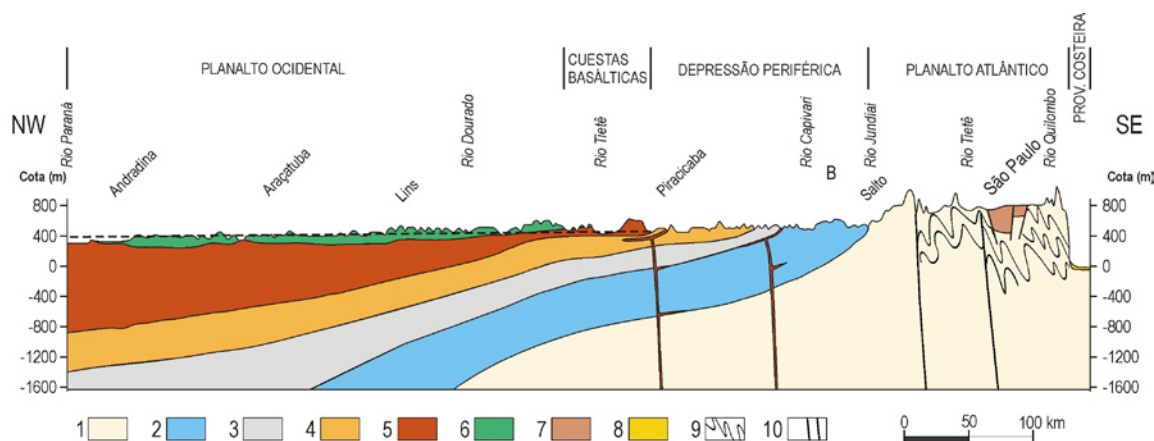


Figura 12 – Perfil geológico A-B através da Bacia do Paraná, com indicação da sequência estratigráfica das camadas, a partir de: (1) Embasamento Cristalino– rochas ígneas e metamórficas; (2) Grupo Tubarão – sedimentos glaciais e pós-glaciais; (3) Grupo Passa Dois – sedimentos marinhos; (4) Formações Pirambóia e Botucatu – arenitos fluviais a desérticos; (5) Formação Serra Geral – basaltos de inundação, e corpos intrusivos básicos; (6) Grupo Bauru – arenitos fluviais; (7) Sedimentos neogênicos; (8) Sedimentos marinhos; (9) Estruturas do embasamento; (10) Falhas (Modif. de Gov. Est. São Paulo. / Cons. Est. Rec. Hídricos 2005)

hidroestratigráficas” que podem conter muita, pouca ou nenhuma água (Machado 2006). São unidades que podem ser descritas como formações geológicas portadoras de água, em maior ou menor quantidade. Em nosso país, a água subterrânea é explorada há muitas décadas, sendo hoje utilizada para abastecimento de cidades, indústrias e agricultura. Além disso, constitui recurso geotermal, pois as águas quentes são utilizadas em balneários da região.

As formações Pirambóia e Botucatu representam sistemas deposicionais distintos, sendo admitidas como registro lito-estratigráfico de dois paleodesertos distintos no tempo (Assine et al. 2004). No contexto regional, a terça parte superior da Formação Pirambóia, com espessura da ordem de 100 m, possui características hidráulicas semelhantes às da Formação Botucatu, cujas espessuras são da ordem de 150 m (Rocha 1997).

Arenitos Botucatu e Pirambóia

Os arenitos Botucatu são rochas vermelhas essencialmente quartzosas de granulação fina (Almeida 1953a, 1954), capeadas por lavas basálticas da Formação Serra Geral. A deposição dos arenitos eólicos aconteceu no intervalo Neojurássico-Eocretáceo; as rochas apresentam-se comumente estratificadas, exibindo estratificações cruzadas de grande porte.

Gonzaga de Campos (1889 apud Salamuni & Bigarella 1967) utilizou pela primeira vez a denominação Botucatu, para designar arenitos com estratificação cruzada que se apresentam recobertos ou interestratificados com os basaltos da Formação Serra Geral. A existência de arenitos com características diferentes na parte inferior do arenito Botucatu já havia sido identificada em trabalhos do início do século XX; Joviano Pacheco os denominou fácies Pirambóia, por ocorrerem na localidade de Pirambóia, não muito distante de Botucatu (apud Washburne 1930).

Washburne (1930) admitiu que as estratificações cruzadas dos arenitos Pirambóia “somente poderiam ter sido produzidas pela ação da água”; em função dessa característica e da ampla distribuição das rochas em São Paulo, sotopostas ao Botucatu, propôs a existência de uma unidade inferior de arenitos fluviais, distinta dos arenitos eólicos. Os arenitos correspondem a uma vasta província desértica, denominada por Almeida (1953a) *Paleodeserto Botucatu*; o paleodeserto incluiria os

arenitos Pirambóia, Santana e Botucatu, tendo-se espalhado por área superior à atualmente ocupada pelo Deserto do Sahara (Almeida e Carneiro 1998). Em muitas localidades da bacia há descrições de sedimentos eólicos intercalados com derrames vulcânicos, indicativos de que o vulcanismo da Formação Serra Geral coexistiu com o paleodeserto Botucatu. Sanford e Lange (1960) consideraram os arenitos Pirambóia e Botucatu como duas formações, cabendo a Soares (1975) ter formalizado as unidades como formações distintas, mapeando-as em separado na faixa de afloramento do centro do Estado de São Paulo.

