



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

**CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Munique Vieira da Silva**

**DATAÇÃO PELO MÉTODO DA LUMINESCÊNCIA DE DEPÓSITOS COLUVIAIS E  
ALUVIAIS DO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL**

**Rio de Janeiro  
2011**

Munique Vieira da Silva

**DATAÇÃO PELO MÉTODO DA LUMINESCÊNCIA DE DEPÓSITOS COLUVIAIS E  
ALUVIAIS DO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Geologia da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro como  
requisito necessário à obtenção do  
título de Mestre em Geologia

Área de concentração:  
Paleontologia e Estratigrafia

Orientador: Claudio Limeira Mello

Rio de Janeiro  
2011

## **Agradecimentos**

Agradeço a meu orientador, Claudio Limeira Mello, por sua orientação cuidadosa, paciência e gentileza, além de sua compreensão e conversas amistosas.

Agradeço a minha irmã Paula Vieira, que sempre me ajudou com as figuras e sempre ouviu pacientemente minhas lamúrias quando eu achava que algo estava dando errado.

Agradeço também a meu ex-professor do Instituto de Física, Luiz Felipe de Souza Coelho, pelos empréstimos de livros e pela revisão e sugestões em relação aos princípios físicos expostos neste trabalho.

## Resumo

Vieira, Munique. **Datação pelo método da luminescência de depósitos coluviais e aluviais do médio vale do rio Paraíba do Sul**. Rio de Janeiro, 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Os depósitos coluviais e aluviais representam um grande desafio para a técnica de datação por luminescência. Desta forma, o presente trabalho busca avaliar um conjunto de idades LOE, com o uso dos protocolos MAR e SAR, obtidas para depósitos aluviais e coluviais quaternários, particularmente holocênicos, da região do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). Para isso, foram selecionados níveis estratigráficos para a coleta das amostras em seções com estratigrafia bem conhecida e com balizamento por datações radiocarbono, buscando abranger os principais intervalos estratigráficos. Os resultados obtidos pelo protocolo MAR não se ajustam ao quadro estratigráfico conhecido, apontando para idades muito mais antigas do que as esperadas a partir das datações radiocarbono disponíveis. Pode-se concluir, assim, que o protocolo MAR não é adequado para a datação desses tipos de depósitos. Os dados obtidos através do protocolo SAR ficaram mais próximos que o esperado com base no quadro estratigráfico da região, embora também mais antigos. Como causas para estes resultados podem ser citados, principalmente: (i) as características dos processos deposicionais que não favoreceram o zeramento completo do sinal LOE; (ii) intemperismo e (iii) bioturbação. Além disso, deve-se ressaltar a necessidade de uma análise estatística com maior número de alíquotas, diante da ampla variação de idades no conjunto de alíquotas analisadas para uma mesma amostra.

Palavras-chave: datação, luminescência, LOE, aluviais, coluviais, quaternário.

## Abstract

Vieira, Munique. **Luminescence dating of alluvial and colluvial deposits from the Paraíba do Sul middle river valley**. Rio de Janeiro, 2011. 107 p. Thesis (Master Degree in Geology) – Post-graduation Program in Geology, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Colluvial and alluvial deposits represent a great challenge for the luminescence dating technique. Thus, this research intends to evaluate a collection of OSL ages, using MAR and SAR protocols, obtained for Quaternary alluvial and colluvial deposits, particularly Holocene deposits, from the Paraíba do Sul middle river valley (Southeastern Brazil). Stratigraphic levels were selected for the collecting of samples in well-known stratigraphic sections with previous radiocarbon dating. The results obtained through the MAR protocol do not adjust to the stratigraphic framework, pointing to much older ages than the ones expected by the available radiocarbon dates. It can be concluded, then, that the MAR protocol is not suitable for dating such deposits. The data obtained through the SAR protocol was closer than expected based on the regional stratigraphic framework, though also older. The causes for these results can be named as principally: (i) the characteristics of depositional processes that did not favor the complete resetting of OSL signal; (ii) weathering and (ii) bioturbation. Moreover, the need for a statistical analysis with a larger number of aliquotes must be highlighted, in view of the great variety of ages in the analyzed array of aliquotes for a single sample.

Keywords: dating, luminescence, OSL, alluvial, colluvial, Quaternary.

## Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>7</b>
<b>2 A datação por luminescência</b>	<b>9</b>
2.1 Radiações ionizantes	9
2.2 A radioatividade nas rochas	12
2.3 Os raios cósmicos	14
2.4 Medindo a radioatividade	15
2.5 Modelo atômico	17
2.6 O conceito de bandas de energia	19
2.7 Defeitos em estruturas cristalinas	22
2.8 Armadilhas	24
2.9 Fuga das armadilhas	24
2.10 Modelo para a luminescência	28
2.11 A datação por luminescência	29
2.11.1 Evolução da técnica de datação por luminescência	29
2.11.2 Fundamentos	30
2.11.3 Obtenção da dose anual	33
2.11.4 Obtenção da dose equivalente	35
2.11.5 Minerais utilizados para datação por luminescência	36
2.11.6 Datação de colúvios	37
2.11.7 Datação de alúvios	39
2.11.8 Alternativas para problemas relacionados à datação de alúvios e colúvios	39
<b>3 Área de estudo</b>	<b>43</b>
3.1 Localização	43
3.2 Geologia regional e geomorfologia	44
<b>4 Estratigrafia do Quaternário do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul</b>	<b>49</b>
4.1 Avaliação de dados geocronológicos disponíveis	54
4.1.1 Seção Bom Retiro	56
4.1.2 Seção Cotiara	56
4.1.3 Seção Campo Alegre	57
4.1.4 Seção Campinho	58
4.1.5 Seção Cerâmica	58
4.1.6 Seção Fazenda Bahia	59
4.1.7 Seção Resgate	59
4.1.8 Seção Rialto	59
4.1.9 Seção Fazenda Rialto	60
4.1.10 Seção Córrego do Lavapés	60
4.1.11 Seção Mato Dentro	61

4.1.12 Seção Cafundó	62
4.1.13 Seção Fazenda Conceição	62
4.1.14 Seção Fazenda Cachoeira	62
<b>5 Metodologia</b>	<b>64</b>
5.1 Seleção das localidades estudadas e coleta de amostras	64
5.2 Protocolo laboratorial	65
5.2.1 Curva de calibração	67
5.2.2 Determinação da dose anual	68
5.2.3 Determinação da dose acumulada	68
5.2.3.1 O protocolo MAR	69
5.2.3.2 O protocolo SAR	69
5.2.4 O cálculo da idade	71
<b>6 Resultados e discussões</b>	<b>72</b>
6.1 Localidade Bom Retiro	72
6.2 Localidade Cotiara	81
6.3 Localidade Campinho	86
6.3.1 Campinho A	87
6.3.2 Campinho B	89
6.3.3 Campinho C	91
6.4 Discussões	96
<b>7 Conclusões</b>	<b>100</b>
<b>Referências</b>	<b>104</b>

## 1 Introdução

A região do médio vale do rio Paraíba do Sul é uma das mais conhecidas áreas no sudeste brasileiro com relação à dinâmica geomorfológica e sedimentar quaternária. A primeira coluna estratigráfica de detalhe para depósitos quaternários na região foi apresentada por Moura e Meis (1986), que introduziram a abordagem de classificação aloestratigráfica na literatura brasileira. Posteriormente, Moura e Mello (1991) aprimoraram o quadro estratigráfico, definindo várias unidades aloestratigráficas. Uma reavaliação dessas unidades foi feita por Mello *et al.* (1995), que apresentaram também um conjunto de datações radiocarbono, de modo a balizar a coluna estratigráfica. Embora outros trabalhos também apresentem idades numéricas para essa região (Coelho Netto, 1998; Peixoto, 2002; Tatum *et al.*, 2003; Barros, 2003), a reconstituição da evolução quaternária tem sido elaborada apoiando-se mais em correlações estratigráficas, sendo ainda poucas as datações disponíveis, em especial para o registro pleistocênico. Assim, faz-se necessário um número maior de dados geocronológicos para auxiliar a determinação das unidades e eventos evolutivos quaternários nesta região.

O emprego do método da luminescência para ampliar as datações deste registro é considerado adequado, pois este método tem-se mostrado, em vários estudos, bastante eficiente para a obtenção de idades de diferentes depósitos quaternários, em ambientes deposicionais diversos, com alcance em torno de 1 milhão de anos, enquanto o método por radiocarbono tem alcance restrito praticamente ao Holoceno e é limitado a níveis orgânicos. Outra vantagem do método da luminescência em relação ao do radiocarbono é sua facilidade de aplicação, o que resulta em custo comparativamente baixo.

Trabalhos como os de Peixoto (2002), Tatumi *et al.* (2003), Tatumi *et al.* (2006), Sallun e Suguio (2007), Sallun *et al.* (2007), Ferreira e Chang (2008) e Silva e Corrêa (2009) aplicaram com sucesso o método da luminescência para a geocronologia de sedimentos aluviais e coluviais pleistocênicos no Brasil. Tatumi *et al.* (2006) realizaram um estudo comparativo com idades radiocarbono, obtendo resultados próximos para as idades pelos dois métodos.

O objetivo principal do presente estudo é aplicar o método de datação por luminescência em depósitos coluviais e aluviais quaternários, especialmente holocênicos, do médio vale do rio Paraíba do Sul. Tendo em vista que estes depósitos possuem estratigrafia bem estabelecida e datações por radiocarbono em número significativo (Moura & Mello, 1991; Mello *et al.*, 1999; Coelho Netto, 1998), tem-se também como objetivo avaliar a confiabilidade do método de datação por luminescência para a datação destes depósitos. Através do presente estudo, busca-se contribuir para o avanço no conhecimento científico no campo das datações de depósitos quaternários no Sudeste do Brasil, o que pode trazer contribuições importantes para se entender as taxas e magnitudes dos processos geológicos/ambientais nesta região.

## 2 A datação por luminescência

Qualquer material está sempre emitindo radiação, e essa radiação depende da temperatura na qual o corpo se encontra. À temperatura ambiente, os corpos emitem radiação até o infravermelho. Quando essa radiação está na faixa do visível no espectro eletromagnético, sem que o corpo tenha sofrido grandes aumentos de temperatura, dizemos que está ocorrendo luminescência. Assim, a luminescência é o fenômeno pelo qual os corpos emitem, em condições específicas e sob diferentes causas de excitação, radiações luminosas com maior intensidade e maior frequência do que corresponderia a sua temperatura.

O fenômeno da luminescência é explicado através do modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos sólidos. Os fundamentos para a compreensão desses conceitos envolvem noções de radiações ionizantes e modelo atômico, que serão revisados a seguir.

### 2.1 Radiações ionizantes

O decaimento radioativo é o processo pelo qual um núcleo instável ejeta ou captura partículas, transformando o nuclídeo radioativo em um isótopo de outro elemento. Às vezes o nuclídeo-filho também é instável; nesse caso, o decaimento continua através de quantas etapas forem necessárias para gerar um nuclídeo estável.

Urânio (U), Rádium (Ra), Tório (Th), Polônio (Po) são elementos naturalmente radioativos, ou seja, todos os seus isótopos emitem radiação. Essa emissão é acompanhada

por uma perda de massa. Um isótopo radioativo é caracterizado pelo tempo que sua atividade leva a reduzir-se à metade; este tempo é denominado meia-vida.

Elementos podem ter, no entanto, isótopos radioativos e isótopos estáveis, ou seja, elementos quimicamente idênticos, mas que contêm um número diferente de nêutrons no seu núcleo. No seu estado natural, cada elemento é uma mistura de isótopos não radioativos e de um ou mais isótopos radioativos em pequeníssimas quantidades. No nosso próprio corpo, esses elementos estão presentes, o que significa que somos todos um pouco radioativos.

Os quatro tipos de radiação emitida quando ocorre uma transmutação de elementos são (Tauhata *et al.*, 2005):

- partículas carregadas - elétrons rápidos (partícula beta, outros elétrons);
- partículas carregadas pesadas (partículas alfa, prótons, produtos de fissão ou de qualquer reação nuclear);
- radiação sem carga - radiação eletromagnética (raios gama);
- nêutrons (rápidos e lentos).

Das várias formas de decaimento radioativo expostas, as de particular interesse na datação são a emissão de partículas alfa e beta e a captura eletrônica (esta com consequente emissão de radiação eletromagnética, os raios gama).

As radiações, ao interagirem com um material, podem provocar excitação atômica ou molecular, ionização ou ativação do núcleo. A excitação atômica ou molecular é uma interação onde elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente sob a forma de luz ou raios X característicos. A ionização é uma interação onde elétrons são removidos dos orbitais pelas radiações, resultando em elétrons

livres, íons positivos ou radicais livres quando ocorrem quebra de ligações químicas. Na ativação do núcleo, a interação de radiações (com energia superior à energia de ligação dos nucleons) com um material pode provocar reações nucleares, resultando num núcleo residual e na emissão de radiação. (Tauhata *et al.*, 2005)

A radiação ionizante é aquela que provoca ionização. A partir de 4eV é possível ionizar-se um átomo.

A partícula alfa é composta por dois nêutrons e dois prótons (átomo de He). São fortemente ionizantes mas de muito baixa penetração (no ar, cerca de  $10^{-2}$  m; em sólidos,  $10^{-5}$  m). Uma folha de papel é suficiente para impedir a passagem das partículas (Tauhata *et al.*, 2005).

A partícula beta é um elétron emitido pelo núcleo. São pouco ionizantes, mas muito penetrantes (no ar, 3,9 m; na água, 4,38 m; em sólidos, 10mm). Uma folha de alguns mm de alumínio é suficiente para impedir a passagem das partículas (Tauhata *et al.*, 2005).

A captura eletrônica é um processo no qual o núcleo captura um elétron, diminuindo seu número atômico em uma unidade e tornando-se energeticamente excitado. Para alcançar novamente o estado fundamental, emite essa energia na forma de radiação eletromagnética (raios gama).

Os raios gama são uma radiação de baixa ionização, mas altamente penetrantes. Consistem de “partículas” discretas ou quanta, denominadas fótons. Diferentemente das outras partículas, sua atenuação na matéria é dada por uma exponencial. Sua penetração é dada por um valor médio que depende de sua energia e do número atômico do material (Tauhata *et al.*, 2005).

## 2.2 A radioatividade nas rochas

Muitos elementos radioativos são encontrados na natureza, em sólidos, líquidos ou gases, mas apenas três são sensíveis a medidas aéreas e terrestres: potássio, urânio e tório.

O mais abundante isótopo radioativo do potássio é o  $^{40}\text{K}$ , que representa 0,012% do potássio natural. Embora seja uma fonte muito mais fraca que U e Th, é mais abundante na natureza. A meia-vida do  $^{40}\text{K}$  é de  $1,25 \cdot 10^9$  anos. (Brückmann e Fries, 2002).

Os dois isótopos mais abundantes do urânio são os  $^{235}\text{U}$  e, cujos decaimentos das séries terminam no  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}$ , respectivamente. A meia-vida do  $^{235}\text{U}$  é  $7,13 \cdot 10^8$  anos e do  $^{238}\text{U}$  é  $4,47 \cdot 10^9$  anos. O  $^{235}\text{U}$  corresponde a apenas 0,72% do urânio que ocorre naturalmente, enquanto aproximadamente 99,3% são de  $^{238}\text{U}$  (Tauhata e Almeida, 1984).

O tório ocorre na sua forma mais abundante como o radioisótopo  $^{232}\text{Th}$ , que tem meia-vida de  $14,05 \cdot 10^9$  anos e cuja série termina no  $^{208}\text{Pb}$ .

A radiação emitida por esses elementos pode ser alfa ou beta, que têm um poder de penetração de poucos milímetros nas rochas, ou gama, que penetra em média uma distância de cerca de dezenas de cm. As radiações alfa e beta, devido à penetração extremamente limitada no ambiente terrestre, são geralmente empregadas para a análise de amostras em laboratório, sob condições especiais e sujeitas a elaborados tratamentos físicos e químicos de preparação. Assim, ao considerarmos as fontes radioativas em rochas, em geral tratamos especificamente da radiação gama (Aitken, 1985).

As fontes naturais de radiação gama podem ser divididas em três grupos, de acordo com a origem (Tauhata e Almeida, 1984):

- $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ;
- isótopos radioativos que são produtos filho do decaimento dos isótopos do primeiro grupo, tendo meia-vida de fração de segundos até  $10^4 - 10^5$  anos;
- isótopos criados por causas externas, tais como a interação de raios cósmicos com a Terra e sua atmosfera.

Quantidades traço de materiais radioativos são encontradas em quase todas as rochas. Nas rochas magmáticas, a radioatividade aumenta com o teor de  $\text{SiO}_2$ . As rochas magmáticas extrusivas são, em geral, mais radioativas que suas equivalentes intrusivas. Rochas de composição mineralógica caracterizada essencialmente por quartzo e plagioclásio apresentam baixas concentrações de K, U e Th, enquanto que as rochas compostas por micas, feldspatos e minerais acessórios como o zircão, a apatita e a monazita, contêm teores maiores desses elementos. Há, assim, um crescimento dos teores de K, U e Th com o aumento do teor de sílica na rocha, com as rochas félsicas apresentando valores mais elevados do que as das rochas básicas. Assim, sienito, fonolito, granito e granodiorito possuem, em geral, alta radioatividade, enquanto as rochas básicas e ultrabásicas têm radioatividade extremamente baixa (Sapucaia *et al.*, 2005). A razão Th:U é aproximadamente 3,5 – 4,0 e a razão K:Th é aproximadamente constante e cerca de  $3 \cdot 10^3$ . A concentração de Th varia de 1 ppm em rochas básicas a 30 ppm em rochas graníticas.

As rochas sedimentares que apresentam as maiores concentrações de elementos radioativos são os folhelhos negros (folhelhos cinza-esverdeados têm, em média, 12 ppm de Th, enquanto os escuros podem chegar a 100 ppm), arenitos e fosforitas, enquanto as que apresentam as menores concentrações são o gipso e o calcário. Além disso, sedimentos do fundo do mar apresentam maiores teores que os dos continentes. A presença de elementos

radioativos em depósitos aluvionares e eluvionares é dependente das rochas originais. Em áreas úmidas, o U é lixiviado; em áreas áridas, pode haver enriquecimento de U (MÉTODOS RADIOMÉTRICOS, 2006).

Nas rochas metamórficas, a atividade corresponde basicamente à radioatividade do material primário. Os maiores teores estão em ortognaisses, enquanto os menores estão em anfibolitos, serpentinitos e granulitos. Há, aparentemente, um decréscimo no teor de Th com o aumento do grau de metamorfismo, embora existam exceções. As rochas sedimentares contendo minerais pesados que tenham sido metamorizadas podem apresentar bandas de alto teor de Th (MÉTODOS RADIOMÉTRICOS, 2006).

### **2.3 Os raios cósmicos**

A radiação cósmica é constituída por um fluxo primário de partículas de alta energia provenientes do espaço interestelar que incide continuamente sobre a Terra, e também por radiações secundárias originadas a partir das interações das partículas primárias com a atmosfera. A radiação cósmica primária é constituída por partículas com energias extremamente altas, como prótons (87%), partículas alfa (11%), cerca de 1% de núcleos com número atômico entre 4 e 26 e cerca de 1% de elétrons com energia muito elevada. Uma larga percentagem da radiação vem de fora do nosso sistema solar. Alguma radiação cósmica primária provém do sol, produzida durante erupções solares. A radiação cósmica primária predomina na estratosfera a uma altitude acima dos 25 km (Merril, E., 1987 *apud* Oliveira, 2006). Pouca radiação cósmica primária atinge a superfície da Terra, uma vez que a maior parte dela interage com a atmosfera e é desviada pelo campo magnético terrestre. Quando interage, produz a radiação cósmica secundária. Estas reações produzem outras

radiações de menor energia, na forma de raios gama (fótons), elétrons, nêutrons e múons, que atingem a superfície terrestre, e radionuclídeos cosmogênicos. Em termos de contribuição à exposição do ser humano, os mais importantes são o  $^3\text{H}$ , o  $^{14}\text{C}$  e o  $^7\text{Be}$  (Tauhata *et al.*, 2005).

A dose anual de radiação cósmica a que estamos sujeitos depende da altitude e da latitude a que nos encontramos. Os raios cósmicos, ao atravessarem a atmosfera, chocam-se com ela e perdem energia. Assim, quanto maior a altitude, maior a quantidade de radiação a que estamos sujeitos, uma vez que a camada de ar que atua como proteção é menos espessa. Por exemplo, viajar de avião contribui para o aumento da dose de radiação que uma pessoa recebe (Oliveira, 2006).

A radiação cósmica decresce à medida que nos deslocamos do Pólo para o Equador devido ao efeito do campo geomagnético da Terra sobre os raios cósmicos primários (Tauhata *et al.*, 2005).

Além do fluxo de radiação dos radionuclídeos do sedimento, os grãos recebem uma dose adicional de radiação cósmica. O fluxo de radiação cósmica diminui com a profundidade abaixo da superfície porque é atenuada dentro do sedimento (Prescott e Hutton, 1994).

## **2.4 Medindo a radioatividade**

Diferentes nuclídeos radioativos possuem diferentes taxas de desintegração. Esta taxa chama-se *atividade*, que representa o número de desintegrações nucleares sofridas por um nuclídeo na unidade de tempo. Quando o nuclídeo apresenta uma desintegração por segundo, diz-se que sua atividade é de 1 Becquerel (Bq). Outra unidade importante é a da

energia absorvida por certo material quando a radiação ionizante o atinge. Quando a energia de 1 Joule (J) é absorvida por um quilograma (kg) de material, diz-se que a dose absorvida é de um Gray (Gy). Há outras unidades para expressar os mesmos efeitos, que ainda são muito usadas. O Curie (Ci) é uma unidade para a atividade. Um Ci é igual a  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq (1Ci foi originalmente definido como a atividade de 1g de rádio); o “rad”, assim como o Gray, é usado para expressar a dose absorvida; a relação entre essas unidades é  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$  (Tauhata *et al.*, 2005).

A radioatividade pode ser medida por uma variedade de materiais gasosos, sólidos ou líquidos. Gases são ionizados quando expostos à radiação; cristais semicondutores liberam elétrons; outros materiais são suscetíveis a danos causados por radiação.

Quando um raio gama interage com certas substâncias denominadas cristais cintiladores, uma pequena cintilação (fótons visíveis) é produzida. O processo de transformação de raios em fótons visíveis constitui o princípio de operação dos detectores de cintilação.

A espectrometria gama é a técnica mais empregada na localização e caracterização de anomalias radioativas ou mesmo para o mapeamento de unidades geológicas por serem muito mais penetrantes, podendo até mesmo ser detectadas a algumas centenas de metros de altura na atmosfera (Aitken, 1985).

Um gamaespectrômetro pode ser transportado utilizando-se veículos ou mesmo transportando os equipamentos manualmente. Os espectrômetros gama são também extensamente utilizados em laboratório, possibilitando a construção de sistemas de medidas bem mais sensíveis. Em contrapartida, neste caso só é possível a análise de amostras

coletadas previamente no local de estudo, que podem não representar adequadamente toda a formação geológica que se está investigando (Aitken, 1985).

## 2.5 Modelo atômico

Segundo o modelo atômico atual, a energia de um elétron é a soma de sua energia cinética com a sua energia potencial eletrostática, que resulta numa energia cuja distribuição é discreta e pode ser esquematizada conforme a Figura 2.1 a seguir, de acordo com os orbitais.

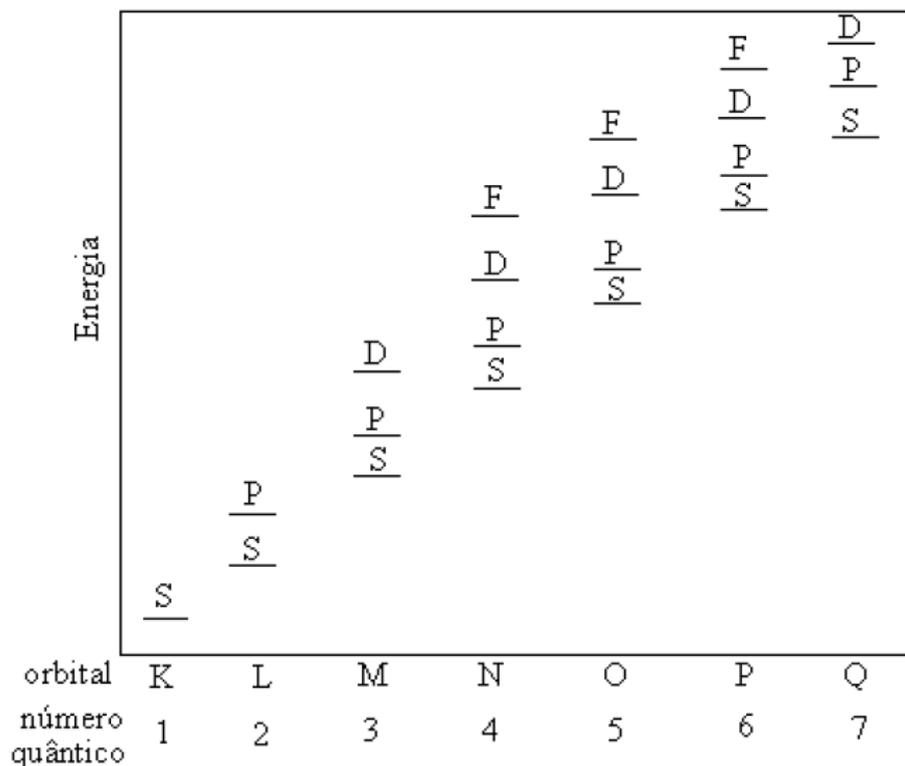


Figura 2.1 - Energia dos elétrons nos orbitais atômicos (baseado em Tipler, 2001).

É possível caracterizar as transições eletrônicas em dois tipos. O primeiro envolve transições no espectro visível e o segundo, no invisível. Isso está diretamente ligado à

energia associada à transição. Na Figura 2.2 a seguir, cada nível está associado a um valor de energia. Dependendo da diferença de energia entre dois níveis, essa transição pode ocorrer ou não (existem transições permitidas e outras proibidas pela Quântica). Caso ela se realize, a emissão de radiação se dará numa frequência que se relaciona à diferença de energia entre os níveis por meio da relação  $E=h\nu$ , onde  $E$  é a energia,  $\nu$  a frequência e  $h$  uma constante (constante de Planck).

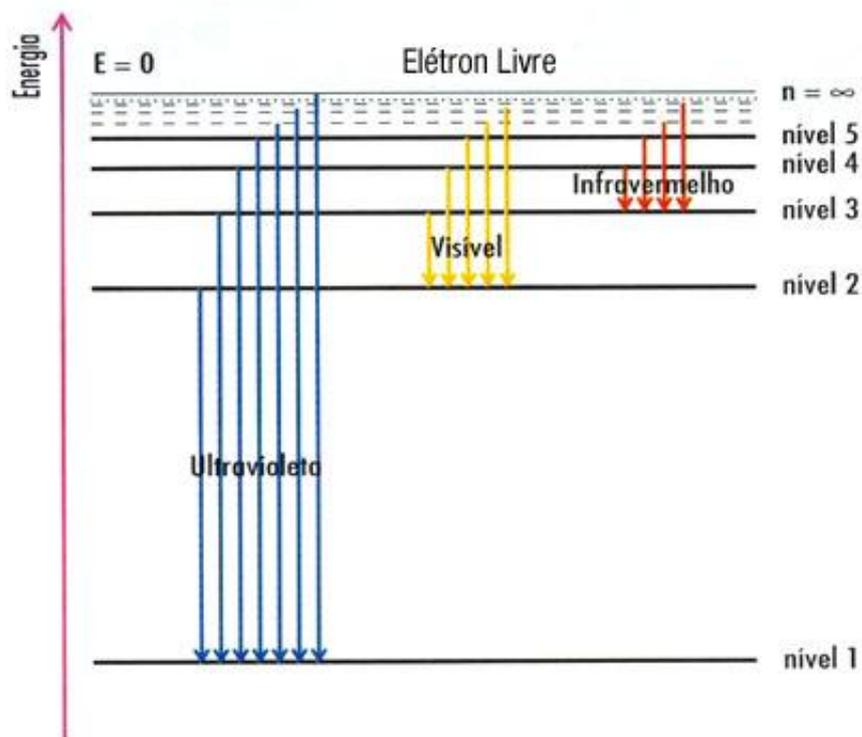


Figura 2.2 - Transições entre níveis de energia do átomo de hidrogênio e os diferentes espectros de emissão (fonte: [http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Orbitais/Orbitais\\_nmeros\\_quanticos.html](http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Orbitais/Orbitais_nmeros_quanticos.html)).

## 2.6 O conceito de bandas de energia

O modelo exposto na seção anterior foi estudado para um átomo isolado, sofrendo, portanto, a ação somente do seu núcleo. No entanto, quando um átomo passa a participar da formação de um cristal, onde a distância entre os átomos é relativamente pequena, os elétrons passam a ter interações com os átomos vizinhos, seja com as nuvens eletrônicas (forças de repulsão entre cargas de mesmo sinal), ou com os núcleos (forças de atração), modificando a configuração dos níveis de energia acima.

Os níveis de energia podem diminuir ou aumentar, de acordo com o tipo de estrutura cristalina formada e do tipo de ligação química. O tipo de cristal formado interfere porque uma estrutura mais compacta tende a aumentar as forças de atração dos núcleos, o que faz diminuir o raio do orbital e, por consequência, a energia do elétron que se mantém nessa órbita. Assim sendo, os elétrons, quando situados num cristal sólido com  $n$  átomos, onde há diversas interações entre elétrons e núcleos de vários átomos vizinhos, podem apresentar pequenas variações nos orbitais permitidos e, portanto, variações nas energias permitidas. Ou seja, os níveis de energia ficam divididos em alguns subníveis. A Figura 2.3 mostra o que acontece aos níveis de energia eletrônica à medida que se forma uma rede cristalina.

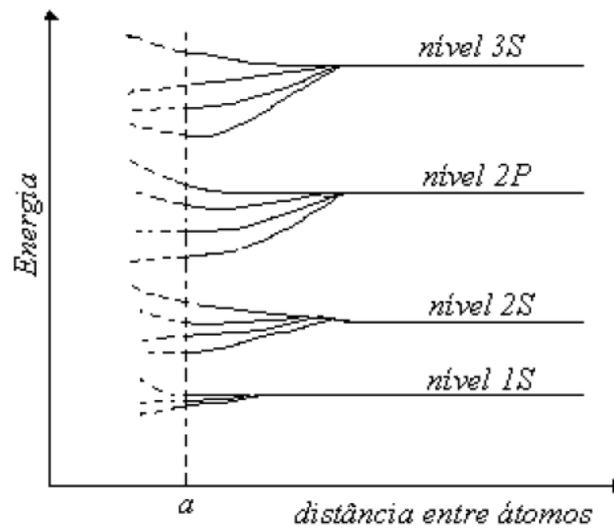


Figura 2.3 - Nova distribuição de níveis de energia para um cristal (baseado em Tauhata e Almeida, 1984 e Tipler, 2001).

É importante notar que o eixo horizontal do gráfico representa a distância entre átomos e o valor  $a$  representa a distância de equilíbrio do cristal. Quando essa distância é grande (ou seja, o átomo está isolado, sofrendo interações somente do seu núcleo) os níveis de energia são bem definidos. À medida que os átomos se aproximam para formar o cristal, esses níveis se dividem em vários subníveis; com isso, os elétrons não possuem mais níveis discretos de energia, mas pequenas regiões em torno desses níveis, que são as chamadas *bandas de energia*. A Figura 2.4 ilustra o aparecimento dessas bandas:

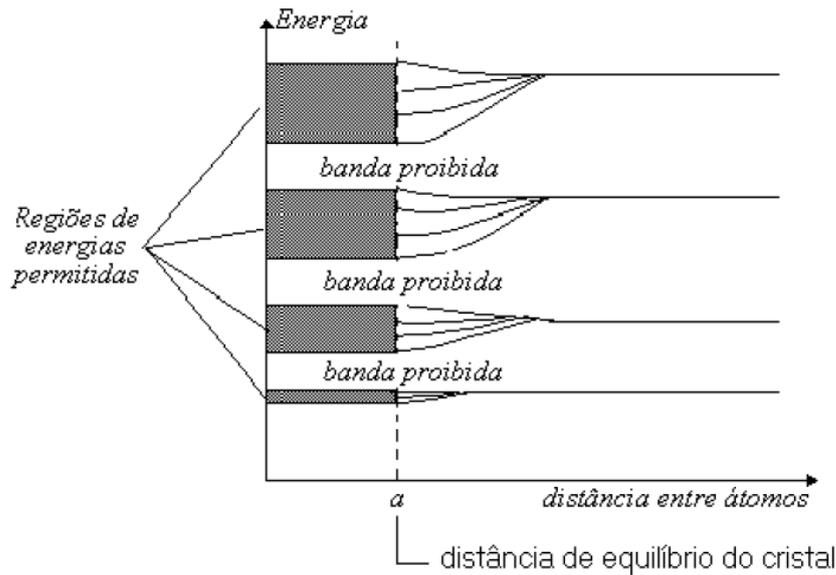


Figura 2.4 - Bandas de energia em um cristal (baseado em Tauhata, 1984 e Tipler, 2001).

O comportamento elétrico de um dado material, por exemplo, depende diretamente da configuração das bandas de energia e do tamanho das *bandas proibidas*, que representam a energia necessária para que um elétron efetue uma transição de uma banda para outra. Particularmente, este comportamento é determinado pelas bandas de *valência* e de *condução*. A banda de valência é a última banda de energia ocupada por elétrons. Leva este nome pois é este orbital atômico que define a valência do elemento químico. A banda de condução é o próximo nível energético permitido, acima da banda de valência. Nesta região os elétrons são considerados *elétrons livres*, podendo, portanto, se movimentar no material formando a corrente elétrica.

## 2.7 Defeitos em estruturas cristalinas

Para uma dada estrutura cristalina, há uma determinada configuração de bandas permitidas e proibidas. Deve-se destacar que, como as bandas são formadas a partir da

expansão de níveis eletrônicos diferentes, a forma e o número de estados permitidos não será necessariamente igual para uma banda superior e uma banda inferior, como pode ser visualizado na Figura 2.5.

No entanto, esses níveis de energia podem ser deslocados caso haja na estrutura cristalina alguma impureza ou defeito na cristalização (algum átomo que deixou de se ligar a outro, por exemplo). A presença de uma impureza faz com que as interações entre os átomos sejam diferentes localmente, possibilitando um novo valor de energia para o elétron, ou seja, que ele ocupe um novo orbital. Esses níveis de energia são localizados e se encontram na banda proibida (Figura 2.6).

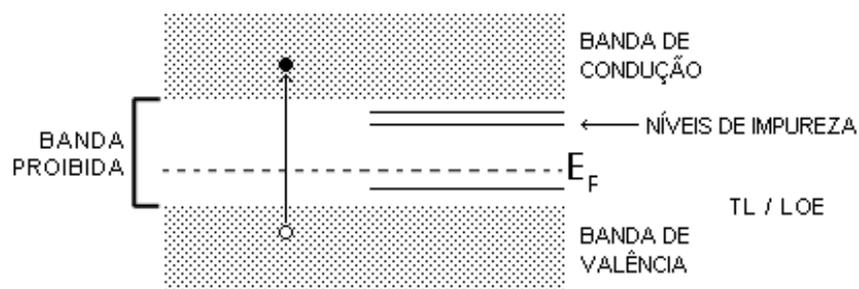


Figura 2.5 - Níveis de energia devido a impurezas em um cristal (baseado em Souza, 1990).

O nível  $E_F$  é chamado de Energia de Fermi, cuja discussão foge aos interesses deste trabalho. Aqui é utilizado apenas para um maior formalismo e referência, já que os “buracos” situam-se abaixo do nível  $E_F$ .

Dependendo das características particulares a cada rede e impurezas eventualmente presentes, várias são as possibilidades de se formarem defeitos na estrutura do cristal. Como exemplo, pode-se tomar o caso do quartzo: um dos principais defeitos que o quartzo pode apresentar é devido à vaga deixada pela saída de um átomo de oxigênio. Assim, resta um elétron desemparelhado em um dos átomos de Si. Isso provoca uma distorção local na rede cristalina. Defeitos também podem surgir devido a ligações interrompidas entre átomos de

Si e O. Outro tipo de defeito que se pode encontrar é devido à presença de impurezas. Por exemplo, o alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ), em substituição ao Si, resulta numa configuração local de interações entre os átomos que faz com que surja um novo orbital possível para os portadores de carga (Souza, 1990).

## 2.8 Armadilhas

Descontinuidades na estrutura cristalina, devido a defeitos de cristalização ou à presença de impurezas, constituem poços de potencial elétrico que podem reter portadores de carga. Como foi discutido, as impurezas promovem níveis de energia dentro da zona de energia proibida de um semiconductor. Esses níveis de energia são poços de potencial e, quando os elétrons não têm energia para sair deles, esses poços são chamados de “armadilhas” (Aitken, 1985; Souza, 1990).

Quando os elétrons são excitados à banda de condução, estes podem voltar ao seu estado fundamental, recombina-se com um buraco existente na rede ou, já não tendo energia suficiente para vencer a atração coulombiana de alguns defeitos cristalinos, ficam armadilhados por poços de potencial. Os buracos (equivalentes a cargas positivas) também podem ser armadilhados em poços de potencial negativo.

## 2.9 Fuga das armadilhas

Quando um elétron da banda de valência é transferido para a banda de condução, deixa naquela uma lacuna ou “buraco”, ou seja, um nível incompleto (Figura 2.6).

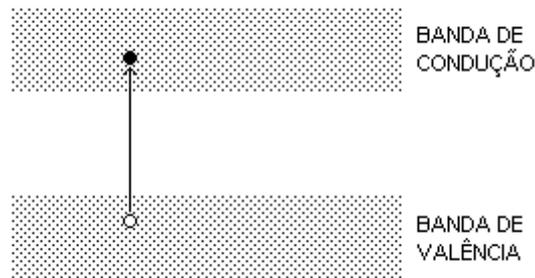


Figura 2.6 - Elétron excitado vai para banda de condução e deixa buraco na banda de valência (baseado em Souza, 1990).

Se a estrutura cristalina do sólido em questão não contém defeitos nem impurezas, o elétron volta à banda de valência com a emissão de radiação eletromagnética, geralmente na região visível do espectro ou do infravermelho (Figura 2.7). Isto constitui um tipo de luminescência chamada de fluorescência.

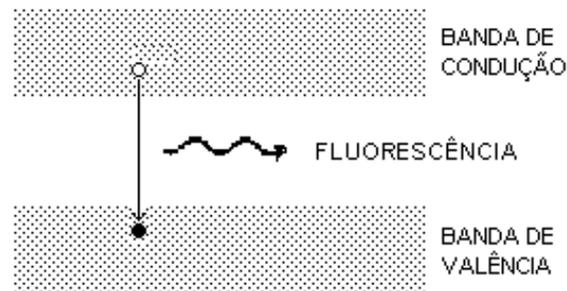
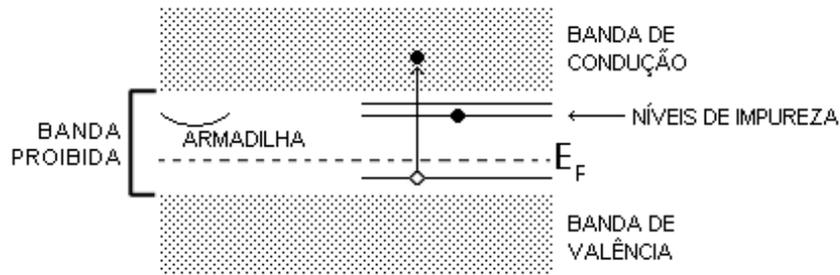


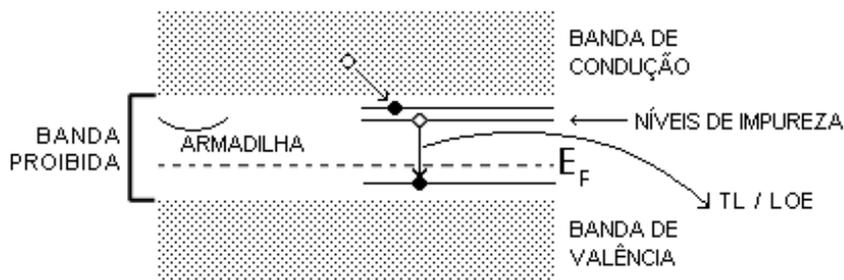
Figura 2.7 - Elétron cai para banda de valência emitindo radiação (baseado em Souza, 1990).

Se a rede contiver defeitos que originem níveis de energia entre as bandas de valência e de condução, um elétron de um nível de energia de impureza inferior pode preencher a lacuna na banda de valência e um elétron da banda de condução pode preencher um dos níveis de energia de impureza superiores, com a emissão, nos dois casos,

de radiação eletromagnética com energia muito baixa para ficar na região visível do espectro (Figuras 2.8).



a)



b)

Figura 2.8 – a) Um elétron excitado vai para a banda de condução e b) um elétron de um nível de impureza pode preencher sua lacuna. O elétron da banda de condução pode, por sua vez, preencher outro nível de impureza (baseado em Souza, 1990).