Os arenitos Botucatu geralmente decompõem-se em solos arenosos pouco férteis, que podem dar origem a extensas coberturas de areias soltas avermelhadas a róseas (Washburne 1930), extremamente frágeis do ponto de vista de resistência à erosão. Situação similar pode ser observada nas áreas de ocorrência dos arenitos Pirambóia. Assine et al. (2004) propõem a individualização de dois sistemas desérticos distintos, representados pelas formações Pirambóia e Botucatu, que denominaram Paleodesertos Botucatu e Pirambóia.

Em vários locais os arenitos sustentam grandes escarpas, como ocorre em Botucatu (Fig. 11). No sul e sudeste do Brasil, os arenitos do paleodeserto Botucatu encontram-se expostos nas escarpas da borda do Planalto Ocidental, na Província das Cuestas Basálticas, sustentadas por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. No Estado do Paraná, o Planalto Ocidental é também chamado de Terceiro Planalto Paranaense.

Uma discordância regional marca o contato basal da Fm. Botucatu (Zalán et al. 1987). Entre as formações Botucatu e Pirambóia o contato é indicado por mudança brusca na coloração e nas características dos arenitos, sobretudo na dimensão dos estratos cruzados. O desenvolvimento de campos de dunas do paleodeserto Botucatu deve ter atingido a plenitude durante o Jurássico.

O contato entre as formações Botucatu e Serra Geral é concordante e marcado na base do primeiro derrame vulcânico. Camadas do topo da Formação Botucatu reaparecem intercaladas nas camadas inferiores dos basaltos da Formação Serra Geral, mostrando que os primeiros derrames de lavas foram contemporâneos à deposição das areias eólicas do paleodeserto Botucatu. O contato concordante é o principal argumento estratigráfico para a definição do Grupo São Bento.

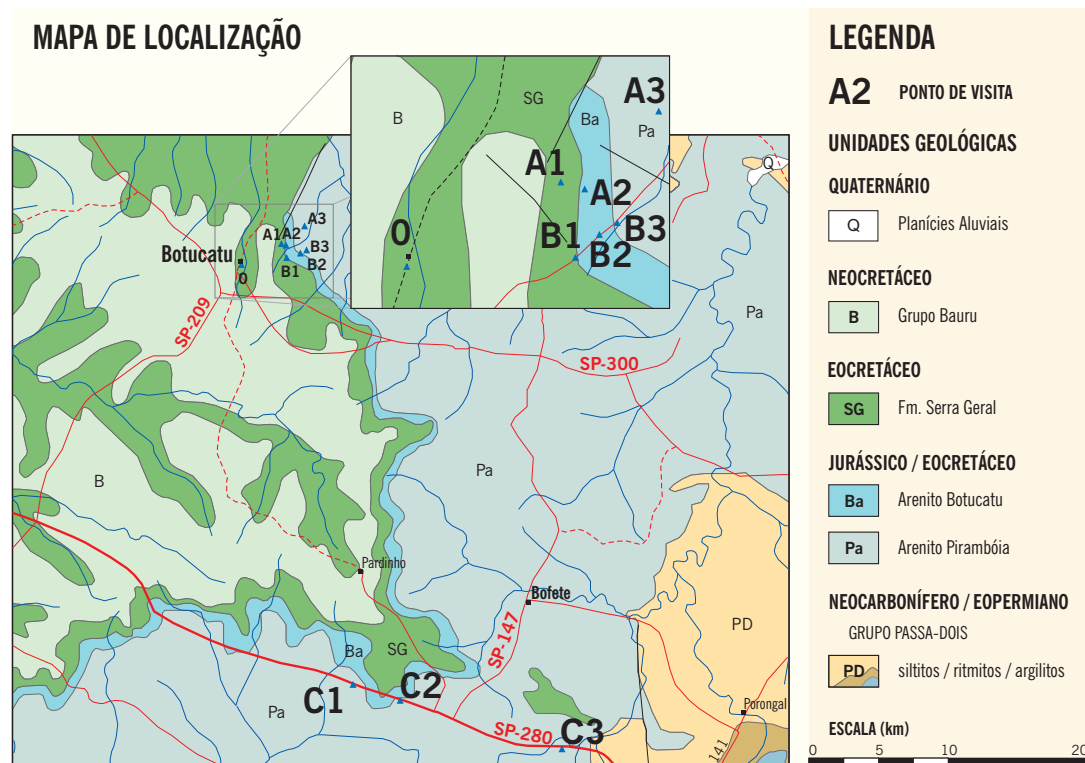


Figura 13 – Mapa de localização de pontos da viagem virtual

6. Pontos de visita de campo

As visitas de campo obedecem a um roteiro. Embora as paradas tenham sido previstas em sequência, elas podem ser percorridas em qualquer ordem. Os participantes da Viagem virtual ao Aquífero Guarani são convidados a visitar alguns pontos selecionados (Fig. 13).