Um elétron pode passar da banda de condução direto para o nível de impureza inferior ou de um nível de energia de impureza superior para um nível de energia de impureza inferior que esteja vazio (Figura 2.9), com a emissão de radiação eletromagnética com energia que a situe na região visível do espectro. É isto que constitui a luminescência de nosso interesse (LOE), que é um caso de fosforescência.

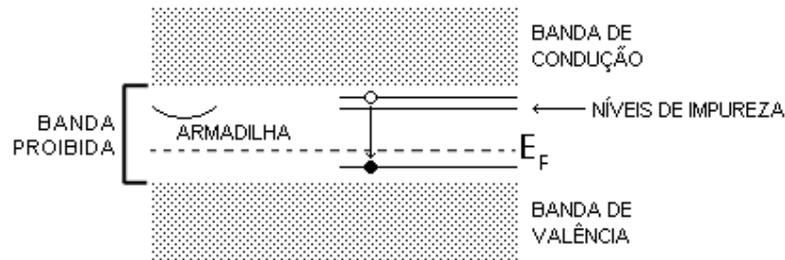


Figura 2.9 - Elétron fazendo transição entre dois níveis de impureza (baseado em Souza, 1990).

A ocorrência ou não da luminescência vai depender da diferença de energia entre o nível em que o elétron se encontra e o nível para o qual ele vai após a transição. A energia está associada à frequência emitida através da relação  $E=h\nu$ . Se a diferença de energia entre os dois níveis for alta demais, a frequência também será muito alta e não estará na região visível do espectro. Se a frequência for baixa demais, também não será visível. Se essa energia estiver entre valores que correspondem a frequências do vermelho ao violeta (espectro visível), então ocorre luminescência visível.

Em certos casos, em vez de passar pelo processo ilustrado na figura anterior, o elétron da banda de condução pode passar para um nível de energia que é armadilha (Figura 2.10), do qual ele não pode passar ao nível de energia de impureza mais baixo por uma transição radioativa sem violar um ou outro princípio de conservação.

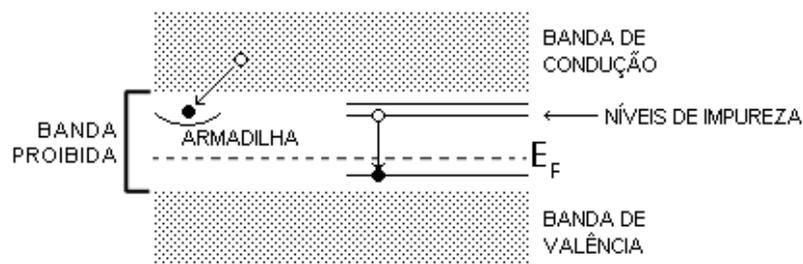


Figura 2.10 - Elétron fazendo transição para um nível de energia (armadilha) a partir do qual as transições para níveis de energia mais baixos são proibidas pela Quântica (baseado em Souza, 1990).

O elétron se encontra, então, num estado metaestável, e permanece nesse estado até que algum processo o faça regressar à banda de condução. Então, ele pode passar para a banda de valência pelas etapas descritas acima.

A probabilidade de escape dos portadores de carga é dada pela equação de Arrhenius:

$$p = s e^{(-E/kT)},$$

onde  $s$  é a frequência de do elétron aprisionado na armadilha (número de vezes por segundo que um portador de carga armadilhado interage com os a rede multiplicado pela probabilidade de transição);  $k$  é a constante de Boltzmann;  $T$  é a temperatura da rede em K;  $E$  é a energia de ativação (barreira de potencial que os portadores de carga precisam vencer para escapar).

Depois de ter escapado da armadilha, um dado portador de carga passa novamente a percorrer a rede cristalina, ficando sujeito aos diversos potenciais. Assim, três situações distintas podem ocorrer:

- 1) reaprisionamento por outra armadilha;
- 2) recombinação com um buraco na banda proibida em um nível de energia tal que a diferença de potencial entre a banda de condução e este seja muito baixa ou alta, fazendo com que a energia liberada não esteja na região do visível;
- 3) recombinação com um buraco na banda proibida e conseqüente emissão de luz (TL/LOE).

A probabilidade de que cada uma dessas três situações ocorra pode ser obtida através de cálculos que envolvem a seção de choque dos elétrons, número de armadilhas disponíveis e concentração de elétrons e buracos armadilhados.

## **2.10 Modelo para a luminescência**

A liberação do elétron da armadilha exige uma certa energia chamada “profundidade da armadilha”. Vários são os mecanismos que podem fornecer energia para que portadores de carga armadilhados escapem dos poços de potenciais. A termoluminescência (TL) trata do caso em que a energia fornecida para retirar o elétron da armadilha é em forma de calor. Na luminescência opticamente estimulada (OSL), a energia de excitação é em forma de radiação. Cada uma delas fornece energias para tipos de armadilhas diferentes.

Embora não exista ainda uma teoria que explique completamente a luminescência, há um modelo simples. Pode-se resumir o processo da seguinte forma: de um modo geral, quando os elétrons de um sólido são excitados por absorção de radiação eletromagnética ou por outro processo qualquer, eles não permanecem por muito tempo nos respectivos níveis mais altos, decaindo para um nível de energia mais baixo. Se ele decai para um nível de energia que existe na banda proibida devido a uma impureza ou defeito da estrutura cristalina, pode ser que ele não consiga decair para outro nível mais baixo, por ser uma transição proibida (regras de seleção da Física Quântica). Se a transição desse nível para um inferior não for permitida, ele permanece naquele nível de energia (armadilha) até que receba energia para ir para a banda de condução e decair novamente. Ao decair, ele pode emitir radiação visível, pode ficar novamente armadilhado ou pode emitir radiação fora do espectro visível. A probabilidade de que cada situação dessa ocorra pode ser calculada.

Se o processo de decaimento mais provável envolve a emissão de radiação eletromagnética na região visível do espectro, dizemos que existe luminescência.

## **2.11 A datação por luminescência**

### *2.11.1 Evolução da técnica de datação por luminescência*

A datação por termoluminescência foi inicialmente desenvolvida para determinar a idade de cerâmicas (Grögler et al., 1958 *apud* Aitken, 1985). Na cerâmica, o sinal luminescente dos quartzos e feldspatos incorporados em sua estrutura é zerado através do aquecimento utilizado para fazê-la.

Aplicações geológicas da datação por termoluminescência começaram com tentativas de datar erupções vulcânicas através de medições em cinzas, vidro e lava (Aitken *et al.*, 1968; Miallier *et al.*, 1983 *apud* Wallinga *et al.*, 2007). A aplicação do método a sedimentos que não foram aquecidos surgiu a partir da descoberta de que o sinal termoluminescente dos minerais era zerado após exposição ao sol (Wintle e Huntley, 1979; 1980 *apud* Wallinga *et al.*, 2007). Devido ao fato de ser necessária uma longa exposição à luz solar para que o sinal termoluminescente (TL) seja zerado, as aplicações da termoluminescência à datação de sedimentos eram restritas aos depósitos eólicos, como loess.

Nos meados da década de 80, Huntley *et al.* (1985) descobriram a possibilidade de usar o sinal de luminescência opticamente estimulada para datar sedimentos. O sinal de luminescência opticamente estimulada (LOE) é mais apropriado para datação de sedimentos porque é mais sensível à luz que o sinal TL. Assim, a LOE é o método utilizado atualmente para determinar a idade de soterramento de sedimentos.

### 2.11.2 Fundamentos

O relógio usado pela datação por luminescência é a quantidade de elétrons armadilhados na estrutura cristalina dos minerais. Como visto, ao serem liberados esses elétrons (através de calor – aquecimento a 450°C - ou estímulo ótico - radiação de um comprimento de onda particular) ocorre a emissão de um sinal luminoso chamado luminescência. A intensidade do sinal é uma medida da quantidade de carga armadilhada, que é, por sua vez, uma medida da radiação ionizante recebida pelo cristal desde sua última exposição à luz. Para que seja possível associar a luminescência a uma idade, é preciso saber qual é a quantidade de radiação recebida em um determinado período de tempo – um ano, por exemplo, que é a unidade básica de referência quando tratamos de idade. É necessário, portanto, saber qual é a dose anual a que as rochas estão expostas para que a datação possa ser realizada (Aitken, 1985).

Qualquer material localizado num campo de radiação ionizante recebe uma dose de radiação. Existe certo nível de radiação ionizante presente na natureza, associado aos teores de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e seus isótopos-filho,  $^{87}\text{Rb}$  e dos raios cósmicos. A radiação vem do decaimento radioativo de radionuclídeos que estão presentes no sedimento, ou dentro dos minerais usados para datação e/ou em material adjacente. As radiações relevantes para a datação são as partículas alfa, beta, os raios gama e a radiação cósmica.

Qualquer radiação que não provenha de material geológico é assumida como *background* e, assim, é necessário removê-la dos dados observados. Existem três fontes de radiação *background* (Tauhata *et al.*, 2005):

- radônio na atmosfera:  $^{222}\text{Rn}$  e seus produtos filho,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Pb}$ , são os maiores contribuintes. Sendo gás, o radônio possui muita mobilidade e pode escapar para a atmosfera, provindo do solo e fissuras rochosas, em resposta a mudanças de temperatura e pressão;
- *background* cósmico: radiação primária proveniente do sol e de fora do sistema solar, reage com átomos e moléculas na atmosfera superior, gerando uma complexa radiação secundária;
- *fallout* de explosões atômicas e acidentes nucleares: o principal elemento é o cézio, que exibe um fotopico simples de 0,662 MeV e tem meia-vida de aproximadamente 30 anos.

A interação entre a radiação e os átomos dos minerais resulta na ionização desses átomos. Os elétrons livres decorrentes da ionização acabam presos nas armadilhas. O número de elétrons aprisionados aumenta ao longo do tempo geológico e é uma medida direta da energia depositada no mineral pela radiação ionizante. A exposição ao calor ou à luz do sol produz luminescência, através da liberação dos elétrons das armadilhas, que acabam se recombinando com cargas positivas. O sinal luminescente é uma medida direta do número de cargas aprisionadas, e é proporcional ao tempo decorrido desde que os minerais foram expostos pela última vez ao sol. A intensidade do dano causado pela radiação na rede cristalina é uma medida da Dose Equivalente que o mineral tem recebido desde sua última exposição à luz do sol ou a uma temperatura de 450°C (Aitken, 1985).

O mineral é usado, então, como um dosímetro natural. Tendo-se obtido a dose acumulada (ou dose equivalente -  $D_E$ ) através da medida da TL ou OSL e a dose anual ( $D_R$ ) através da medida da radiação do K, U, Th, Rb e raios cósmicos por unidade de tempo (Gy/ka), pode-se então obter a idade (Aitken, 1985):

$$\text{Idade (ka)} = D_E \text{ (Gy)} / D_R \text{ (Gy/ka)}$$

Isto representa o tempo decorrido desde o último “zeramento”.

Algumas premissas devem ser assumidas para se realizar a datação (retirado de Aitken, 1985):

- 1) os materiais recebem doses de radiação a taxas uniformes e bem definidas;
- 2) o teor de umidade da amostra e de seu entorno pode ser determinada;
- 3) a profundidade, a altitude e a intensidade dos raios cósmicos no local de coleta podem ser calculados ou já estão determinados;
- 4) o sinal da amostra deve ter sido devidamente zerado (termicamente ou opticamente) durante o evento que se pretende datar.
- 5) a TL ou OSL deve ter permanecido estável durante o período de tempo em questão. Qualquer anomalia na emissão da TL ou OSL deve ser medida e compensada nos cálculos da idade.
- 6) o crescimento do sinal TL e OSL deve se comportar como uma função conhecida.

### *2.11.3 Obtenção da dose anual*

A dose anual é determinada pela medida da radioatividade do próprio material e da radioatividade de uma amostra de seu entorno. O teor de umidade da amostra também deve ser determinado, já que a água atenua os efeitos da radiação ionizante (Aitken, 1985).

Para a maioria das amostras, a luminescência é produzida em proporções aproximadamente iguais por radiações de potássio, tório e urânio; a radiação devido ao rubídio e a radiação cósmica contribuem apenas com uma pequena porcentagem da luminescência total. A luminescência é proporcional à quantidade de ionização que é, por sua vez, proporcional à energia absorvida da radiação (Tauhata e Almeida, 1984).

Embora o quartzo apresente pouca radioatividade, há outros minerais, como zircão, apatita e feldspato potássico, para os quais a radioatividade é alta. Em grãos grandes destes minerais, a luminescência é devida, predominantemente, à dose interna do próprio grão (Aitken, 1985).

A dose anual depende da concentração dos radioisótopos que ocorrem naturalmente. Estas concentrações podem ser determinadas por uma grande variedade de métodos, incluindo dosímetros termoluminescentes e espectrometria de raios gama de alta resolução. A última é a técnica preferida, por permitir determinar a concentração de radionuclídeos individuais das cadeias de decaimento U e Th. Assim, a dose anual é medida em campo com espectrometria gama (K, U, Th e raios cósmicos) ou em laboratório com espectrometria gama em cristais de NaI (K, U e Th).

A quantidade de elétrons armadilhados é proporcional à energia absorvida durante o tempo em que a amostra ficou soterrada (Aitken, 1985).

É preferível medir a dose de radiação gama no local, pois se houver qualquer dúvida sobre a uniformidade da radioatividade dentro da esfera de influência de 30cm ao redor da amostra, as leituras mostrarão tais variações, mesmo que um espectrômetro de alta resolução de laboratório esteja disponível para calcular depois da coleta. O local de origem da amostra deve ser contado por uma hora ou mais, para fornecer alta resolução estimativa da umidade presente (Aitken, 1985).

Comparada com silicatos, a água tem um coeficiente de absorção de raios alfa, beta e gama significativamente maior; portanto, ela mais ou menos atenua o  $D_R$  e pode alterar a radiação que uma amostra pode ter absorvido (Aitken, 1985).

O componente final de valores de raios cósmicos é adicionado aos cálculos da dose anual. Geralmente esse valor é tabelado para latitudes ao nível do mar, mas deve ser corrigido para amostras elevadas acima do nível do mar e em profundidades em sedimentos.

Finalmente, o  $D_R$  total da amostra é computado usando  $D_R$  do raio cósmico,  $D_R$  de Rb,  $D_R$  de U,  $D_R$  de Th e  $D_R$  de K.

#### 2.11.4 Obtenção da dose equivalente

Nos protocolos LOE mais antigos, eram necessárias muitas alíquotas para obter uma única estimativa de dose equivalente. Este método por "alíquotas múltiplas" supõe que a dose equivalente em cada alíquota é idêntico - uma suposição nem sempre válida.

Duller (1991) propôs um protocolo no qual as medidas necessárias para a determinação da dose equivalente são feitas em uma única alíquota. Assim, utilizando diversas alíquotas, onde cada uma tem um valor de dose equivalente, é possível investigar a dispersão dos valores e realizar uma análise estatística para obter a idade. Murray e Wintle (2000) desenvolveram um protocolo de alíquota única chamado de SAR. O protocolo SAR agora é largamente utilizado em quartzo, e procedimentos similares foram desenvolvidos para amostras de feldspato (Wallinga *et al.*, 2000).

Métodos de alíquota única são essenciais para determinar a dose equivalente nos casos em que a exposição à luz antes do soterramento era limitada (como é o caso de sedimentos fluviais e coluviais). A exposição limitada à luz pode resultar em um zeramento incompleto do sinal luminescente (discussão que será feita mais adiante), resultando em um sinal luminescente residual, ou seja, que se acumula com a nova dose. Como consequência, a dose equivalente determinada na amostra será superestimada.

Muitas abordagens foram feitas para evitar ou reduzir esse problema do sinal residual. Primeiro, é preferível o sinal LOE ao sinal TL, pois o sinal LOE é zerado mais rapidamente. Segundo, é possível tentar selecionar os grãos corretos. Quando a exposição à luz é limitada, é possível que o sinal LOE de diferentes grãos sejam zerados em graus diferentes (Duller, 1994; Murray e Olley, 1999). Se o sinal LOE de alguns grãos estiver completamente zerado, é possível, a princípio, datar o sedimento desde que apenas estes grãos sejam selecionados para determinação da dose equivalente. Métodos de alíquota única (Murray e Wintle, 2000, 2003) são essenciais para este propósito e equipamentos recentemente desenvolvidos (Bøtter-Jensen *et al.*, 2000) permitem até a medição de alíquotas contendo um único grão de quartzo ou feldspato.

#### *2.11.5 Minerais utilizados para datação por luminescência*

Minerais de quartzo e feldspato são geralmente os utilizados para datação por luminescência porque são mais abundantes em sedimentos do Quaternário.

O sinal LOE do quartzo é zerado rapidamente quando exposto à luz do dia e é estável durante o soterramento geológico (Wintle e Murray, 2006). O lado ruim do sinal LOE do quartzo é que ele se satura em doses relativamente baixas, o que geralmente elimina sua aplicabilidade para períodos maiores que 125ka atrás.

A datação ótica do feldspato é geralmente referida como datação por estimulação luminescente infravermelha (IRSL), pois é o comprimento de onda usado na estimulação (Wallinga *et al.*, 2007). A vantagem da datação utilizando feldspato é que o sinal IRSL se satura em taxas muito mais altas que o sinal LOE do quartzo. Portanto é possível, a princípio, usá-lo para datar depósitos mais antigos. No entanto, sabe-se que a idade do feldspato pode

subestimar a idade de soterramento por consequência do decaimento anômalo, que é o decaimento do sinal luminescente devido ao tunelamento quântico das cargas armadilhadas (Huntley, 2006). Recentemente, procedimentos para correção do decaimento anômalo foram sugeridos (Huntley & Lamothe, 2001; Lamothe *et al.*, 2003). Além da datação por frações de feldspato de tamanho de areia, o sinal IRSL também é usado para datar uma mistura de minerais de grãos finos (4-11  $\mu\text{m}$ ) indiferenciados. Como o quartzo é insensível à estimulação infravermelha, a datação IRSL de grãos finos é similar ao uso de minerais de feldspato.

Um terceiro mineral que pode ser usado para datação é o zircão. Graças às altas concentrações internas de U e Th, quase toda a radiação ionizante de grãos de zircão vêm de dentro do grão. Assim, a dose é independente do conteúdo de água. A desvantagem da datação do zircão é que o mineral ocorre em baixas concentrações; assim, amostras muito grandes são necessárias para obter material suficiente para datação, e os procedimentos para preparação de amostras são tediosos. Métodos para datação de zircão estão em desenvolvimento (Van Es *et al.*, 2002) e, até então, têm tido pouca aplicação.

#### 2.11.6 Datação de colúvios

A pequena distância de transporte dos sistemas coluviais é interessante para estudos geomorfológicos, mas por outro lado faz com que os sedimentos não sejam suficientemente expostos à luz do sol para serem zerados. Apesar disso, em vários casos sedimentos coluviais foram datados com sucesso usando-se sinais TL (Wintle e Catt, 1985; Forman *et al.*, 1988 *apud* Fuchs e Lang, 2009). Com a introdução da LOE e da LOE estimulada por infravermelho para datação de feldspatos, a datação de colúvios tornou-se mais popular.

Sob condições favoráveis, sinais LOE podem ser totalmente zerados em segundos de exposição à luz (Botter-Jensen *et al.*, 2003). O processo que leva à colúviação não irá sempre fornecer tais condições - processos como atenuação da luz do dia por nuvens e partículas suspensas em águas turvas, ou agregação dos grãos minerais durante o transporte dificultam o zeramento do sinal dos grãos. Assim, o zeramento completo do sinal LOE é exceção, ao invés de regra. Em consequência, a detecção e eliminação de zeramentos insuficientes é algo necessário para a datação de sedimentos por luminescência.

O zeramento completo em depósitos colúviais em geral é dificultado pelos seguintes fatores:

- 1) vários processos estão envolvidos no retrabalhamento de sedimentos. Os mais importantes são erosão do solo, movimento de massa e *creeping*. Nestes processos, que atuam de modo a mover o material encosta abaixo, o sedimento pode se mover como uma massa compacta e, assim, somente uma pequena fração de sedimentos é exposta à luz do sol (por exemplo, os sedimentos da porção externa).
- 2) uma grande variedade de materiais forma uma encosta, levando a uma significativa variedade de características dos sedimentos, como a distribuição de tamanhos dos grãos, composição mineral ou conteúdo orgânico. Assim, alguns sedimentos tendem a ser transportados como grãos minerais isolados, como areia pura, enquanto outros tendem a se agregar, como os sedimentos argilosos. Estes últimos, aliás, geralmente dificultam um zeramento suficiente do sinal luminescente, porque os grãos mais internos de um agregado são protegidos da exposição solar (Lang e Wagner, 1996). O mesmo pode ocorrer com revestimentos minerais, como os de ferro, manganês e

carbonatos, que podem dificultar a penetração da luz nos grãos minerais (Singhvi *et al.*, 1986; Quickert *et al.*, 2003);

- 3) a distância de viagem do sedimento tende a ser relativamente pequena. Isso diminui as chances de um zeramento eficiente, porque a duração da exposição à luz é pequena e eventos podem ocorrer durante condições não favoráveis de exposição à luz (por exemplo, transportes à noite).