O roteiro deve permitir que qualquer pessoa, munida de um mapa da área e eventualmente um aparelho GPS, possa se localizar no campo e percorrer os pontos. Ao todo são previstas três linhas, cada uma delas compreendendo três paradas. As coordenadas UTM, fornecidas abaixo, referem-se à localização precisa dos locais visitados, tendo sido utilizado o datum Córrego Alegre, zonas 23S e 22S.

Linha A – Linha Belvedere, leste de Botucatu (SP)

Ponto A1. Mirante no alto da Serra de Botucatu

Coordenadas UTM: 764.817 / 7.468.287 – Alt. 789 m

Neste local, situado no topo da Serra de Botucatu, pode-se observar com clareza as escarpas acentuadas que percorrem toda a borda do planalto de Botucatu. São as bordas de um relevo de cuestras,

uma forma de relevo sustentada por camadas rochosas suavemente inclinadas.

Toda cuesta é composta por uma encosta de mergulho forte, chamada escarpa, na qual estão expostas as camadas de rocha. O lado oposto da cuesta é sustentado pelas rochas mais resistentes à erosão que exibem inclinações muito suaves, que podem variar entre mergulhos ao redor de 2° até 15°. Relevos sustentados por camadas horizontais (menos de 2° de inclinação) são chamados tabuleiros.

Nesse ponto podemos observar ainda as zonas mais baixas (Fig. 14), que formam uma vasta zona plana, formada por típico relevo de colinas. As colinas são sustentadas por arenitos Pirambóia, rochas que também armazenam água em seu interior. Portanto, a visão panorâmica desse local é também uma bela e contínua exposição das rochas formadoras do Aquífero Guarani. No ponto A1 afloram rochas basálticas que fazem parte da Formação Serra Geral. Essas rochas, mais resistentes à erosão, sustentam a cuesta.

Atividades

1. Estude a fotografia. Localize-se na figura 11. [Dica: você está vendo a paisagem de oeste para leste].



Figura 14 – Paisagem observada do alto da Cuesta de Botucatu, no ponto A1

2. Observe as colinas da paisagem no pé da serra. Identifique áreas plantadas, matas e canais de drenagem.

**Ponto A2. Corte junto à estação ferroviária
Belvedere, pátio 8, Botucatu**

Coordenadas UTM: 765.209 / 7.468.158 – Alt. 712 m.

Esse ponto situa-se na encosta da Serra de Botucatu, entre as antigas plataformas 7 e 8 da ferrovia, que estava em construção quando fôra visitada por Almeida (1953a) durante a elaboração de sua obra clássica. O autor descreveu nesse trecho a presença de quatro dunas ao longo de aproximadamente um quilômetro de extensão, recobertas por camada de lava de cerca de 30 m de espessura, cuja forma não foi modificada pela ação da lava. Descreveu ainda arenitos portadores de marcas onduladas de origem eólica.

Hoje a exposição está bem degradada, sendo possível observar a estratificação dos arenitos róseo-esbranquiçados, e perceber sua granulação fina (Fig. 15). A rocha é essencialmente formada pelo mineral quartzo.

As duas dunas descritas por Almeida (1953a) exibem estrutura interna típica, perfil assimétrico e conservam as camadas gradacionais de arenito mais grosso, (Fig. 16). Na região de Rifaina, junto à divisa estadual São Paulo–Minas Gerais, Almeida (1953b) observou a existência de ventifactos que comprovam ação eólica.

Atividades

1. Estude o esquema da figura 16.
2. Localize o perfil das dunas, sob as lavas. [Dica: a face mais inclinada da duna se situa em geral na parte protegida do vento].

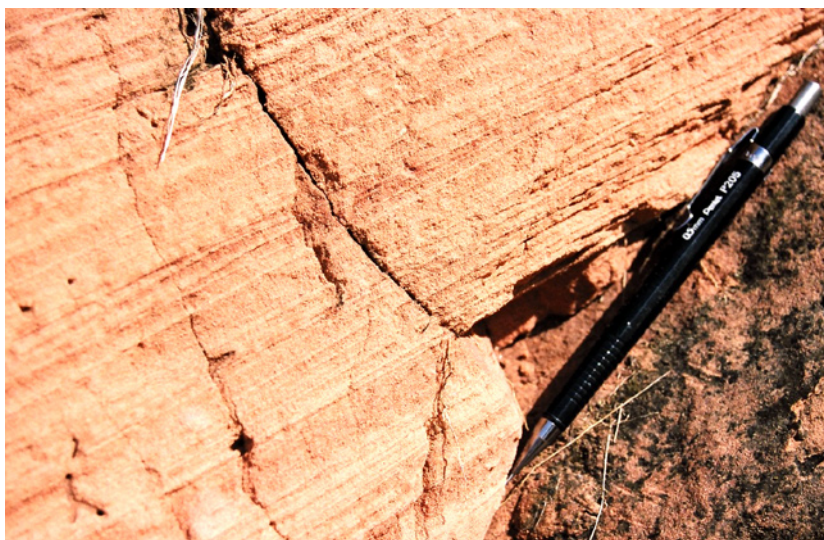


Figura 15 – Delicada estratificação do Arenito Botucatu, em sucessivos planos inclinados, no ponto A2

**Ponto A3. Ponto de
observação do Morro
do Peru, Botucatu**

Coordenadas UTM: 766.464 /
7.469.525 – Alt. 517 m.

No trecho até este ponto foi percorrida uma estrada vicinal onde ocorrem blocos de uma rocha escura, o basalto. São blocos deslocados pela ação da água e da gravidade, depois de terem sido desprendidos das massas de rocha que recobrem os arenitos. A estrada vicinal contorna o Morro do Peru

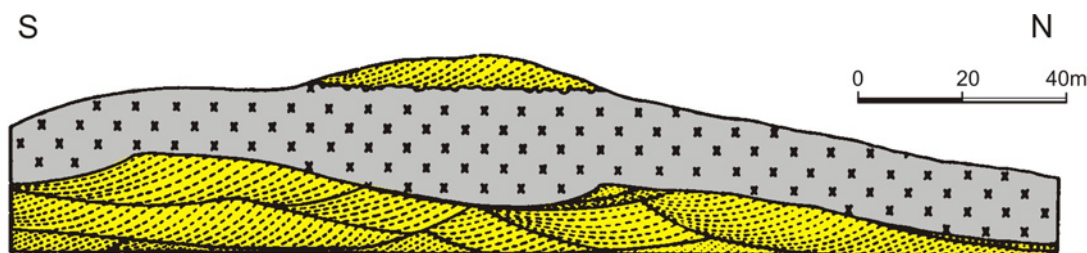


Figura 16 – Seção representativa de duas dunas recobertas por basaltos, com forma original preservada em seção paralela ao paleovento proveniente de norte, Formação Botucatu; encosta da Serra de Botucatu, entre as plataformas 7 e 8 da ferrovia (Modif. da Fig. 7 de Almeida 1953a)

(Fig. 17), feição que é denominada morro testemunho, porque comprova que as camadas de rocha da cuesta estendiam-se além da posição atual. Toda a área integra a APA Área de Proteção Ambiental de Corumbataí-Botucatu-Tejupá.

Atividades

1. Examine o corte representado na figura 17 e procure identificar as camadas de estratificação da rocha.
2. Compare as camadas do desenho do ponto anterior (Fig. 16) com a estratificação presente neste local.
3. Ambos os locais são exemplos de estratificação cruzada da Fm. Botucatu. Você concorda com a afirmação?

Linha B – Linha Bairro Alto, sudeste de Botucatu

Ponto B1. Área situada na beira da estrada da Indiana, arredores de Botucatu

Coordenadas UTM: 765.147 / 7.467.165 – Alt. 733 m.

Neste local, situado no topo da Serra de Botucatu, pode-se observar com clareza as escarpas que delimitam o planalto de Botucatu. São as bordas de um relevo de cuestas, uma forma de relevo sustentada por camadas rochosas suavemente inclinadas.

Ponto B2. Corte na estrada da Indiana, arredores de Botucatu

Coordenadas UTM: praticamente idênticas às do ponto B1.

Esse ponto situa-se no acesso ao Morro do Peru pela estrada da Indiana (Fig. 18). No local há