Apesar das questões mencionadas, existem vários exemplos de datações de colúvios por luminescência realizadas com sucesso.

#### 2.11.7 – Datação de alúvios

O zeramento de sedimentos transportados por água é dificultado pela atenuação da luz através da coluna de água (Rittenour, 2008). Esse efeito é acentuado quanto maior for a concentração de sedimentos suspensos na água. A profundidade da coluna de água, a forma de transporte do sedimento (por suspensão, saltação ou arrasto) e a distância de transporte são variáveis importantes para o zeramento.

É comum também que sedimentos não zerados, derivados de erosão de depósitos mais antigos, caiam diretamente no sistema fluvial e isso pode contribuir para uma amplitude muito grande nos resultados. Eventos que envolvem alta energia, como tempestades, causam rápida erosão e transporte de sedimentos, limitando também a exposição à luz solar.

### 2.11.8 – Alternativas para problemas relacionados à datação de colúvios e alúvios

Os últimos anos têm sido de grandes avanços na detecção de zeramentos insuficientes. As técnicas disponíveis para detectá-los são baseadas na comparação de diferentes sinais luminescentes ou no grau de zeramento de diferentes grãos minerais. Estudos anteriores exploraram a sensibilidade menor à luz da TL em comparação com a LOE (Figura 2.12; Godfrey-Smith *et al.*, 1988 *apud* Fuchs e Lang, 2009). Wintle *et al.* (1993 *apud* Fuchs e Lang, 2009) compararam TL e IRSL das mesmas amostras coluviais e viram que as idades TL são cerca de 10 mil anos mais velhas que as IRSL. Entretanto, as idades IRSL também foram superestimadas, de modo que eles concluíram que esse método só deve ser aplicado a depósitos mais velhos, para os quais a idade residual é insignificante.

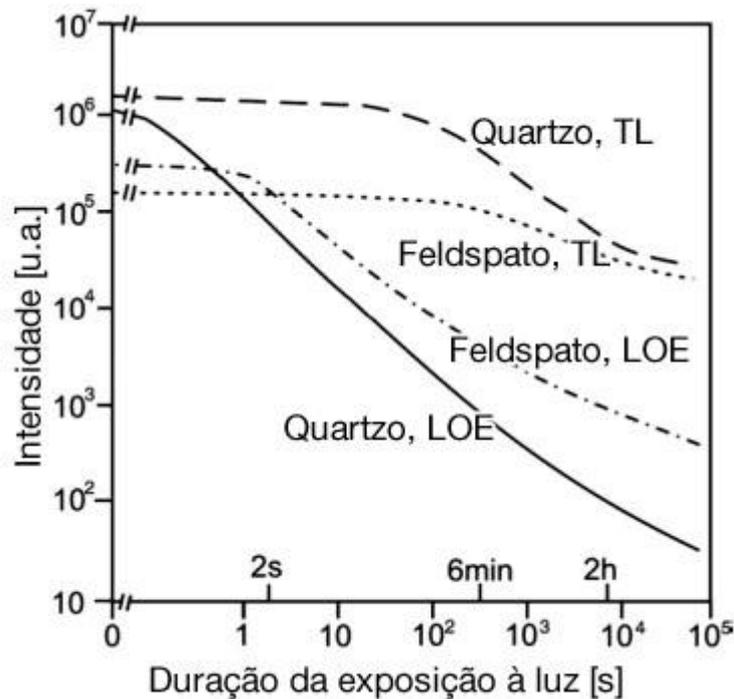


Figura 2.11 – Sinais LOE e TL de quartzo e feldspato como função do tempo em que permaneceram expostos à luz (adaptado de Botter-Jensen *et al.*, 2003).

Diferentes tamanhos de grãos também podem mostrar diferentes graus de zeramento. Na datação por luminescência, geralmente são usadas duas frações diferentes: grãos finos (4-11  $\mu\text{m}$ ) e grossos (90–200  $\mu\text{m}$ ). Para sedimentos aluviais, vários estudos têm mostrado que os grãos mais grossos parecem ser melhor zerados do que as frações finas (Olley *et al.*, 1998; Wallinga, 2002). Para sedimentos coluviais, não há estudos comparando grãos finos e grossos do mesmo mineral. Kadereit *et al.* (2006 *apud* Fuchs e Lang, 2009) compara resultados de grãos grossos de quartzo e grãos finos de feldspato extraídos de sedimentos coluviais, e os grãos finos fornecem idades LOE significativamente mais altas que os mais grossos. Isso pode ser causado também pelas diferentes propriedades de zeramento dos minerais, já que o grão de quartzo zera mais rápido que o de feldspato (ver Figura 2.12).

Várias técnicas foram desenvolvidas para obter uma dose equivalente confiável a partir de uma distribuição de valores  $D_e$  em uma amostra insuficientemente zerada. Todas essas técnicas são baseadas em análises estatísticas de variações do valor de  $D_e$  e tentam diferenciar as alíquotas suficiente e insuficientemente zeradas. Essas abordagens recaem em um certo número (geralmente grande) de  $D_e$  determinadas em grãos grossos, usando-se alíquotas pequenas ou grãos únicos. A idéia em comum de todas as técnicas é identificar a população que foi suficientemente zerada a partir dos valores mais baixos da distribuição  $D_e$ .

As técnicas em uso incluem: (1) o uso dos valores 5% mais baixos da distribuição como a melhor estimativa para a  $D_e$  (Olley *et al.*, 1998); (2) um limite específico da amostra baseado em erros experimentais obtidos pela estimulação dessa amostra em condições nas quais o zeramento é completo (Fuchs e Lang, 2001); (3) o modelo da idade mínima

(Galbraith *et al.*, 1999); e (4) a determinação de um limite via *leading edge technique* (Lepper e McKeever, 2002).

Bailey e Arnold (2006) avaliaram as diferentes abordagens estatísticas e mostraram que estimativas significativamente diferentes são obtidas através de cada um dos diferentes modelos. Baseados em seus resultados, os autores fornecem critérios de decisão sobre qual modelo é o melhor para se escolher para diferentes tipos de distribuição. O problema básico com essas técnicas é a incerteza sobre as causas de uma distribuição ampla. Além da história de zeramento, há também outras causas para a dispersão da  $D_e$ , como a microdosimetria ou características luminescentes. Assim, quando um zeramento insuficiente é detectado, uma abordagem conservadora é usada para determinar uma estimativa de idade máxima para um depósito baseada na média de todas as alíquotas medidas. A aplicação dessas abordagens estatísticas requerem conhecimento de variabilidade no caso de amostras bem zeradas. Usar os valores mais baixos pode ser errôneo, como mostrado por Rodnight *et al.* (2006).

### 3 Área de estudo

#### 3.1. Localização

A área de estudo está situada no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, na região das cidades de Bananal (SP) e Barra Mansa (RJ) – Figura 3.1, inserindo-se principalmente na bacia de drenagem do rio do Bananal.

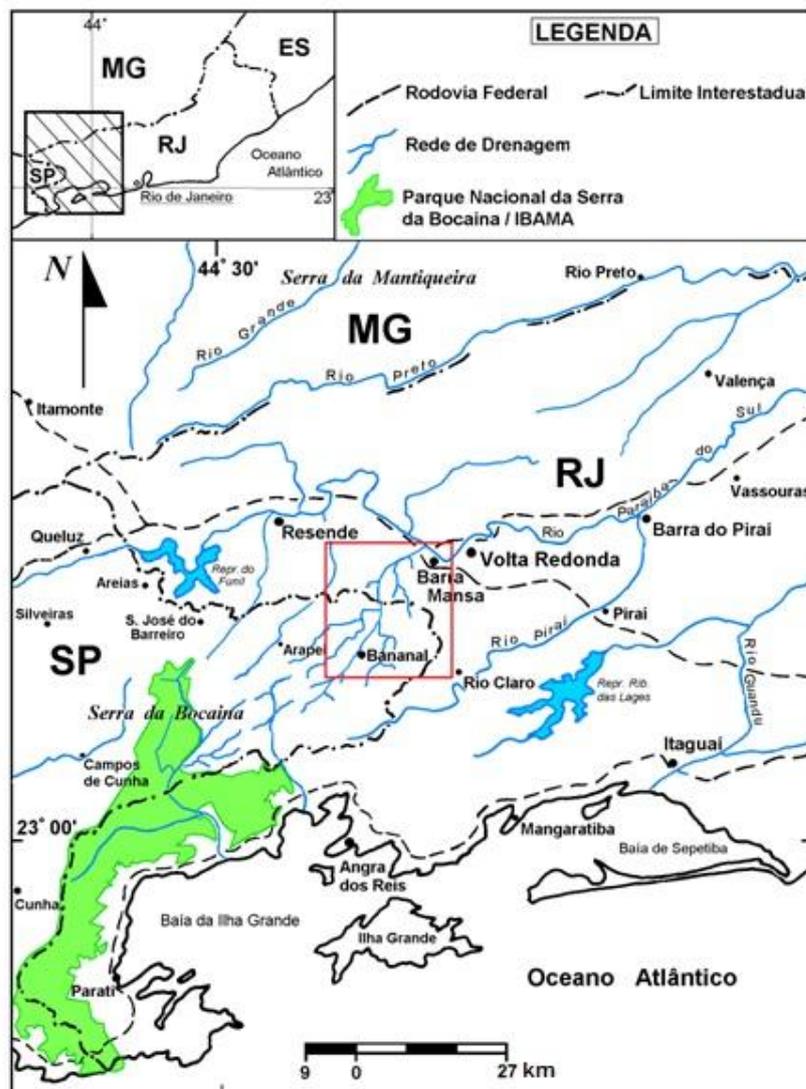


Figura 3.1 – Mapa de localização da área de estudo no contexto da região do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ) - adaptado de Fonseca (2006).

A localização dos afloramentos estudados – seções Bom Retiro, Campinho e Cotiara – está assinalada na figura 3.2.



Figura 3.2 – Localização dos afloramentos estudados (coordenadas UTM, datum WGS 84).

### 3.2. Geologia Regional e Geomorfologia

A região de estudo está contida no segmento central da Faixa Ribeira (um dos orógenos que constituem o Sistema Orogênico Mantiqueira), composta por rochas proterozóicas que foram intensamente remobilizadas e metamorizadas durante o ciclo Brasileiro (590 - 520 Ma) - Hasui *et al.* (1975 *apud* Sanson, 2006). Segundo os mesmos autores, as unidades que compõem o segmento central da Faixa Ribeira apresentam relações de contato de forma tectônica, com orientação principal NE-SW, segmentados por

feixes de orientação NW-SE (Figura 3.3). Segundo Trouw *et al.* (2000 *apud* Sanson, 2006), a Faixa Ribeira esteve sujeita a diversas fases orogênicas, resultando em um padrão complexo das unidades geológicas, individualizadas por discontinuidades tectônicas segundo uma direção ENE-WSW.

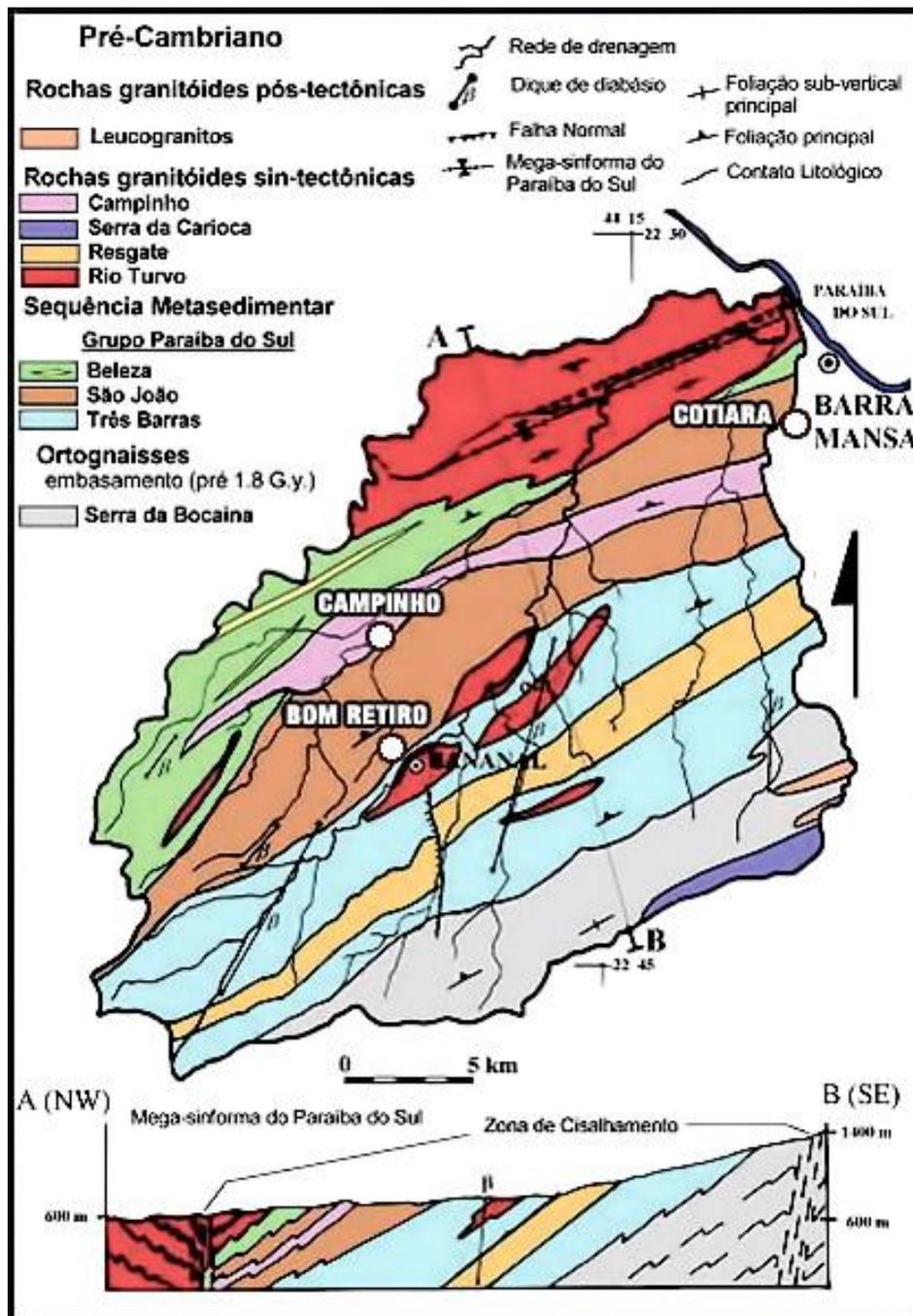


Figura 3.3 - Mapa geológico da bacia do rio do Bananal (modificado de Silva *et al.*, 1993), onde estão localizados os afloramentos estudados. Embora a localidade Cotiara não pertença à bacia do rio do Bananal, está bastante próxima, de modo que o mapa é significativo para as três áreas.

A área de estudo apresenta-se predominantemente inserida no contexto do Grupo/Complexo Paraíba do Sul, caracterizado por sucessões metassedimentares. Ocorrem também corpos granitóides sintectônicos brasileiros, além de ortognaisses.

Esta área está inserida no chamado Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). De idade paleógena, o RCSB é uma depressão alongada e deprimida com pouco mais de 900 km de comprimento, desenvolvida entre as cidades de Tijucas do Sul, no Estado do Paraná, e a área submersa defronte a Macaé, no Estado do Rio de Janeiro. O rifte segue a linha de costa atual, da qual dista em média 70 km, alcançando o Oceano Atlântico em seu segmento ocidental e na sua terminação nordeste (Riccomini *et al.*, 2004). Admite-se, de forma consensual, a existência de vínculo entre a instalação e desenvolvimento do RCSB com o Evento Sul-Atlântico, ligado à ruptura continental e abertura do Atlântico Sul (Schobbenhaus *et al.*, 1984 *apud* Riccomini *et al.*, 2004).

Segundo Asmus e Ferrari (1978), ocorreu no Paleógeno uma reativação de zonas de fraqueza pré-cambrianas, em decorrência do soerguimento da área continental, o que gerou as serras do Mar e da Mantiqueira. Esse evento produziu um grande volume de sedimentos detríticos paleogênicos, que preenchem o RCSB e estão associados principalmente a sistemas de leques aluviais e canais fluviais entrelaçados contendo depósitos de arenitos com estratificações cruzadas intercalados a lamitos maciços. A parte superior da sequência é formada principalmente por arenitos, argilitos e subordinadamente conglomerados relacionados à deposição em sistemas fluviais meandrantés (Riccomini *et al.*, 2004).

A região estudada corresponde a um domínio colinoso, denominado de Depressão do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, caracterizado por segmentos convexos e côncavos (cabeceiras de drenagem em anfiteatro). Esta depressão é limitada pelas serras da Bocaina,

a sul, e da Mantiqueira, a norte. De acordo com Fernandes (1990), a bacia de drenagem do rio do Bananal apresenta dois compartimentos topográficos principais (Figura 3.4): um montanhoso, da Serra da Bocaina, com encostas retilíneas e fundos de vales estreitos, e outro de colinas convexo-côncavas e fundos de vales largos, suavemente inclinados. Há uma elevação gradativa dos topos das colinas em direção ao sopé da Bocaina. Os afloramentos estudados encontram-se em uma área de colinas (Figura 3.4).

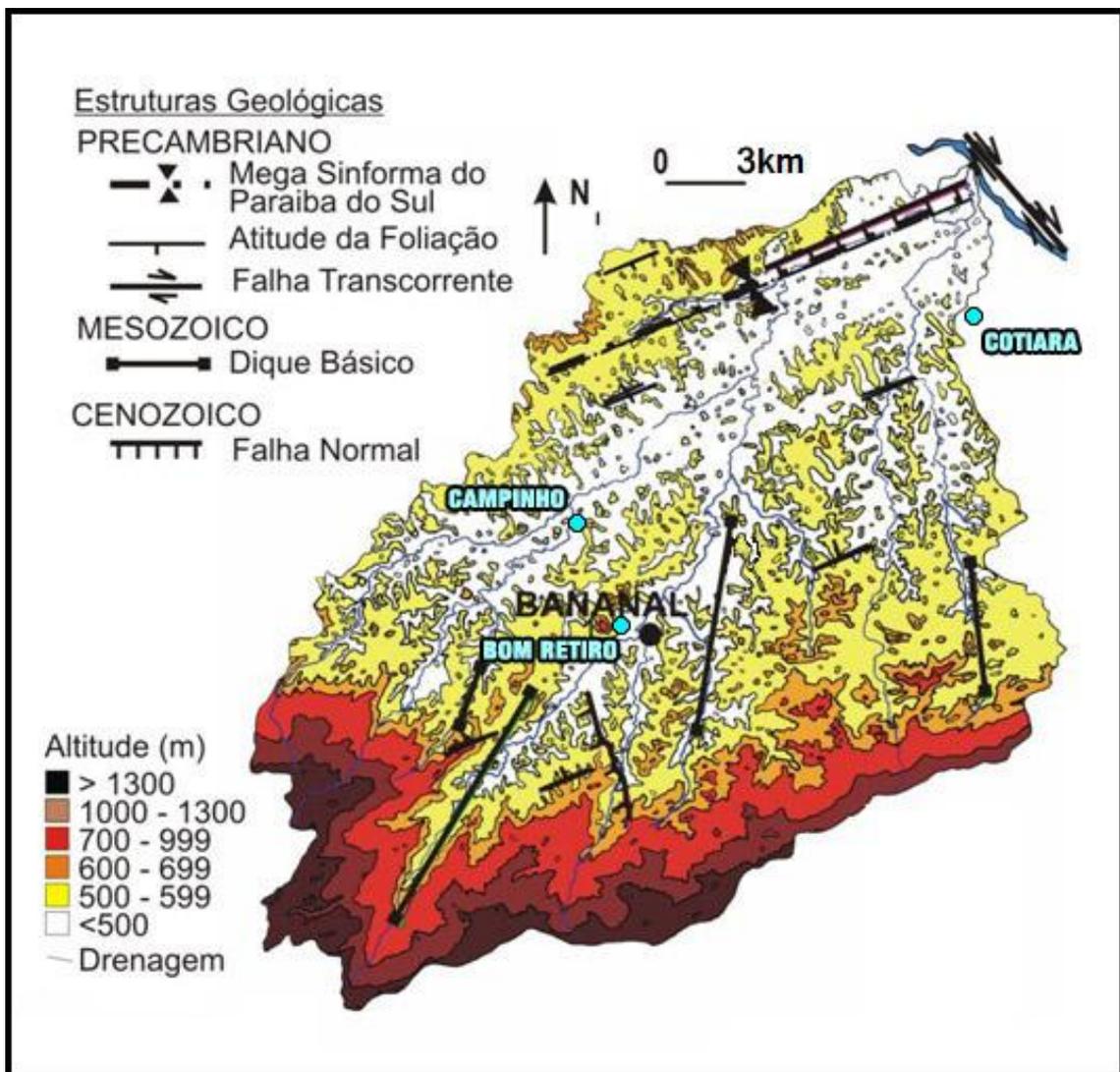


Figura 3.4 – Hipsometria e principais estruturas geológicas da bacia de drenagem do rio do Bananal (adaptado de Coelho Netto, 2003).

Estudos sobre as transformações ambientais quaternárias na região do médio vale do rio Paraíba do Sul (Moura e Mello, 1991; Moura *et al.*, 1991; Silva, 1991; Mello, 1992; Peixoto, 1993) possibilitaram a individualização de diferentes episódios de erosão e sedimentação e a identificação das cabeceiras de drenagem em anfiteatro como as unidades fundamentais da evolução geomorfológica e sedimentar. Eventos erosivos e deposicionais relacionados a variações paleoclimáticas e controle neotectônico modelaram o domínio de colinas e morros através de retrabalhamento das encostas e encaixamento fluvial, em diversas fases. Os sedimentos gerados por esses sucessivos episódios constituem depósitos coluviais (gerados por reafeiçoamento das encostas), aluviais (de origem fluvial) e aluvio-coluviais. Observando esses depósitos, pode-se tentar entender a evolução quaternária da região.

#### **4 Estratigrafia do Quaternário do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul**

O objeto de interesse nesse estudo são os depósitos quaternários (colúviais e aluviais) que recobrem a região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Vários foram os estudos realizados nessa região na tentativa de interpretar a evolução da paisagem, mas a introdução da perspectiva aloestratigráfica (diferenciação de unidades estratigráficas através de descontinuidades limitantes) por Moura e Meis (1986) representou um marco nos estudos no Quaternário da região. Com essa perspectiva, foi proposta a primeira coluna estratigráfica detalhada, abrangendo, em uma escala regional, as relações estratigráficas apresentadas pelos depósitos quaternários associados a terraços fluviais e complexos de rampa de colúvio, com ênfase nos depósitos colúviais (Figura 4.1). Moura e Meis (1986) apresentaram idades radiocarbono associadas ao limite Pleistoceno-Holoceno: datações realizadas em paleossolo nos depósitos colúviais apontaram idade de cerca de 10.000 anos AP; sedimentos argilosos na base dos terraços fluviais, interpretados como flúvio-lacustres, foram datados em aproximadamente 9.500 anos AP.

GEOCRO-NOLOGIA	CRONOESTRATIGRAFIA	LITOESTRATIGRAFIA	ALOESTRATIGRAFIA	EDAFO-ESTRATIGRAFIA
9500 anos BP	HOLOCENO	Areias castanhas intercaladas com argila estratificada	Areias castanhas e argilas	
		Areias sílticas avermelhadas	Areias sílticas vermelhas	
		Areias sílticas	Bela-Vista	
		Areias Castanhas	Areias sílticas Areias castanhas	
		ARGILA	Argila vermelha Argila arroxeadas	
		Areias finas e médias estratificadas	Areias finas	
		Areias médias	Areias médias	
		Materiais areno-argilosos e argilo-arenosos amarelos e castanhos avermelhados	Piracema II Piracema I Areias argilosas amarelas Cascalheiras III Campo Alegre	Solo Piracema
		Areias estratificadas bioturbadas	Areias sílticas amarelas Areias grosseiras oxidadas estratificadas Areias sílticas micáceas oxidadas	
		Argilas estratificadas	Argila vermelha estratificada Argila vermelha intercalada com areias Argila orgânica	
		Areias grosseiras estratificadas	Areias Grosseiras	
			Cascalheira II	
			Bom Retiro II	
			Bom Retiro I	
	Cascalheira I	Solo Bom Retiro		
	Treviso II	Solo Treviso		
	Treviso I			
	PLEISTOCENO	Materiais areno-argilosos e argilo-arenosos vermelhos e amarelos		
		Gnaisses diversos magmatitos alterados		

Figura 4.1 – Coluna estratigráfica proposta por Moura e Meis (1986) para os depósitos quaternários da região de Bananal (médio vale do Rio Paraíba do Sul).

Posteriormente, Moura e Mello (1991) reavaliaram as unidades propostas por Moura e Meis (1986), analisando de forma integrada os depósitos de domínio fluvial e de encostas, e propondo um novo quadro aloestratigráfico, composto por nove unidades, sendo duas pleistocênicas (ambas colúviais – Aloformação Santa Vitória e Aloformação Rio do Bananal) e sete holocênicas (três colúviais – Aloformação Cotiara, Aloformação Piracema e Aloformação Carrapato; e quatro aluviais – Aloformação Rio das Três Barras, Aloformação Manso, Aloformação Rialto e Aloformação Resgate) – Figura 4.2.

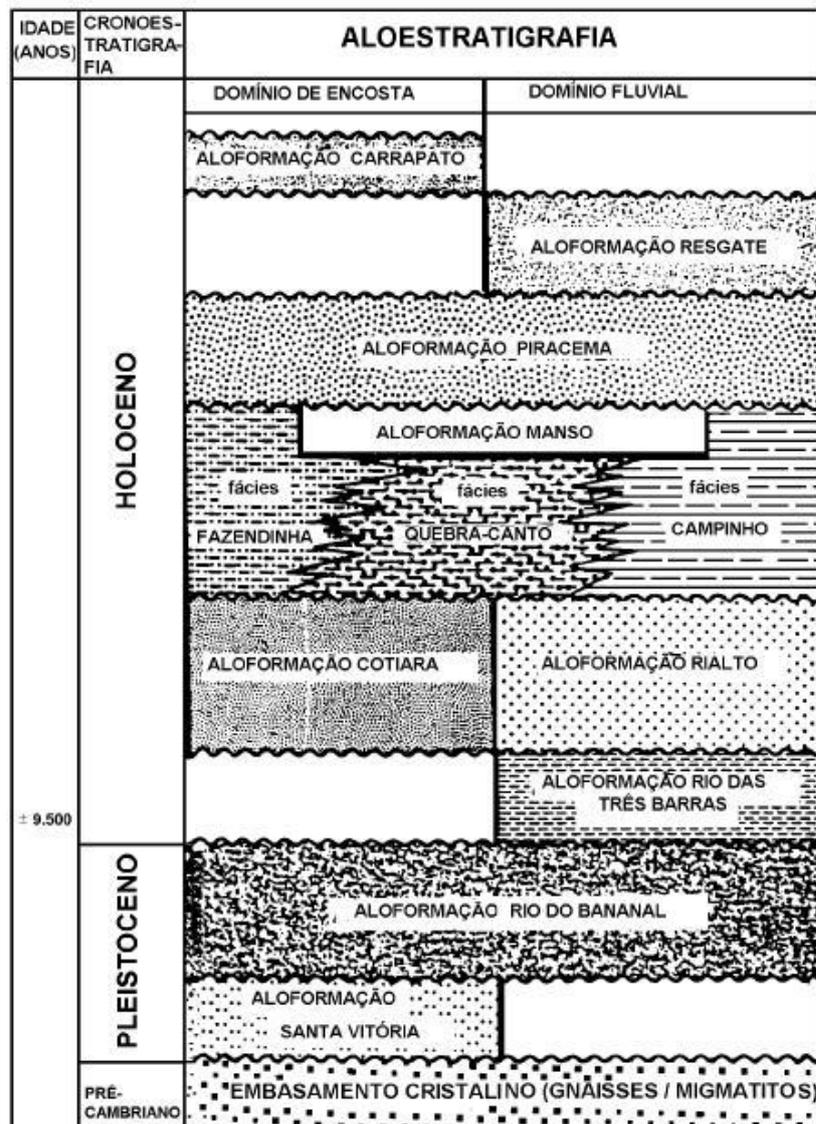


Figura 4.2 - Coluna aloestratigráfica proposta por Moura e Mello (1991) para os depósitos quaternários da região do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP-RJ).

Mello (1992) reavaliou as unidades propostas por Moura e Mello (1991), englobando a Aloformação Cotiara na Aloformação Rio do Bananal, e a Aloformação Rialto na Aloformação Manso.

Mello *et al.* (1995) apresentaram um conjunto de idades radiocarbono de modo a balizar a coluna estratigráfica dos depósitos quaternários da região do médio vale do rio Paraíba do Sul (Figura 4.3).

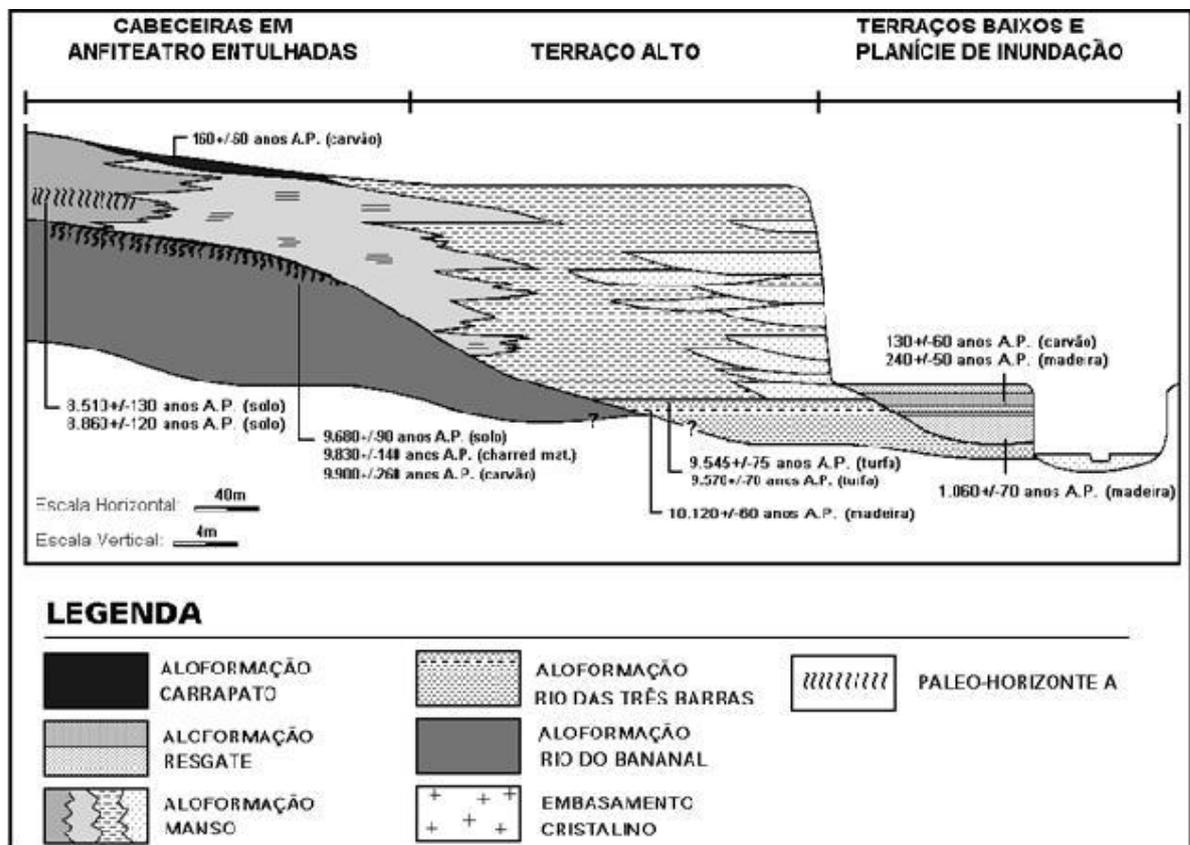


Figura 4.3 – Relações morfo-aloestratigráficas e idades radiocarbono para os depósitos quaternários no médio vale do rio Paraíba do Sul, segundo Mello *et al.* (1995).

Deste conjunto de datações, Mello *et al.* (1995) ressaltaram três marcos estratigráficos principais: o limite Pleistoceno-Holoceno, identificado como uma fase de formação de solos (paleossolo no topo da Aloformação Rio do Bananal) e sedimentação orgânica (Aloformação Rio das Três Barras); o expressivo episódio erosivo-deposicional

ocorrido no Holoceno inicial a médio, assinalado pelos depósitos da Aloformação Manso, com início após cerca de 9.500 anos AP e atuação até depois de cerca de 8.000 anos AP; e a sedimentação fluvial e coluvial mais recente (relacionada, respectivamente, às aloformações Resgate e Carrapato), com influência da ocupação humana (depósitos tecnogênicos).

Outros trabalhos reúnem datações para os depósitos quaternários desta região:

- Coelho-Netto (1998) apresentou um conjunto de idades radiocarbono com uma variação média entre 8.000 a 10.000 anos AP, embora algumas amostras variem bastante em relação a essa média, inclusive com a presença de inversões (ou seja, idades mais antigas sobre mais novas). A partir da concentração de idades identificada neste intervalo médio, esta autora admite que a evolução quaternária nesta região foi marcada por um evento “catastrófico” com duração aproximada de dois mil anos, no início do Holoceno. O registro deste evento “catastrófico” corresponderia ao marco estratigráfico que Mello *et al.* (1995) definiram como Aloformação Manso, embora estes autores considerem uma duração temporal maior;
- Barros (2003) apresentou um conjunto de idades radiocarbono abrangendo depósitos da Aloformação Rio das Três Barras, datados como pleistocênicos e da transição Pleistoceno/Holoceno. As idades apresentadas por esta autora corroboram a proposta estratigráfica apresentada por Mello *et al.* (1995);
- Peixoto (2002) e Tatumi *et al.* (2003) apresentaram idades obtidas pelo método da luminescência, sendo a maior parte delas pleistocênicas. Para a maior parte dos dados, não foi apresentada uma relação com as unidades estratigráficas definidas por Mello *et al.* (1995), sendo grande parte dos depósitos estudados mais antigos do que aqueles reconhecidos por estes autores.

Uma relação de parte dos dados geocronológicos disponíveis para os depósitos quaternários na região é apresentada a seguir, organizada por seção estratigráfica de referência.

#### **4.1 Avaliação de dados geocronológicos disponíveis**

As datações radiocarbono encontram-se distribuídas principalmente no paleossolo da Aloformação Rio do Bananal e nos depósitos argilosos da Aloformação Rio das Três Barras, ambos marcadores estratigráficos do limite Pleistoceno-Holoceno (Figura 4.4). As datações por luminescência estão praticamente concentradas nos depósitos da Aloformação Rio do Bananal e mais antigos, com raras informações para os depósitos holocênicos (Figura 4.4).

Ressalta-se a muito reduzida quantidade de datações disponíveis para os depósitos da Aloformação Manso, principal marco estratigráfico holocênico, que não apresenta níveis orgânicos expressivos. Como exceção, praticamente, estão as datações apresentadas por Coelho Netto (1998), que carecem de um controle estratigráfico preciso, como discutido anteriormente.

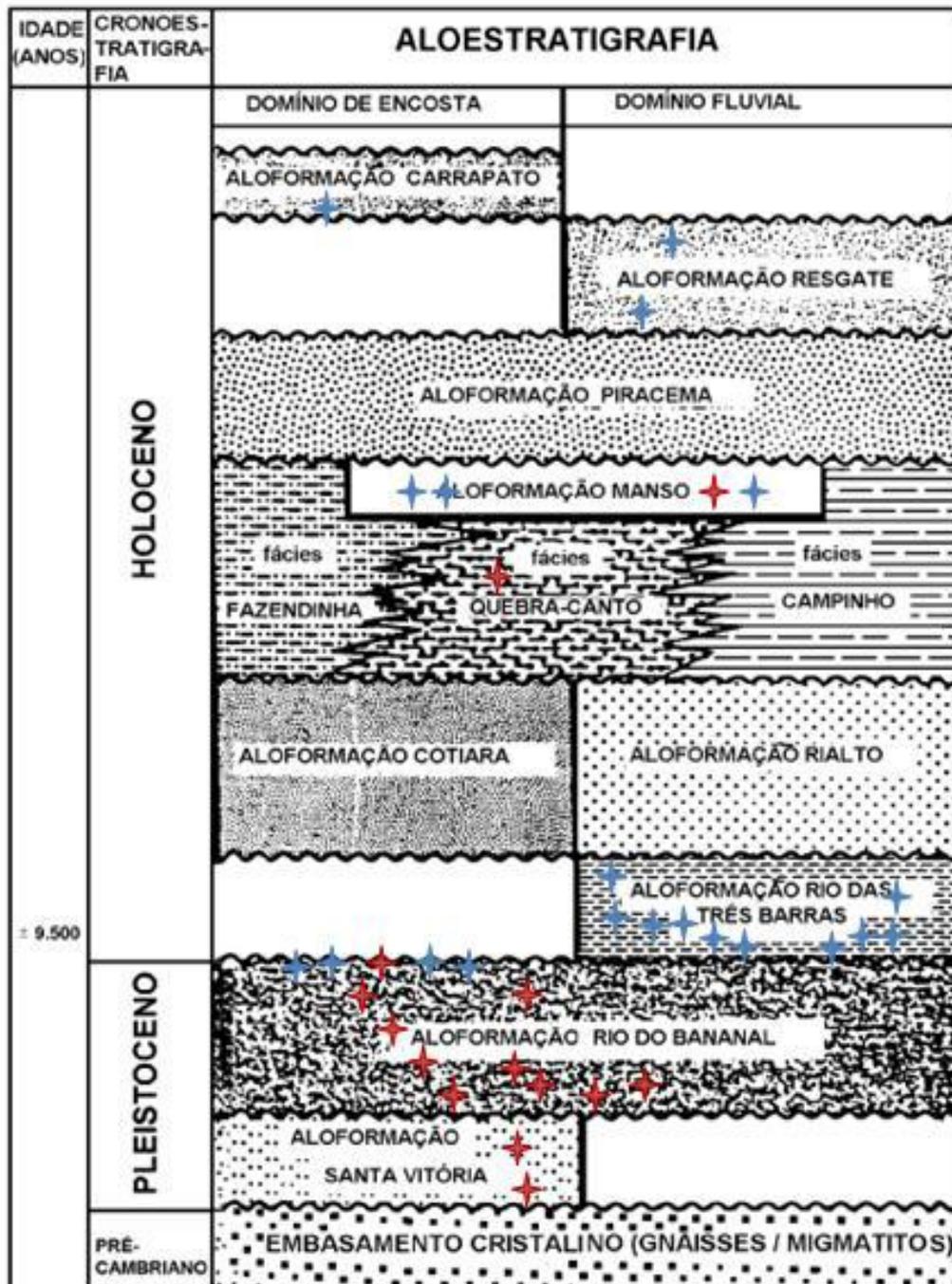


Figura 4.4 – Distribuição de idades radiocarbono (azul) e LOE (vermelho) nas unidades aloestratigráficas da região do médio vale do rio Paraíba do Sul, segundo Moura e Meis (1986), Mello *et al.* (1995), Peixoto (2002) e Barros (2003).

#### 4.1.1 Seção Bom Retiro

- Paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 10.000 anos AP, por radiocarbono (Meis & Moura, 1986).
- Paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 9.830 +/- 140 anos, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995); 9.100 +/- 1.100 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos 40 cm abaixo da base do paleo-horizonte A da Aloformação Rio do Bananal – 9.900 +/- 1.300 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos na “fácies” Quebra-Canto da Aloformação Manso – 19.900 +/- 2.800 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Várias idades radiocarbono foram obtidas no paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal, todas em torno de 10.000 anos. A datação por LOE obteve uma idade de 9.100 anos para este paleo-horizonte A – o que está dentro do esperado, considerando a margem de erro. A idade dos depósitos abaixo do paleo-horizonte A (9.900 anos) também está dentro do esperado, considerando o erro de 1.300 anos.

Para a Aloformação Manso, entretanto, seria esperada uma idade mais recente que a obtida (19.900 anos). Utilizando o paleo-horizonte A do topo da Aloformação Rio do Bananal como referência, a idade para uma amostra coletada nesse nível deveria ser mais nova que 10.000 anos.

#### 4.1.2 Seção Cotiara

- Paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 9.680 +/- 90 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).

- Madeira carbonizada no topo da Aloformação Rio do Bananal – 9.900 +/- 260 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Paleo-horizonte A na Aloformação Manso – 8.510 +/- 130 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Madeira carbonizada na base da Aloformação Carrapato – 160+/-60 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).