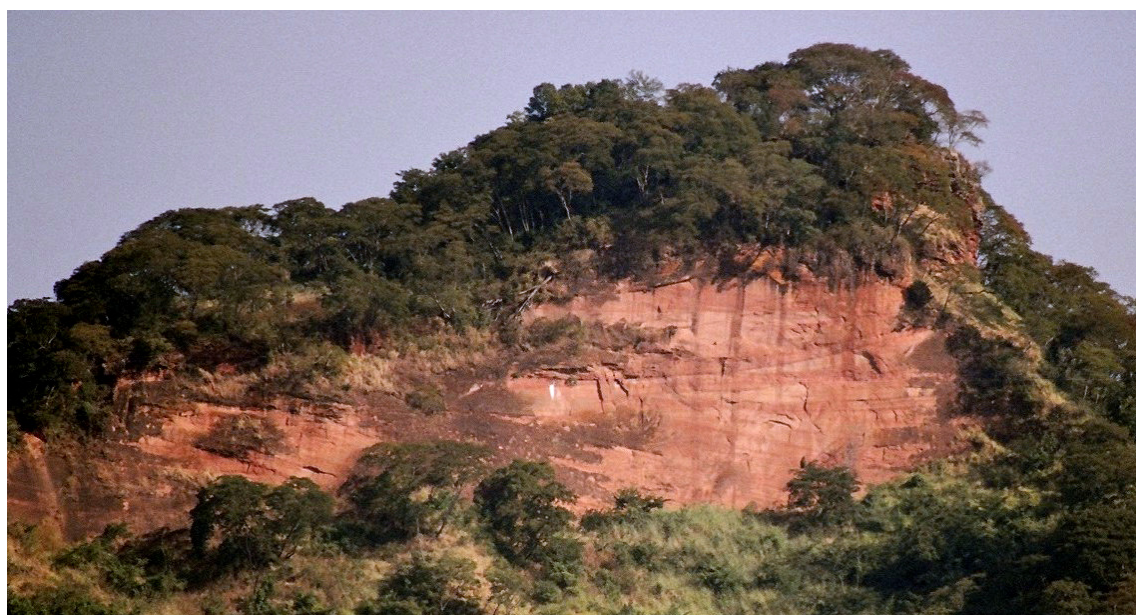


Figura 17 – Morro do Peru, onde se pode observar a estratificação dos arenitos da Formação Botucatu

perigo de instabilidade de blocos, razão pela qual os visitantes costumam observar o corte atentamente, antes de se aproximar, para perceber a existência de blocos instáveis no talude.

Camadas de arenito Botucatu bem estratificado ocorrem neste trecho, recobertas por lavas da Fm. Serra Geral. O basalto é uma rocha preta, resistente ao impacto do martelo de geólogo, e forma blocos arredondados devido à desagregação intempérica. No contato com o basalto, o arenito exibe coloração branca, possivelmente devida a transformações metamórficas na superfície das dunas. O corte parece ser o mesmo que o geólogo C.K. Washburne visitou por volta de 1930 na Serra de Botucatu.

Ponto B3. Corte na estrada da Indiana, arredores de Botucatu

Coordenadas UTM: 766.249 / 7.467.620 – Alt. 592 m.

Esse ponto situa-se no entroncamento da estrada da Indiana com outra estrada vicinal que permite acesso ao Morro do Peru. Observa-se um contato entre dois níveis de rocha, pertencentes à Fm. Pirambóia (Fig. 19). O arenito bege-rosado basal é recoberto por um nível de siltito (mais escuro).

Linha C – Linha ao longo da Rodovia Castello Branco, sudeste de Botucatu

Ponto C1. Corte na Rod. Castello Branco, entre km 199 e 200. Botucatu

(SP)Coordenadas UTM (aproximadas): 771.026 / 7.434.750 – Alt. 760 m.

Este ponto de visão panorâmica situa-se na pista interior-capital da rodovia. Observa-se extensa área degradada, desenvolvida por boçorocamento sobre solos derivados de arenitos (Fig. 20). Os canais de drenagem vizinhos exibem evidências de assoreamento, revelando a extrema fragilidade dos solos, sua baixa resistência à erosão e a forte intensidade do fenômeno, relativamente recente. Boçorocas são comuns na região, como ilustrado nas figuras 20 e 21. Esta última é observada a norte da pista capital-interior da mesma rodovia, à altura do km 178.

Ponto C2. Corte na Rod. Castello Branco, entre km 198 e 199. Botucatu (SP)

Coordenadas UTM: 772.204 / 7.435.748 – Alt. 656 m.

O corte da rodovia situa-se ao lado da boçoroca observada na parada panorâmica anterior, junto a

placa de indicação de rede de restaurantes. Ocorre arenito bem estratificado, portador de grandes planos de estratificação cruzada de grande porte, típica das camadas de arenito da Fm. Botucatu. Os solos desse ponto são pouco espessos, conforme se pode observar na figura 20.

Observe neste ponto que a forma plana da área central da foto resultou da ação humana, pois uma terraplenagem eliminou as elevações e removeu horizontes de solo. Geralmente, em regiões tropicais, os solos constituem uma espécie de “pele” da superfície terrestre. Assim, a remoção da cobertura vegetal e dos solos acaba favorecendo processos de erosão acelerada. É fácil notar que a área degradada vem se ampliando rápida e progressivamente, tendo atingido os solos vermelhos da parte mais alta, ao redor da zona terraplenada.

Atividades

1. Espalhe areia, até formar uma camada de aproximadamente 2 cm de espessura, em uma tigela de vidro ou uma forma de fazer bolos.
2. Derrame um pouco de água na superfície da areia e verifique com qual rapidez ocorre infiltração.
3. Coloque sob a tigela um objeto qualquer para elevá-la, de modo a deixar a camada de areia suavemente inclinada. Se a camada de areia estiver inclinada, um pequeno aumento de volume de água derramada determinará mudanças no comportamento da areia.
4. Mesmo com pouca inclinação da camada, aumentando a velocidade da água, quando a erosão da areia começa a predominar, em lugar da infiltração?
5. Alguma dessas situações é capaz de explicar a situação ilustrada na boçoroca da figura 21?

Ponto C3. Corte na Rod. Castello Branco, km. 176, Porangaba (SP)

Coordenadas UTM: 782.758 / 7.432.327 – Alt. 541 m.

Esse ponto situa-se junto ao acesso para uma fazenda, na pista interior-capital da rodovia, pouco adiante de bela exposição de arenitos brancos em corte da Rod. Castello Branco. O local é adequado para observação das rochas, pois se trata de um acesso secundário, sem grande movimento de veículos. Observam-se planos de estratificação cruzada descontínuos (Fig. 22), nos arenitos pertencentes à Formação Pirambóia.



Figura 18 – Contato entre basalto e arenito na estrada da Indiana. À esquerda, o ilustre Professor Fernando Flávio Marques de Almeida, que acompanhou a viagem de campo à região que estudara nos anos 1950



Figura 19 – Contato entre dois níveis de rocha: na base ocorre um arenito bege-rosado, recoberto por um nível de siltito (cores mais escuras), no entrocamento da estrada da Indiana com outra estrada vicinal, ponto B3



Figura 20 – Boçoroca próxima ao ponto C2. Observe que a erosão atinge até mesmo os solos vermelhos da parte superior da zona terraplenada (mais clara) que correspondem a solos superficiais, geralmente mais resistentes à erosão



Figura 21 – Boçoroca em solos arenosos, entre os pontos C1 e C2, lado norte da SP-280. O sedimento branco que aparece nos canais de drenagem é material arenoso removido pela erosão e depositado por assoreamento



Figura 22 – Estratificação cruzada em arenitos da Formação Pirambóia

7. Uso e ocupação do solo em áreas de recarga

Os recursos hídricos do Aquífero Guarani são de excelente qualidade, mas podem ser ameaçados por superexploração localizada – quando a velocidade de extração é maior do que a velocidade de reposição natural de águas no aquífero – e por atividades potencialmente poluidoras, incompatíveis com a preservação da qualidade das águas. A proteção das águas subterrâneas exige mecanismos adequados de gestão do uso e ocupação do solo porque, como vimos, a alimentação do aquífero ocorre sobretudo por infiltração direta nas áreas onde afloram os arenitos ou, subordinadamente, por infiltração vertical nas discontinuidades dos basaltos. Tais rochas são vulneráveis à contaminação, embora o processo possa ser bastante lento.

A ação humana compreende operações agrícolas, industriais e de expansão urbana, que podem causar erosão acelerada, ou seja, amplificam a velocidade da erosão normal. Em áreas rurais, a movimentação de equipamento pesado, associada a atividades agrícolas intensivas, pode compactar a camada superior do solo. Os espaços vazios devem ser da ordem de 50% do solo agricultável para permitir o livre fluxo de água, nutrientes e ar pelo solo. Quando esses espaços se perdem, o solo começa a se erodir, pois a água da chuva, ao invés

de infiltrar-se, corre pela superfície onde a camada foi compactada. Isso reduz ainda a quantidade de matéria orgânica, pois as raízes não conseguem mais penetrar. Do mesmo modo, a remoção mecânica da parte superior do solo pode introduzir perdas de solo e ocasionar fenômenos de erosão acelerada (Figs. 20 e 21). As queimadas contribuem para a perda de massa de origem biológica nos solos e podem contribuir para agravar o problema, além de gerar gases causadores do efeito-estufa (Fig. 23). Devem ser, portanto, evitadas.

Em áreas urbanas, há diversos exemplos de iniciativas disciplinadoras do uso e ocupação do solo, por meio de instrumentos legais criados por instituições federais, estaduais ou municipais. Villar e Ribeiro (2007), p. ex., analisam medidas adotadas em Ribeirão Preto para disciplinar o uso e ocupação de áreas de recarga do Aquífero Guarani.

As áreas degradadas do roteiro resultam da combinação de fenômenos naturais com atividades humanas. As consequências de procedimentos inadequados, a médio e longo prazos, são o boçorocamento, o assoreamento de canais de drenagem e a perda de solos.

A viagem virtual permite exemplificar fatores a serem considerados para disciplinar o uso e ocupação do solo das bacias. Os controles devem levar em conta:



Figura 23 – Queimada em terrenos arenosos, proximidades da localidade de Vitoriana, município de Botucatu

- a) a interdisciplinaridade envolvida nos estudos, que requerem conhecimentos dos campos da geologia, estratigrafia e geomorfologia, e estendem-se à interação das águas superficiais com as subterrâneas, que envolvem conceitos de hidrologia e hidrogeologia;
- b) a fragilidade ambiental, sobretudo considerando que, em meios porosos e permeáveis, eventuais manchas de contaminação de lençóis superficiais podem se infiltrar e acabar comprometendo a qualidade de recursos subterrâneos e
- c) o potencial de contaminação de um aquífero cuja parte não-confinada se distribui em região de alta velocidade de desenvolvimento econômico, com todos os custos sociais e ambientais que esse fato possa acarretar.

Em áreas urbanas devem ser considerados o grau de impermeabilização da superfície do terreno e o problema da disposição de resíduos e efluentes domésticos e industriais. São fatores que podem ser disciplinados por meio do estabelecimento de controles ambientais e limites para os níveis de ocupação do solo. Cabe lembrar, finalmente, que iniciativas para recuperação de qualidade de águas subterrâneas, além de muito caras, são absolutamente inviáveis em certas situações.