As duas idades radiocarbono obtidas nesta seção para o topo da Aloformação Rio do Bananal encontram-se em consonância com as demais já discutidas. A idade do paleo-horizonte A identificado na Aloformação Manso também está dentro do esperado (mais jovem que 10.000 anos, por estar acima do paleo-horizonte A do topo da Aloformação Rio do Bananal). Considerando a posição estratigráfica da Aloformação Carrapato, o resultado obtido também está dentro do esperado.

#### 4.1.3 Seção Campo Alegre

- Paleo-horizonte A na Aloformação Manso – 8.860 +/- 120 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Turfa coletada a 210 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 10.010+/- 70 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).
- Turfa coletada a 245 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 21.530 +/- 130 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).
- Turfa coletada a 280 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 27.970+/- 150 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).

- Sedimento orgânico coletado a 297 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 30.140 +/- 740 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).

Segundo a estratigrafia proposta por Moura e Mello, a Aloformação Rio das Três Barras é considerada holocênica. Assim, identificamos uma discordância com o modelo estratigráfico da região ao analisarmos as idades obtidas por Barros (2003) para sedimentos desta aloformação.

#### 4.1.4 Seção Campinho

- Turfa coletada a 770 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 9.570 +/- 70 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Madeira parcialmente carbonizada a 912 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 10.720 +/- 60 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).

Os dados para esse depósito estão dentro do esperado.

#### 4.1.5 Seção Cerâmica

- Turfa coletada no topo da Aloformação Rio das Três Barras – 9.500 anos AP, por radiocarbono (Meis & Moura, 1986); 9.545 +/- 75 anos AP por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).

As idades estão de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.6 Seção Fazenda Bahia

- Madeira coletada a 390 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 10.120 +/- 60 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Sedimento orgânico coletado a 296 cm de profundidade, na Aloformação Rio das Três Barras – 9.860 +/- 50 anos AP, por radiocarbono (Barros, 2003).

As idades estão de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.7 Seção Resgate

- Madeira em camada síltica na porção média da Aloformação Resgate – 240 +/- 50 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).

A idade está de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.8 Seção Rialto

- Madeira carbonizada na base da Aloformação Resgate – 1.060 +/- 70 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).
- Madeira carbonizada em camada síltica na porção média da Aloformação Resgate – 130 +/- 60 anos AP, por radiocarbono (Mello *et al.*, 1995).

A idade está de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.9 Seção Fazenda Rialto

- Sedimentos argilo-arenosos amarelados, imediatamente acima de material rudáceo – 35.400 +/- 4.300 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos argilo-arenosos amarelados, 40 cm acima de material rudáceo – 14.400 +/- 1.800 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

As idades estão de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.10 Seção Córrego do Lavapés

##### - Córrego do Lavapés I

- Sedimentos na base de camada argilo-arenosa amarelada, com pequenos grânulos de quartzo, sobre camada de cascalhos – 8.300 +/- 900 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Fragmentos de carvão na base de camada arenosa castanha, no topo da seção estratigráfica – 6.550 +/- 70 AP, por radiocarbono (Peixoto, 2002).

##### - Córrego do Lavapés II

- Sedimentos em camada argilo-arenosa amarelada, sobre nível de cascalhos – 11.100 +/- 700 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

##### - Córrego do Lavapés III

- Sedimentos coletados a 1 m de profundidade – 11.000 +/- 700 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

- Sedimentos de camada arenosa, amarelada, com grânulos e seixos, situada entre cascalhos da base do pacote e os da porção intermediária – 22.200+/-1.700 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos coletados em camada de cascalhos da base, assentada sobre o embasamento cristalino – 97.200+/- 7.600 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Os depósitos estudados na localidade Córrego do Lavapés são considerados pleistocênicos, de acordo com o modelo estratigráfico proposto por Moura e Mello (1991) para a região. Conforme os dados apresentados acima, os sedimentos coletados próximos ao embasamento cristalino apresentaram idade de 97.200 anos, condizente com o esperado. As outras amostras, entretanto, apresentaram idades muito recentes. Como o método da luminescência fornece a idade da última exposição à luz solar, entende-se estas idades como representativas de episódios de erosão que expuseram os sedimentos à luz. Assim, estes dados não simbolizam as idades dos depósitos.

#### *4.1.11 Seção Mato Dentro*

- Sedimentos em camada argilo-arenosa amarelada – 48.300 +/- 3.700 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos em camada argilo-arenosa amarelada (45 cm acima do local de coleta anterior) – 42.400 +/- 3.300 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Os dados estão de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.12 Seção Cafundó

- Sedimentos sobre embasamento cristalino alterado, correlacionados à Formação Ribeirão dos Quatis – 54.800 +/- 7.200 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Devido a seu contexto geológico, os sedimentos dessa seção suscitavam discussões a respeito da natureza dos depósitos (se pertencentes ao Paleógeno ou Pleistoceno), o que motivou a coleta para datação por luminescência. Embora o resultado da datação tenha indicado uma idade pleistocênica, Ramos (1997) verificou as características do depósito e o classificou como pertencente à Formação Ribeirão dos Quatis, de idade paleogênica. Como o limite temporal do método é de um milhão de anos, seria esperado que o dado de datação indicasse algo próximo desse valor.

#### 4.1.13 Seção Fazenda Conceição

- Sedimentos em camada argilo-arenosa amarelada, limitado em sua base por um nível de seixos – 20.800 +/- 2.800 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos em camada areno-argilosa avermelhada, tendo limite basal marcado por superfície erosiva com níveis de cascalhos finos com seixos – 24.600 +/- 3.300 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Os dados estão de acordo com o modelo estratigráfico.

#### 4.1.14 Seção Fazenda Cachoeira

- Sedimentos argilo-arenosos, avermelhados, na base dos depósitos coluviais – 58.500 +/- 7.900 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

- Sedimentos areno-argilosos, amarelados, abaixo do paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 57.400 +/- 7.400 anos, por LOE (Peixoto, 2002).
- Paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 9.830 +/- 70 anos AP, por radiocarbono (Peixoto, 2002); 16.000 +/- 2.200 anos por LOE (Peixoto, 2002).
- Sedimentos argilo-arenosos avermelhados relacionados à Aloformação Piracema, acima do paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal – 6.500 +/- 750 anos, por LOE (Peixoto, 2002).

Foi obtida uma idade LOE para o paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal (16.000 +/- 2.200 anos) que não está de acordo com as datações radiocarbono. As outras idades obtidas, no entanto, estão condizentes com o modelo estratigráfico proposto.

## 5 Metodologia

### 5.1 Seleção das localidades estudadas e coleta de amostras

Foram coletadas treze amostras, em cinco seções: quatro na seção Bom Retiro; três na seção Cotiara; uma na seção Campinho A; duas na seção Campinho B; e três na seção Campinho C. Estas seções foram selecionadas por se tratarem de seções-tipo e serem representativas do registro holocênico, além de apresentarem idades radiocarbono.

As coletas de amostras foram realizadas utilizando-se tubos de PVC, que penetravam cerca de 25 a 30cm no afloramento. Cada amostra tinha cerca de 300g.

Durante a coleta, a extremidade aberta do tubo foi coberta por plástico preto, de modo a não permitir a entrada de luz (embora o laboratório descarte os sedimentos das extremidades). Ao retirarem-se os tubos, cada um deles era imediatamente embalado com plástico preto e identificado com etiquetas.

A parede exposta do afloramento foi removida com auxílio de enxada, de modo a descartar sedimentos com alterações recentes. Não foram coletadas amostras com menos de 1m de profundidade em relação à superfície atual, e foram evitados sedimentos que mostrassem alterações pós-deposicionais muito evidentes e que sugerissem mistura de material entre camadas, devido à atividade de organismos.

## 5.2 Protocolo laboratorial

As amostras foram levadas ao Laboratório de Vidros e Datação da FATEC-SP, onde foram realizadas as etapas para obtenção das idades. As etapas descritas nos itens a seguir foram retiradas de informações fornecidas pelo LVD-FATEC.

O protocolo laboratorial envolve basicamente as seguintes etapas:

- 1- tratamento químico das amostras;
- 2- construção da curva de calibração;
- 3- determinação da dose anual;
- 4- determinação da dose acumulada;
- 5- cálculo da idade.

A manipulação das amostras no laboratório é feita em ambiente de luz vermelha (luz visível de baixa frequência e, conseqüentemente, menor energia) - Figura 5.1.

Após a abertura dos tubos, as amostras passaram por um tratamento químico com  $\text{H}_2\text{O}_2$  (20%), HF (20%) e, finalmente, HCl (10%). Posteriormente, as amostras foram secas e peneiradas de modo a separar a fração granulométrica na faixa de 100-160  $\mu\text{m}$ . Assim, foram obtidos grãos de quartzo isentos de materiais orgânicos, e com granulometria homogênea.



Fig. 5.1 – Cabine de tratamento químico das amostras a serem datadas (imagem cedida pelo LVD/FATEC).

Em seguida, foram separadas alíquotas com 7mg de cada amostra a ser datada. Essas alíquotas foram estimuladas com luz de modo a emitir a luminescência. A quantidade de fótons emitidos é, então, relacionada à dose acumulada (ou “natural”), cuja obtenção será detalhada nos itens 5.2.3.1 e 5.2.3.2.

No entanto, para que o aparelho associe corretamente o sinal LOE lido (luminescência emitida) à dose acumulada, é necessária uma calibração, conforme descrito a seguir.

### 5.2.1 Curva de calibração

Cada tipo de cristal possui propriedades distintas dos demais, o que faz com que diferentes cristais possuam diferentes capacidades de aprisionamento de elétrons nas armadilhas. Isso quer dizer que dois cristais diferentes que recebam a mesma dose de radiação podem ter doses acumuladas diferentes. Assim, uma leitura do sinal luminescente emitido não tem uma associação padrão com um único valor possível de dose acumulada, o que faz com que seja necessária uma calibração do aparelho com a amostra que está sendo datada.

Para realizar a calibração, algumas alíquotas são expostas à radiação solar para emitirem toda a luminescência e terem o sinal zerado. Posteriormente, são irradiadas utilizando-se uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  e fonte beta em várias doses pré-definidas. Cada uma dessas doses faz com que um número diferente de elétrons seja armadilhado. Assim, após receber essa radiação, cada uma dessas alíquotas será capaz de emitir um sinal luminescente diferente.

Faz-se, então, um gráfico que associa o sinal LOE emitido por essas alíquotas às doses que haviam recebido. A curva resultante é uma curva de calibração para aquele material (Figura 5.2).

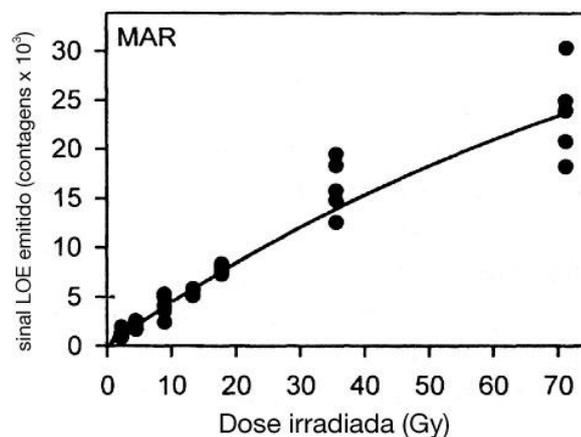


Figura 5.2 – Exemplo de curva de calibração. Modificado de Botter-Jensen *et al.* (2003).

### 5.2.2 Determinação da dose anual

Para a determinação da dose anual, foram utilizadas porções da amostra sem nenhum tratamento. Estas foram colocadas em um recipiente plástico (dimensões: 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura) no espectrômetro *Canberra Inspector Portable Spectroscopy Workstation* para coleta de dados por 24 horas (Figura 5.3).

A quantidade de radiação emitida nesse período é detectada e é feita então a extrapolação para o período de um ano.



Figura 5.3 - Espectrômetro *Canberra Inspector Portable Spectroscopy Workstation* (imagem cedida pelo LVD-FATEC).

### 5.2.3 Determinação da dose acumulada

A determinação da dose acumulada pode ser realizada por vários protocolos. Neste trabalho, foram utilizados os protocolos MAR e SAR.

### 5.2.3.1 O protocolo MAR (alíquotas múltiplas)

Neste protocolo, uma idade média é determinada a partir de apenas uma curva de calibração feita. Foram utilizadas 20 alíquotas para se obter a curva de calibração. Destas alíquotas, quatro foram anteriormente usadas para se obter a dose acumulada.

Este procedimento foi feito utilizando-se o aparelho TL/OSL *Automated Systems, Model 1100-series Daybreak Nuclear Instruments Inc.* (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Aparelho TL/OSL *Automated Systems, Model 1100-series Daybreak Nuclear Instruments Inc.* (imagem cedida pelo LVD-FATEC).

### 5.2.3.2 O protocolo SAR (alíquotas únicas)

O protocolo SAR foi feito para determinar uma idade média dentre pelo menos 10 alíquotas (~2mg cada). Assim, foram feitas 10 curvas de calibração e encontradas

aproximadamente 10 idades para cada amostra. Este procedimento foi feito utilizando-se o aparelho RISO TL/OSL *Reader Model DA-20*.

Embora o protocolo SAR elimine alguns problemas dos procedimentos de datação, existe uma série de fatores que, se não forem observados e corrigidos, podem torná-lo tão propenso a erros como os demais protocolos. Uma observação a ser considerada é que, devido às repetidas etapas de irradiações para a construção da curva de calibração, pode ocorrer uma queda ou aumento na sensibilidade dos grãos que formam uma alíquota, gerando uma variação na resposta da LOE em função da dose aplicada. A fim de corrigir este possível problema, após a medição do sinal natural e entre as doses de radiação ionizante são aplicadas e medidas as doses de teste ( $D_T$ ), geralmente determinadas com base no valor estimado para a dose acumulada ( $10\% D_e$ ). Wallinga *et al.* (2000) mostram que este teste é necessário para eficácia do protocolo SAR.

Deste modo, para efetuar o protocolo SAR foram seguidas as seguintes etapas: 1. medida da LOE natural ( $L_n$ ); 2. irradiação com dose teste ( $D_T$ ); 3. tratamento térmico de  $220^\circ\text{C}$ ; 4. medida da LOE teste ( $T_n$ ); 5. irradiação com dose regenerativa; 6. tratamento térmico de  $220^\circ\text{C}$ ; 7. medida da LOE regenerativa ( $L_i$ ); 8. irradiação com dose teste; 9. tratamento térmico de  $220^\circ\text{C}$ ; 10. medida da LOE teste ( $T_i$ ); 11. repetição do ciclo (começando a partir do item 6 até a 4ª dose regenerativa).

Terminada a confecção da curva de calibração individual de cada alíquota, que é a razão  $L_i/T_i$  x dose (onde o índice  $i$  varia de 1 a 4, para cada alíquota), insere-se no gráfico o valor da taxa  $L_n/T_n$  (a luminescência natural contida na amostra). A interseção entre a curva de calibração e a reta horizontal - correspondente ao valor da luminescência natural - fornece o valor da dose acumulada natural no cristal ( $D_e$ ) – Figura 5.5.

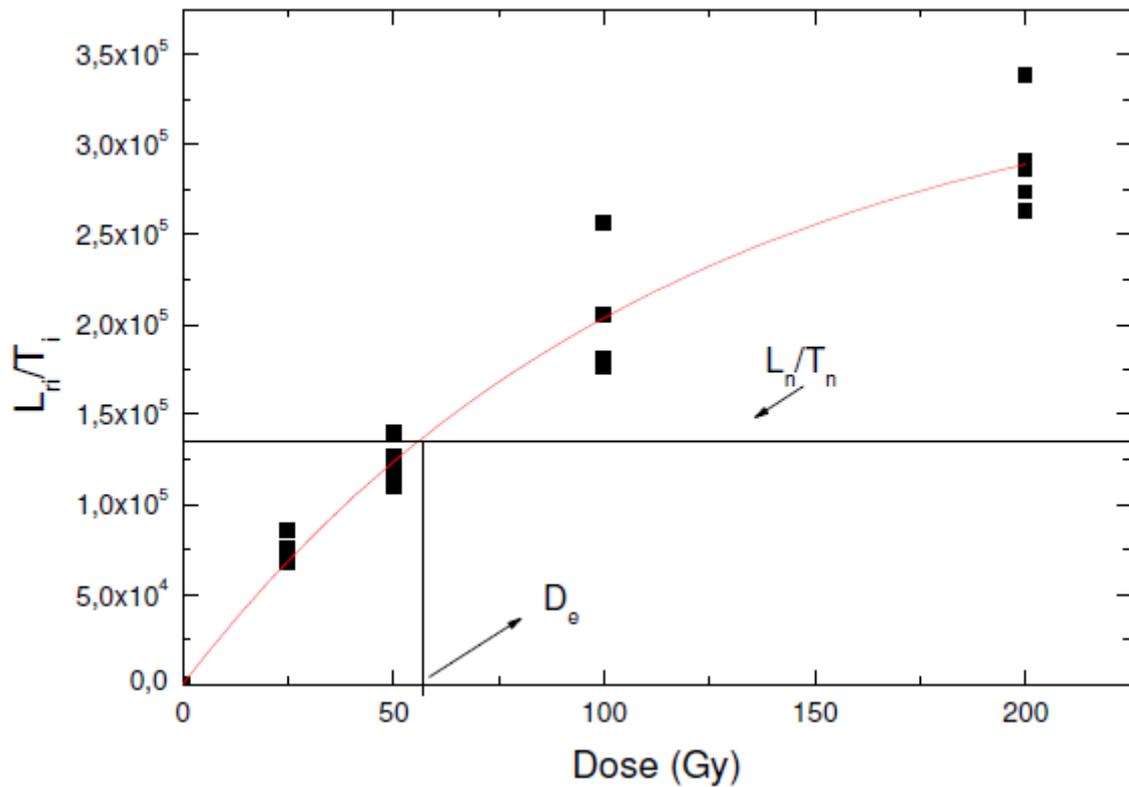


Figura 5.5 – Exemplo de curva de calibração obtida através do protocolo SAR (cedida pelo LVD-FATEC).

Para se encontrar os valores de  $D_e$ , pode ser usado o modelo de cálculo pela média dos valores  $D_e$ , ou utiliza-se apenas os valores mais baixos de  $D_e$ , considerando que os altos estavam com sinal de LOE residuais.

#### 5.2.4 Cálculo da idade

Para obtenção da idade de cada alíquota, após determinar a dose acumulada (utilizando-se MAR ou SAR) divide-se este valor pela dose anual (ver capítulo 2).

Para o cálculo da idade final de cada amostra, utilizou-se a média entre as idades de cada alíquota.

## 6 Resultados e Discussões

### 6.1 Localidade Bom Retiro – WGS84 23K 0568569 / 7492459

A seção Bom Retiro encontra-se na zona de articulação de encostas com o fundo do vale do Córrego São João, cortando duas cabeceiras de drenagem em anfiteatro (Figura 6.1). Uma das cabeceiras (I) apresenta pacote sedimentar constituído por vários depósitos coluviais superpostos, com inclinação em geral concordante com a superfície atual do terreno, enquanto a outra cabeceira (II) foi gerada pela incisão de um paleocanal erosivo (Peixoto, 2002).

Meis e Moura (1986) dataram por radiocarbono o paleohorizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal (ver figura 6.2), obtendo a idade de aproximadamente 10.000 anos AP. Mello *et al.* (1995) também dataram o paleohorizonte A por radiocarbono, e obtiveram a idade de 9.830 +/- 140 anos AP – concordante com a obtida anteriormente por Meis e Moura (1986). Peixoto (2002) datou o mesmo paleohorizonte e sedimentos 40cm abaixo deste paleohorizonte A, utilizando o método LOE (protocolo SAR), obtendo, respectivamente, idades de 9.100 +/- 1.100 e 9.900 +/- 1.300 anos. Todos estes resultados estão em uma faixa de idades próximas e condizem com o limite Pleistoceno-Holoceno. Peixoto (2002) datou também, por LOE (protocolo SAR), sedimentos da “fácies” Quebracanto da Aloformação Manso (ver figura 6.1), obtendo a idade de 19.900 +/- 2.800 anos. Este último resultado está bastante distante do esperado em comparação com os resultados anteriores, já que a Aloformação Manso encontra-se acima estratigraficamente do paleohorizonte A.