8. Conclusões

O presente roteiro de viagem virtual tem como premissa a idéia de que o conhecimento é a melhor arma de que as sociedades dispõem para preservar o patrimônio ambiental e os recursos finitos de que dispõem. A viagem pode ser realizada segundo uma seqüência de paradas no próprio campo, em qualquer ordem. Acreditamos que, caso venha a percorrer alguns pontos selecionados, um participante da Viagem virtual ao Aquífero Guarani poderá perceber a origem singular das camadas, sua distribuição geográfica limitada e, além disso, o alto grau de fragilidade dos solos que se desenvolvem sobre elas.

Diversas características dos paleodesertos Pirambóia e Botucatu refletem os ambientes específicos sob as quais se formaram e podem ser observados na região de Botucatu: a grande extensão das camadas expostas, os sistemas deposicionais e as estruturas típicas. A Fm. Botucatu é caracterizada pelas notáveis estratificações cruzadas de grande porte e presença de paleodunas. Na região comprovou-se que os primeiros derrames de lavas foram contemporâneos à deposição das areias eólicas do paleodeserto Botucatu, dadas as peculiares relações de superposição da Fm. Botucatu pelas lavas da Fm. Serra Geral.

Os arenitos são rochas sedimentares que possuem excelente capacidade de armazenamento e transmissão de água: a areia torna-se encharcada graças a dois fatores principais: os inúmeros espaços vazios (poros) e sua intercomunicação. Tais características os definem como rochas tipicamente aquíferas. Por outro lado, a dinâmica externa da Terra e a desagregação intempérica que a acompanha são inexoráveis e afetam todos os materiais da superfície terrestre. A região de Botucatu não ficou imune a esses processos, de modo que, nos últimos milhões de anos as rochas sofrem efeitos de intemperismo e erosão que modelaram a paisagem, construíram magníficas escarpas frontais do relevo típico das cuestas, além de ter gerado solos medianamente espessos e geralmente frágeis em relação à erosão.

A cobertura de solos arenosos tem sido impactada fortemente pela ação humana, em especial por práticas inadequadas de cultivo, compactação superficial ou remoção da camada superior do solo, além do intensivo uso de agrotóxicos (defensivos agrícolas), queimadas e desmatamento. Uma das consequências são as boçorocas em solos arenosos, bastante comuns na região. Outra consequência pode ser a irremediável contaminação de reservas de água subterrânea, colocando em perigo recursos importantes como os das reservas brasileiras do Aquífero Guarani.

As imagens de nosso vídeo hipotético podem parecer pura ficção, mas retratam, em uma escala de tempo ampliada, a evolução natural da paisagem regional. Não é preciso aguardar o registro dos próximos milhões de anos para saber o que poderá ocorrer com as reservas de água doce do Aquífero Guarani, caso as sociedades humanas mantenham os atuais padrões de ocupação e exploração.

Agradecimentos

O autor agradece ao geólogo Gerônimo Albuquerque Rocha pelo convite para participar da Jornada Estadual, em agosto de 2006, aos monitores que gentilmente se dispuseram a oferecer seu entusiasmo e conhecimento para garantir o êxito das visitas e, finalmente, ao Secretário de Meio Ambiente da Prefeitura de Botucatu, Wado Silva, que proporcionou a eficaz logística que possibilitou participação simultânea de tantas pessoas interessadas em conhecer a geologia superficial do aquífero. Agradece ainda a dois revisores de *Terrae Didactica*, pelas pertinentes sugestões, que muito contribuíram para aprimorar o manuscrito.

Referências bibliográficas e sugestões de leitura

- AGI. American Geological Institute. 2006. White Sands National Monument. Earth Science World Image Bank. <<http://www.earthscienceworld.org/images/search/results.html?Keyword=Dune#null>>. Acesso: 28/06/2006.
- Almeida F.F.M.de, Carneiro C.D.R. 1998. Botucatu: o grande deserto brasileiro. *Ciência Hoje*, **24** (143):36-43.
- Almeida F.F.M.de. 1954. *Botucatu, um deserto triássico da América do Sul*. Div. Geol. Miner./Depto. Nac. Prod. Miner. Notas Prel. Estud. n. 86, 21 p.
- Almeida F.F.M.de. 1953a. Botucatu, a triassic desert of South America. In: INT. GEOL. CONGR., 19, Argel, 1953. *Comptes Rendus...*, XIX Sessão, fasc. VII, p. 9-24. Argélia.
- Almeida F.F.M.de. 1953b. *Ventifactos do deserto Botucatu no Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro: Div. Geol. Mineral. (Notas Preliminares e Estudos, n. 69)
- Araújo L.M., França A.B., Potter P.E. 1995. *Aquífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai*: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, (Publicação especial PETROBRAS-UFPR), 16p.
- Assine M.L., Piranha J.M., Carneiro, C.D.R. 2004. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. orgs. 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Ed. Beca. p. 77-93. (Cap. 5).
- Carneiro C.D.R. (Editor cient.). 2000. *Geologia*. São Paulo: Global/SBPC – *Projeto Ciência Hoje na Escola*. 80p. (Série Ciência Hoje na Escola, v. 10).
- Carneiro C.D.R. 2006. *Visita monitorada a afloramentos do Aquífero Guarani, Bacia do Paraná*: formações Pirambóia e Botucatu. Botucatu: Pref. Mun. Botucatu. 58p. (Roteiro de viagem de campo integrante da Jornada Estadual Aquífero Guarani, Data: 17 de agosto de 2006, Botucatu, SP).
- Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M. de 1996. O sertão já virou mar. *Ciência Hoje*, **21**(122):40-50.
- Carneiro C.D.R., Mizusaki A.M.P., Almeida F.F.M. de. 2005. A determinação da idade das rochas. *Terrae Didactica*, **3**(1):50-73.

- rae Didática, 1(1):6-35. <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v1n1/t_didatica_2005_v01n01_p006-035_carneiro.pdf>.
- Cottrell R.D. 2006. Dinosaurs. Univ. Rochester EES 201 - Evolution of the Earth. <<http://www.earth.rochester.edu/ees201/labs/dinosaurs.pdf>>. Acesso: 28/06/2006.
- Cottrell R.D. 2006. Paleogeography. Univ. Rochester EES 201 - Evolution of the Earth. <<http://www.earth.rochester.edu/ees201/labs/paleogeography.pdf>>. Acesso: 28/06/2006.
- GOVERNO do Estado de São Paulo. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 2005. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo* : escala 1:1.000.000 : nota explicativa / [coord. geral Gerônimo Rocha]. São Paulo, Depto. Águas Energia Elétr. – Inst. Geol. – Inst. Pesq. Tecnol. Est. S. Paulo – Comp. Pesq. Rec. Min., 119P. (Publicação especial PETROBRAS-UFPR), 16p.
- Machado J.L.F. 2006. A redescoberta do Aquífero Guarani. *Scientific American Brasil*, (47) (abril de 2006). <<http://www2.uol.com.br/sciam/>>. Acesso: 22/02/2007.
- NASA. 2002. NASA Space Shuttle image STS111-367-29. <<http://eol.jsc.nasa.gov/>>. Acesso: 28/06/2006.
- Orlandi Filho V., Krebs A.S.J., Giffoni L.E. 2002. Coluna White. Excursão virtual pela Serra do Rio do Rastro. Seção Padrão das Unidades do Gondwana no Sul do Brasil. In: CPRM. Serviço Geológico do Brasil. <<http://www.cprm.gov.br/coluna/index.html>>. Acesso: 07/03/2007.
- Pereira S.Y. 2000. O caminho das águas. In: Carneiro C.D.R. (ed. cient.). *Geologia*. São Paulo: Global/SBPC, Vol. 10, pp. 6, pp. 50-55, 2000. (Série Ciência Hoje na Escola).
- PROYECTO para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. 2006. *Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní*. Ref.: Licitación S CC/01/04 – 1/1018.1 <<http://www.sg-guarani.org/index/pdf/proyecto/licitaciones/hidro/infogeo/SegundoInformeGeo.pdf>>. Acesso: 22/02/2007.
- Revista da História. 2006. A localização de Botucatu sobre a Serra. <<http://br.geocities.com/historiade-botucatu/rev-001.htm>>. Acesso: 28/06/2006.
- Renne P.R., Ernesto M., Pacca I.G., Coe R.S., Glen J.M., Prévot M., Perrin M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, **258**, 975-979.
- Rocha, G. A. 1997. O grande manancial do Cone Sul. *Estudos Avançados* (IEA/USP), **11**:191-212.
- Teixeira W., Toledo M.C.M.de, Fairchild T.R., Taioli F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos. 568p.
- Turner S., Regelous M., Kelley S., Hawkesworth C., Mantovani M., 1994, Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: High precision ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology: *Earth and Planetary Science Letters*, **121**:333-348.
- Villar P.C., Ribeiro W.C. 2007. As áreas de recarga do Aquífero Guarani e o planejamento urbano do município de Ribeirão Preto, São Paulo. In: Encontro Internacional sobre a Governança da Água na América Latina, 1, 29 de outubro a 01 de novembro 2007, São Paulo, USP. *Resumos...* São Paulo, USP. <http://www.usp.br/procam/govagua/resumos/Pilar_Wagner.pdf>. Acesso: 28/11/2007.
- Zalán P.V. 2004. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. orgs. 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano*: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca. p. 595-612. (Cap. 33).
- Washburne, C.W. 1930. *Petroleum Geology of the State of São Paulo*. Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo, Boletim 22, 282p.
- Wikipedia, the free encyclopedia. 2006. *Guarani Aquífer*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Guarani_aquifer#See_also>. Acesso: 29/06/2006.

**Envie seu artigo a
TERRÆ DIDÁTICA**

Acesse : <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica>

Veja os formatos e normas de publicação