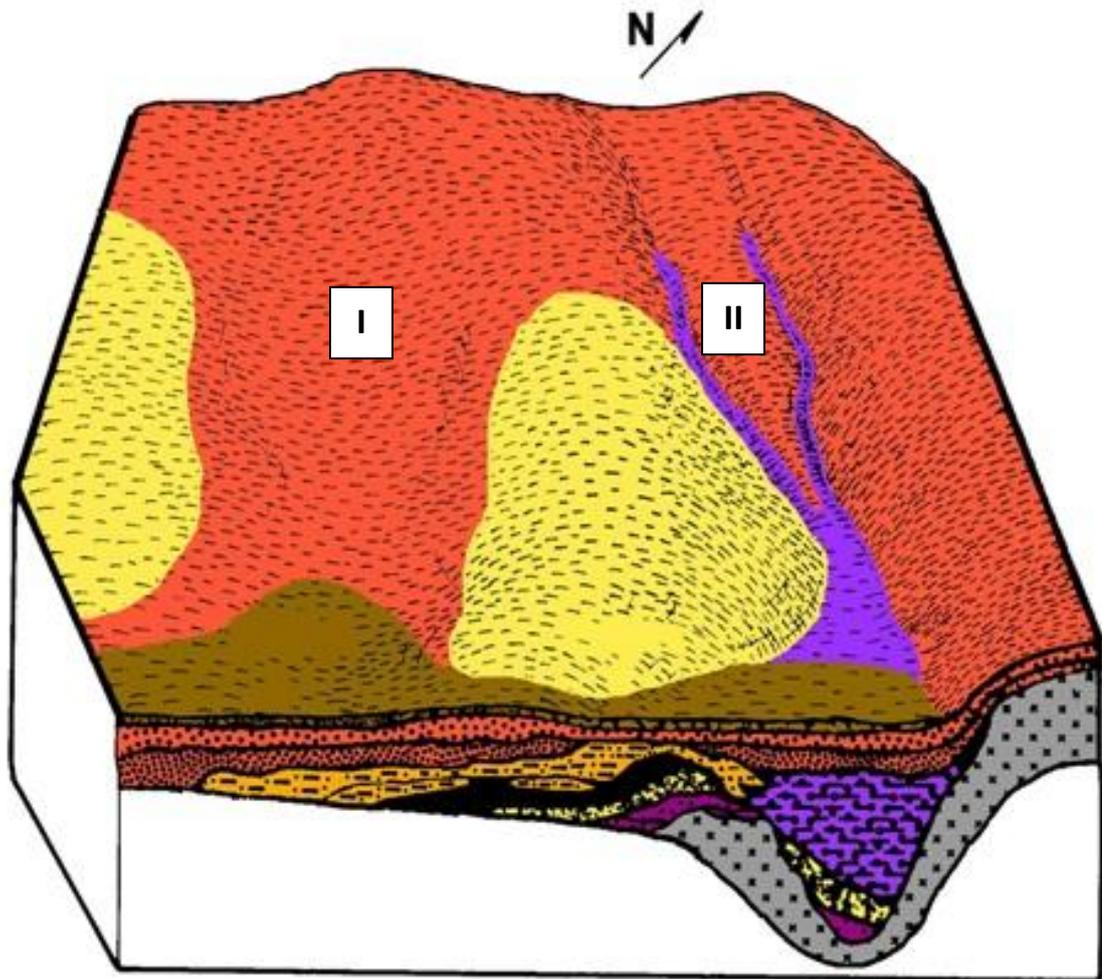


Figura 6.1 – Modelo morfológico (cabeceiras I e II) e aloestratigráfico para a localidade Bom Retiro (retirado de Peixoto, 2002). A legenda das unidades aloestratigráficas é apresentada na Figura 6.2.

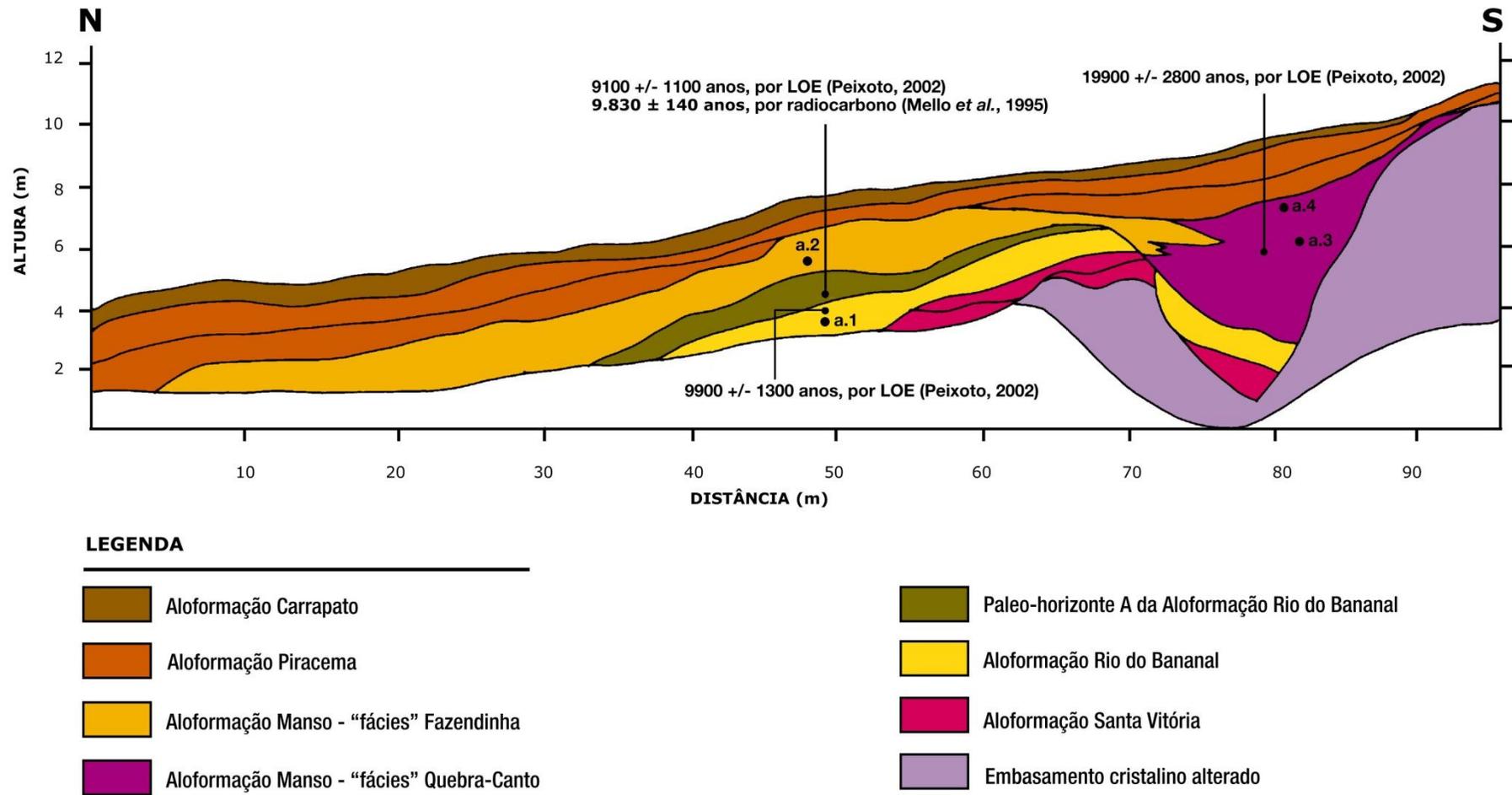


Figura 6.2 – Seção Bom Retiro (com datações anteriores) e localização das amostras investigadas no presente estudo (modificado de Peixoto, 2002).

Foram coletadas quatro amostras na seção Bom Retiro (Figura 6.2): BR(II)a.1, BR(II)a.2, BR(II)a.3, BR(II)a.4.

A amostra BR(II)a.1 (Figuras 6.2 e 6.3) constitui-se de colúvio argilo-arenoso amarelado, com grânulos de quartzo, mal-selecionado, associado à Aloformação Rio do Bananal. Foi coletada 80cm abaixo do paleohorizonte A que limita do topo desta unidade aloestratigráfica. Conforme relatado anteriormente, este paleohorizonte é datado em aproximadamente 10.000 anos segundo datações radiocarbono, sendo esperada, portanto, por sua posição estratigráfica abaixo do paleohorizonte, uma idade pleistocênica para a amostra BR(II)a.1.



Figura 6.3 – Posição de coleta da amostra BR(II)a.1, em depósitos coluviais pertencentes à Aloformação Rio do Bananal, 80cm abaixo do paleohorizonte A que limita o topo desta unidade.

Os dados obtidos com o protocolo MAR estão dispostos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Dados MAR para a amostra BR(II)a.1.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
BR II a1	2.063 $\pm$ 301	61,65	29.900 $\pm$ 5.900	116,52	56.500 $\pm$ 11.100
		101,59	49.300 $\pm$ 9.600		
		124,09	60.200 $\pm$ 11.800		
		178,74	86.700 $\pm$ 17.000		

Como é possível observar, a variação de idades entre as alíquotas foi bastante grande, embora todos os resultados sejam pleistocênicos e mais antigos do que a idade obtida por Peixoto (2002) para um nível estratigráfico logo abaixo do paleohorizonte A.

Os dados correspondentes a cada uma das alíquotas analisadas pelo protocolo SAR seguem abaixo (Tabela 6.2), verificando-se ainda uma variação bastante grande entre as idades. No entanto, estas idades, por serem pleistocênicas, estariam de acordo com o modelo estratigráfico.

Tabela 6.2 – Dados SAR para a amostra BR(II)a.1.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
BR II a1	2.063 $\pm$ 301	31,5 $\pm$ 4,4	15.270 $\pm$ 3.000	84,4	40.900 $\pm$ 8.000
		31,5 $\pm$ 4,4	15.270 $\pm$ 3.000		
		44,3 $\pm$ 4,3	21.480 $\pm$ 4.200		
		50,8 $\pm$ 2,1	24.630 $\pm$ 4.820		
		80,7 $\pm$ 2,5	39.130 $\pm$ 7.660		
		86,2 $\pm$ 4,0	41.790 $\pm$ 8.180		
		126,4 $\pm$ 8,6	61.280 $\pm$ 12.000		
		148,8 $\pm$ 13,9	72.140 $\pm$ 14.120		

A amostra BR(II)a.2 (Figuras 6.2 e 6.4) também possui natureza coluvial, tratando-se de material areno-argiloso amarelado relacionado à “fácies” Fazendinha da Aloformação

Manso. Esta amostra foi coletada 20cm acima do paleo-horizonte A que limita o topo da Aloformação Rio do Bananal.

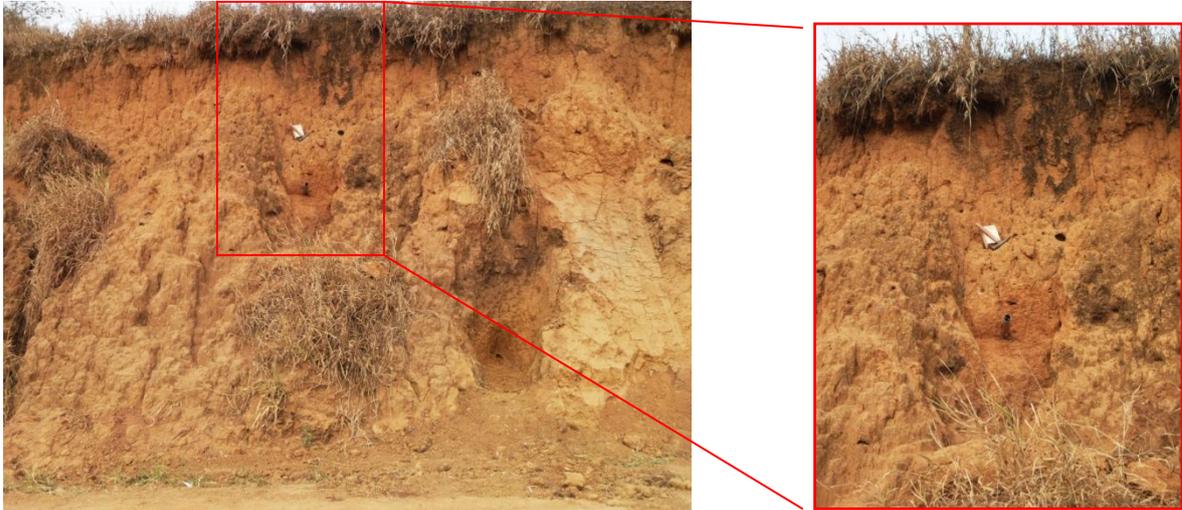


Figura 6.4 – Posição de coleta da amostra BR(II) a.2, em depósitos coluviais pertencentes à “fácies” Fazendinha da Aloformação Manso, 20cm acima do paleohorizonte A que limita o topo da Aloformação Rio do Bananal.

Os dados obtidos com o protocolo MAR são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Dados MAR para a amostra BR(II)a.2

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
BR II a2	2.153±466	17,32	8.100±2.100	39,28	18.300±4.900
		28,95	13.500±3.600		
		31,64	14.700±3.900		
		79,22	36.800±9.800		

Observa-se que a média dos resultados obtidos indica uma idade pleistocênica, o que está em desacordo com o modelo estratigráfico aceito para estes depósitos na região. Mais uma vez, observa-se uma grande variação de valores entre as alíquotas, podendo-se notar apenas uma idade (8.100+/- 2.100 anos) que seria aceitável frente ao modelo estratigráfico.

Os dados correspondentes à análise pelo protocolo SAR são apresentados na Tabela 6.4. Estes dados mostram uma amplitude de variação entre as idades bem menor do que aqueles obtidos pelo protocolo MAR. A idade média obtida, igual a  $4.800 \pm 1.300$  anos, está situada dentro do Holoceno, em concordância com o modelo estratigráfico.

Tabela 6.4 – Dados SAR para a amostra BR(II)a.2.

<b>Amostra</b>	<b>Dose Anual (<math>\mu\text{Gy}/\text{ano}</math>)</b>	<b>Dose Acumulada LOE (Gy)</b>	<b>Idade LOE (anos)</b>	<b>Dose acumulada MÉDIA (Gy)</b>	<b>Idade LOE MÉDIA (anos)</b>
<b>BR II a2</b>	<b>2.153<math>\pm</math>466</b>	<b>5,9<math>\pm</math>0,9</b>	<b>2.740<math>\pm</math>730</b>	<b>2.153<math>\pm</math>466</b>	<b>4.800<math>\pm</math>1.300</b>
		<b>6,3<math>\pm</math>0,2</b>	<b>2.930<math>\pm</math>780</b>		
		<b>8,8<math>\pm</math>1,3</b>	<b>4.090<math>\pm</math>1.090</b>		
		<b>11,8<math>\pm</math>2,2</b>	<b>5.480<math>\pm</math>1.460</b>		
		<b>12,3<math>\pm</math>1,5</b>	<b>5.710<math>\pm</math>1.520</b>		
		<b>13,6<math>\pm</math>1,5</b>	<b>6.320<math>\pm</math>1.680</b>		
		<b>13,6<math>\pm</math>3,1</b>	<b>6.320<math>\pm</math>1.680</b>		

As amostras BR(II)a.3 e BR(II)a.4 (Figuras 6.2 e 6.5) correspondem a depósitos alúvio-coluviais areno-argilosos, arroxeados, muito mal selecionados, associados à “fácies” Quebra-Canto da Aloformação Manso, de idade holocênica de acordo com as relações estratigráficas já consideradas.



Figura 6.5 – Posição de coleta das amostras BR(II) a.3 e BR(II)a. 4, situadas, respectivamente, a 3,5m e 2,2m abaixo do topo do terreno, em depósitos alúvio-coluviais da “fácies” Quebra-canto da Aloformação Manso.

As idades LOE obtidas pelo protocolo MAR para essas amostras indicaram idades pleistocênicas (Tabela 6.5). Estes dados estão em desacordo com o modelo estratigráfico disponível. Datação LOE, pelo protocolo SAR, apresentada por Peixoto (2002) para estes depósitos (Figura 6.2) indicou resultado semelhante ao alcançado para a amostra BR(II)a.4.

Tabela 6.5 – Dados MAR para as amostras BR(II)a.3 e BR(II)a.4.

Amostra	Dose Anual (Gy/ano)	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
BR II a3	1.723±181	120,85	70.200±10.900	171,32	99.400±15.500
		157,71	91.500±14.200		
		176,89	102.700±16.000		
		229,84	133.400±20.700		
BR II a4	1.879±329	29,10	15.500±3.500	36,35	19.400±4.400
		30,38	16.200±3.600		
		42,56	22.700±5.100		
		43,35	23.100±5.200		

A variação entre as idades MAR obtidas para as amostras BR(II)a.3 e BR(II)a.4 foi maior que os erros associados às medidas, sendo a variação na amostra BR(II)a.3 bem maior que na amostra BR(II)a.4.

Os dados obtidos pelo protocolo SAR são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Dados SAR para as amostras BR(II)a.3 e BR(II)a.4

<b>Amostra</b>	<b>Dose Anual (<math>\mu\text{Gy}/\text{ano}</math>)</b>	<b>Dose Acumulada LOE (Gy)</b>	<b>Idade LOE (anos)</b>	<b>Dose acumulada MÉDIA (Gy)</b>	<b>Idade LOE MÉDIA (anos)</b>
<b>BR II a3</b>	<b>1.723<math>\pm</math>181</b>	<b>15,6<math>\pm</math>10,8</b>	<b>9.060<math>\pm</math>1.400</b>	<b>28,6</b>	<b>16.600<math>\pm</math>2.600</b>
		<b>23,0<math>\pm</math>1,4</b>	<b>13.350<math>\pm</math>2.070</b>		
		<b>25,6<math>\pm</math>1,2</b>	<b>14.860<math>\pm</math>2.310</b>		
		<b>26,9<math>\pm</math>5,6</b>	<b>15.610<math>\pm</math>2.430</b>		
		<b>28,2<math>\pm</math>6,7</b>	<b>16.370<math>\pm</math>2.540</b>		
		<b>30,2<math>\pm</math>3,7</b>	<b>17.530<math>\pm</math>2.720</b>		
		<b>50,9<math>\pm</math>1,7</b>	<b>29.540<math>\pm</math>4.590</b>		
<b>BR II a4</b>	<b>1.879<math>\pm</math>329</b>	<b>10,6<math>\pm</math>0,5</b>	<b>5.640<math>\pm</math>1.270</b>	<b>15,3</b>	<b>8.200<math>\pm</math>1.800</b>
		<b>11,3<math>\pm</math>0,9</b>	<b>6.020<math>\pm</math>1.350</b>		
		<b>12,9<math>\pm</math>0,6</b>	<b>6.870<math>\pm</math>1.550</b>		
		<b>13,2<math>\pm</math>0,3</b>	<b>7.030<math>\pm</math>1.580</b>		
		<b>15,7<math>\pm</math>2,4</b>	<b>8.360<math>\pm</math>1.880</b>		
		<b>16,6<math>\pm</math>2,8</b>	<b>8.840<math>\pm</math>1.990</b>		
		<b>18,2<math>\pm</math>2,5</b>	<b>9.690<math>\pm</math>2.180</b>		
		<b>24,2<math>\pm</math>2,0</b>	<b>12.880<math>\pm</math>2.900</b>		

Para ambas as amostras, devido a suas posições estratigráficas acima do paleohorizonte A da Aloformação Rio do Bananal, seriam esperadas idades holocênicas. No entanto, apenas a idade média obtida para as alíquotas analisadas na amostra BR(II)a.4 está de acordo com o esperado. Na amostra BR(II)a.3, apenas a idade (9.060 $\pm$ 1.400 anos) de uma alíquota seria condizente com o modelo estratigráfico anteriormente discutido. Na amostra BR(II) a.4, excetuando-se o valor de 12.880 $\pm$ 2.900 anos, as demais idades são compatíveis com o modelo. Apesar disso, ambas as amostras apresentam variação de idades maior que o erro associado às análises, ainda que menores se comparados às amostras BR(II)a.1 e BR(II)a.2.

## 6.2 Localidade Cotiara - WGS84 23K 0582844 / 7503973

Na localidade Cotiara foi investigada uma seção exposta em um corte longitudinal a uma cabeceira de drenagem em anfiteatro entulhada, com um padrão deposicional caracterizado pelo predomínio de depósitos arenosos maciços, com grânulos dispersos e frequentes níveis de cascalhos. As características sedimentares observadas sugerem o predomínio de processos gravitacionais de encosta, com participação restrita de escoamento superficial (Mello, 1992).

Quatro datações por radiocarbono foram realizadas nesta localidade (Figura 6.6). Mello (1992) datou fragmentos vegetais carbonizados no paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal, obtendo como resultado a idade de 9.900 +/- 260 anos AP. Mello *et al.* (1995) realizaram a datação deste paleo-horizonte A (idade da matéria orgânica), tendo sido apresentada a idade de 9.680 +/- 90 anos AP. Um paleo-horizonte orgânico na Aloformação Manso foi datado por Mello *et al.* (1995) em 8.510 +/- 130 anos AP. Fragmentos vegetais carbonizados na base da Aloformação Carrapato também foram datados por Mello *et al.* (1995), obtendo a idade de 160 +/- 60 anos AP.

As amostras analisadas no presente estudo nesta localidade correspondem a depósitos alúvio-coluviais - amostras Cotiara (II) a.1 e Cotiara (II) a.2 - e depósitos coluviais - amostra Cotiara (II) a.3 da Aloformação Manso (Figuras 6.6 e 6.7). A amostra Cotiara (II) a.1 foi coletada 35cm abaixo do paleo-horizonte orgânico presente no intervalo inferior dos depósitos aflorantes da Aloformação Manso. A amostra Cotiara(II)a.2 foi coletada 65cm acima de um nível de cascalhos no intervalo de depósitos alúvio-coluviais sobre o referido paleo-horizonte orgânico. A amostra Cotiara(II)a.3 foi coletada 1,2m abaixo do topo do afloramento.

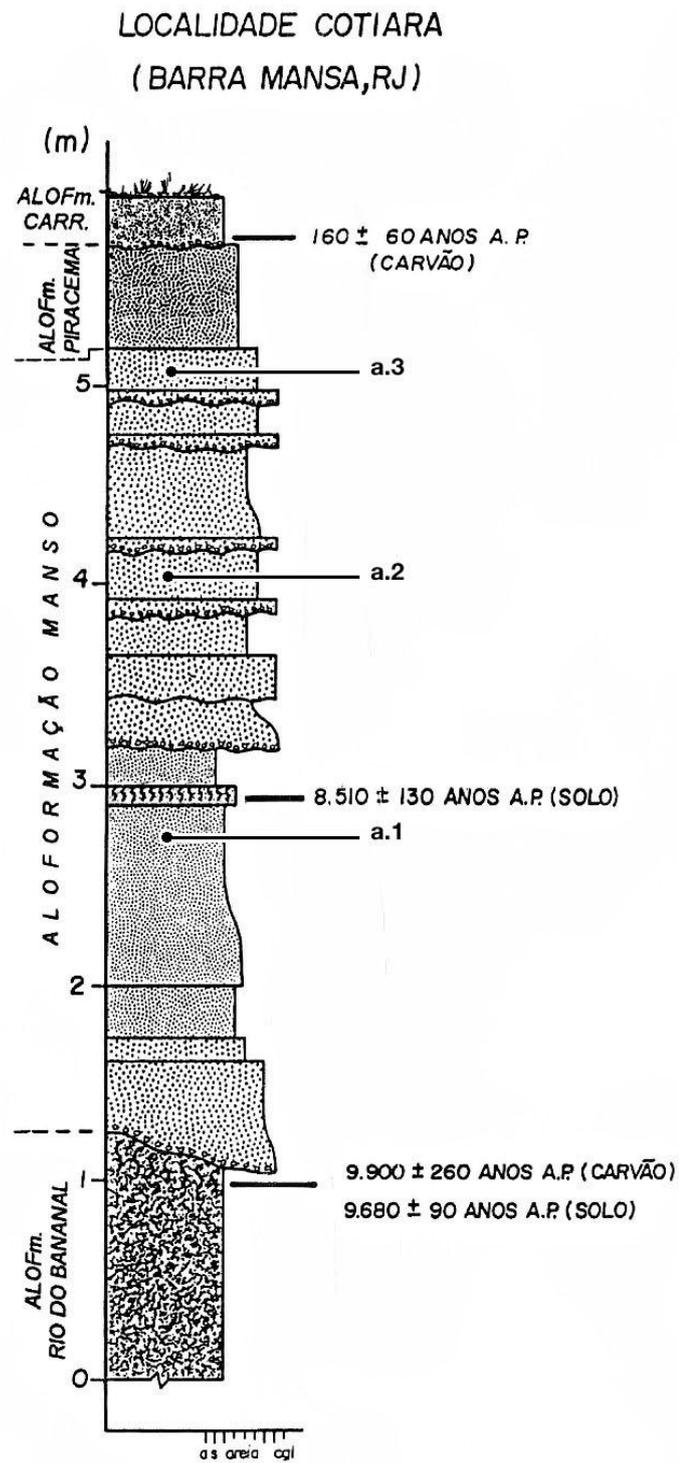


Figura 6.6 – Perfil estratigráfico da seção Cotiara (Mello, 1992), com a indicação da localização das amostras investigadas no presente estudo.



Figura 6.7 – Posição de coleta das amostras Cotiara (II)a.1, Cotiara (II)a.2 e Cotiara(II)a.3 na localidade Cotiara.

Os dados obtidos pelo protocolo MAR para as amostras analisadas na localidade Cotiara encontram-se organizados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Dados MAR para as amostras Cotiara (II)a.1, Cotiara (II)a.2 e Cotiara(II)a.3.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Cotiara II a.1	4.287 $\pm$ 518	31,28	7.300 $\pm$ 1.300	48,38	11.300 $\pm$ 1.900
		39,87	9.300 $\pm$ 1.600		
		53,89	12.600 $\pm$ 2.200		
		68,46	16.000 $\pm$ 2.700		
Cotiara II a.2	7.126 $\pm$ 1.112	82,39	11.600 $\pm$ 2.400	97,15	13.600 $\pm$ 2.800
		100,31	14.100 $\pm$ 2.900		
		108,75	15.300 $\pm$ 3.100		
		218,68	30.700 $\pm$ 6.300		
Cotiara II a.3	5.133 $\pm$ 768	78,08	15.200 $\pm$ 3.000	121,31	23.600 $\pm$ 4.700
		106,90	20.800 $\pm$ 4.200		
		178,94	34.900 $\pm$ 7.000		
		255,04	49.700 $\pm$ 9.900		

Nenhuma das idades médias apresentadas corresponde ao modelo estratigráfico disponível, que indica idade holocênica para os depósitos da Aloformação Manso, já que se encontram em posição estratigráfica acima do paleo-horizonte A do topo da Aloformação Rio do Bananal. Os resultados obtidos indicaram idades mais antigas, com variações significativas entre os valores das alíquotas nas três amostras. Apenas duas alíquotas da amostra Cotiara (II)a.1 indicaram idades holocênicas, sendo que apenas uma delas (9.300 $\pm$ 1.600 anos) estaria condizente com as idades radiocarbono disponíveis.

Os dados SAR das amostras Cotiara (II)a.1, Cotiara(II)a.2 e Cotiara (II)a.3 estão apresentados na Tabela 6.8. A variação de idades entre as alíquotas, para as três amostras, foi menor em comparação com o protocolo MAR.

A idade média obtida para a amostra Cotiara(II)a.1 é compatível dentro do contexto estratigráfico (Figura 6.6), sendo que apenas uma das alíquotas desta amostra apresentou idade concordante (9.400 $\pm$ 1.600) com as datações radiocarbono anteriores (Figura 6.6). A idade média apresentada para a amostra Cotiara(II)a.2 também está de acordo com o modelo estratigráfico, e apenas as idades de três alíquotas (9.000 $\pm$ 1.850, 9.140 $\pm$ 1.880,

9.980±2.060) encontram-se fora de uma faixa de idades compatível. A amostra Cotiara(II)a.3, no entanto, apresentou idade média mais antiga que o esperado e também mais antiga do que os níveis estratigraficamente inferiores, sendo que apenas duas das alíquotas analisadas estariam em uma faixa de idades possíveis.

Tabela 6.8 – Idades SAR para as amostras Cotiara (II)a.1, Cotiara(II)a.2 e Cotiara (II)a.3.

Amostra	Dose Anual (μGy/ano)	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Cotiara II a.1	4.287±518	11,1±3,0	2.590±440	40,1	9.350±1.600
		24,1±13,1	5.620±960		
		40,3±13,6	9.400±1.600		
		42,9±9,0	10.000±1.700		
		52,9±16,7	12.340±2.100		
		54,1±11,0	12.600±2.150		
		55,3±9,9	12.900±2.200		
Cotiara II a.2	7.126±1.112	22,7±1,7	3.190±660	48,0	6.700±1.400
		30,4±3,8	4.270±880		
		41,5±4,1	5.820±1.200		
		43,8±5,4	6.150±1.270		
		45,3±3,9	6.360±1.310		
		63,9±5,7	9.000±1.850		
		65,1±3,8	9.140±1.880		
Cotiara II a.3	5.133±768	16,8±5,3	3.270±650	66,6	13.000±2.600
		29,6±2,1	5.770±1.150		
		47,0±2,6	9.160±1.830		
		59,2±5,0	11.530±2.300		
		83,8±6,2	16.330±3.260		
		88,9±7,6	17.320±3.460		
		96,6±9,5	18.820±3.760		
		111,0±6,4	21.630±4.320		

### 6.3 Localidade Campinho – WGS84 23K 0568240 / 7495702

A localidade Campinho comporta três seções estudadas: Campinho A, Campinho B e Campinho C (ver Figura 6.8). Esta localidade constitui uma área plana, relacionada ao terraço fluvial superior, que representa uma superfície de entulhamento holocênico dos vales fluviais, relacionado aos depósitos da Aloformação Manso.



6.8 – Localização das seções Campinho A, Campinho B e Campinho

### 6.3.1 Seção Campinho A

A seção Campinho A corresponde a um corte de estrada na zona de articulação entre o domínio de encostas e o terraço fluvial (Mello, 1992). Nesta seção foi coletada a amostra Campinho (II)A a.4, correspondendo a depósitos coluviais relacionados à “fácies” Fazendinha da Aloformação Manso. Esta amostra foi coletada 55cm abaixo de um paleo-horizonte orgânico que limita o topo destes depósitos (Figura 6.9).

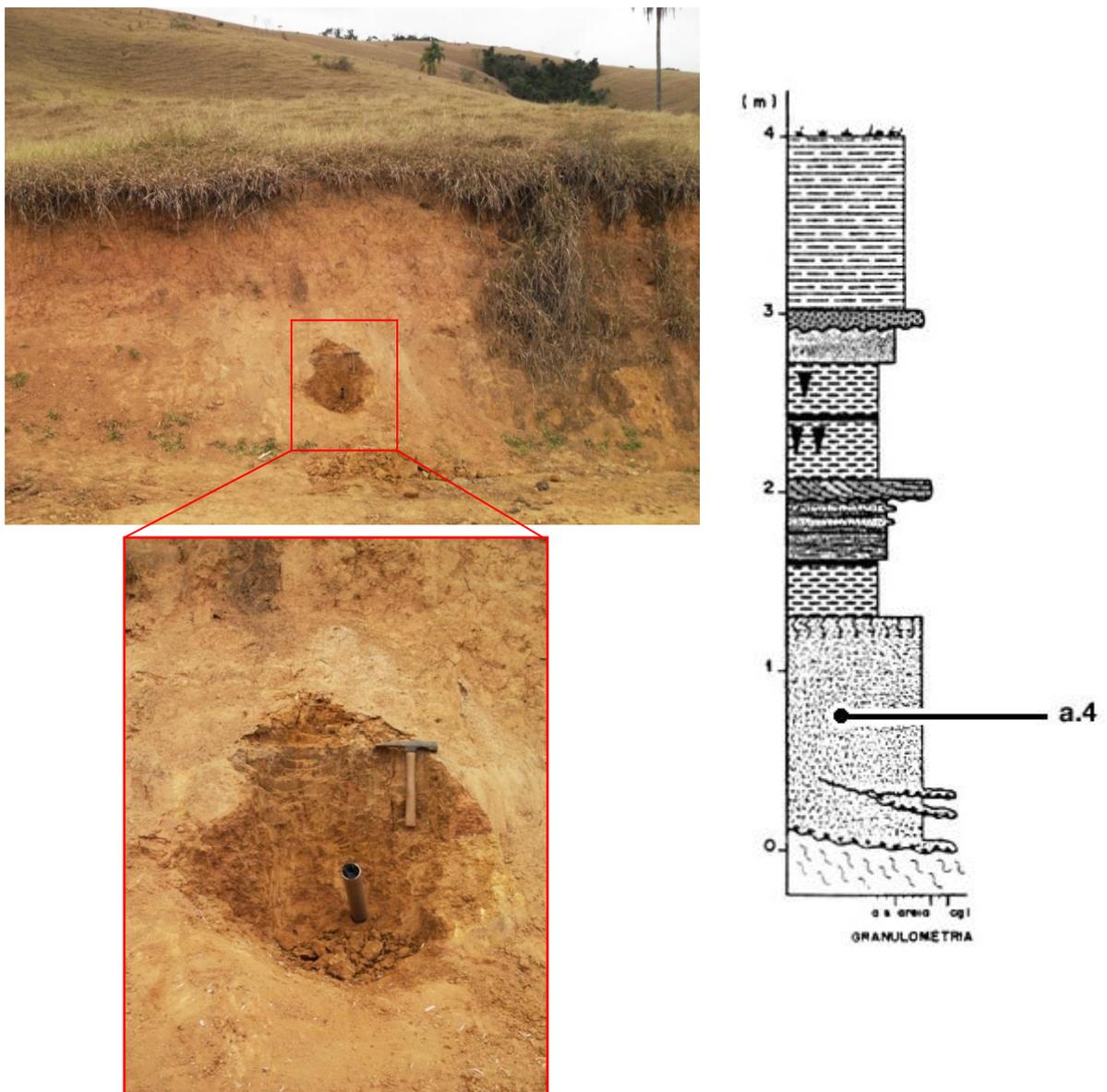


Figura 6.9 - Posição de coleta da amostra Campinho (II)A a.4, pertencente a depósitos coluviais da “fácies” Fazendinha da Aloformação Manso, situada 55cm abaixo do paleo-horizonte orgânico que limita o topo destes depósitos. À direita, perfil Campinho (II) A (Mello, 1992).

Os dados obtidos pelo protocolo MAR para a amostra Campinho(II)A a.4 estão dispostos na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Dados MAR para a amostra Campinho(II)A a.4.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Campinho II A a.4	4.095 $\pm$ 567	56,82	13.900 $\pm$ 2.600	146,65	35.800 $\pm$ 6.800
		89,63	21.900 $\pm$ 4.100		
		205,88	50.300 $\pm$ 9.500		
		234,25	57.200 $\pm$ 10.800		

A idade média obtida, assim como as idades de cada alíquota, não é concordante com o que seria esperado com base no modelo estratigráfico disponível, que indica idade holocênica para os depósitos da Aloformação Manso. A variação de idades entre as alíquotas é bastante alta.

Os registros de idades das alíquotas analisadas por SAR para essa amostra estão organizados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Dados SAR para a amostra Campinho(II)A a.4.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Campinho II A a.4	4.095 $\pm$ 567	26,2 $\pm$ 0,9	6.400 $\pm$ 1.210	58,00	14.200 $\pm$ 2.700
		31,1 $\pm$ 1,5	7.600 $\pm$ 1.430		
		41,7 $\pm$ 5,1	10.180 $\pm$ 1.920		
		43,1 $\pm$ 2,6	10.530 $\pm$ 1.980		
		51,6 $\pm$ 3,0	12.600 $\pm$ 2.380		
		59,3 $\pm$ 2,0	14.480 $\pm$ 2.730		
		75,6 $\pm$ 10,5	18.460 $\pm$ 3.480		
		135,1 $\pm$ 5,1	33.000 $\pm$ 6.220		

A idade média obtida pelo protocolo SAR também não está de acordo com o modelo estratigráfico. Embora a variação de idades entre as alíquotas seja menor que a apresentada

no protocolo MAR, ainda é bem maior que os erros a elas associados. Apenas duas alíquotas apresentaram idades ( $6.400 \pm 1.210$  e  $7.600 \pm 1.430$ ) compatíveis com o modelo.

### 6.3.2 Seção Campinho B

A seção Campinho (II) B corresponde a uma parede exposta em corte de estrada exibindo o pacote sedimentar do nível superior do terraço fluvial (Mello, 1992).

Foram coletadas nesta seção as amostras Campinho(II)B a.5 e Campinho(II)B a.6, correspondendo a areias fluviais (alúvios) oxidadas da “fácies” Campinho da Aloformação Manso, intercaladas a intervalos de argilas sílticas. A amostra Campinho(II)B a.5 foi coletada em um intervalo arenoso próximo à base do perfil; a amostra Campinho(II)B a.6 foi coletada 1m abaixo do topo do solo atual (Figura 6.10).

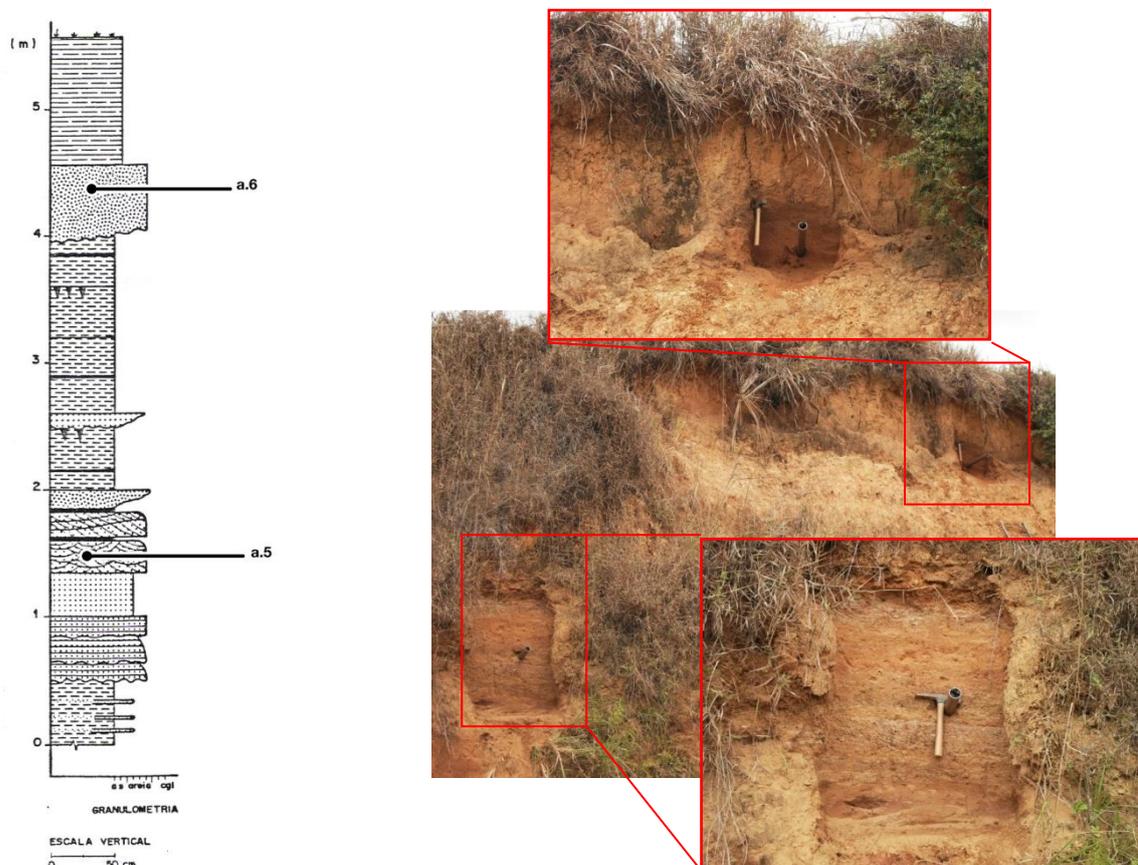


Figura 6.10 – Seção Campinho II B (adaptado de Mello, 1992); à direita, posição de coleta das amostras Campinho (II)B a.5 e Campinho (II) B a.6.

As idades obtidas através do protocolo MAR para as amostras Campinho (II)B a.5 e Campinho (II)B a.6 estão na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Dados MAR para as amostras Campinho (II)B a.5 e Campinho (II)B a.6.

<b>Amostra</b>	<b>Dose Anual (<math>\mu\text{Gy}/\text{ano}</math>)</b>	<b>Dose Acumulada LOE (Gy)</b>	<b>Idade LOE (anos)</b>	<b>Dose acumulada MÉDIA (Gy)</b>	<b>Idade LOE MÉDIA (anos)</b>
<b>Campinho II B a.5</b>	<b>805<math>\pm</math>107</b>	<b>11,98</b>	<b>14.900<math>\pm</math>2.700</b>	<b>55,40</b>	<b>68.800<math>\pm</math>12.600</b>
		<b>57,76</b>	<b>71.700<math>\pm</math>13.100</b>		
		<b>61,81</b>	<b>76.800<math>\pm</math>14.100</b>		
		<b>90,06</b>	<b>111.900<math>\pm</math>20.500</b>		
<b>Campinho II B a.6</b>	<b>823<math>\pm</math>81</b>	<b>1,53</b>	<b>1.900<math>\pm</math>300</b>	<b>3,76</b>	<b>4.600<math>\pm</math>700</b>
		<b>3,77</b>	<b>4.600<math>\pm</math>700</b>		
		<b>5,99</b>	<b>7.300<math>\pm</math>1.100</b>		
		<b>42,09</b>	<b>51.200<math>\pm</math>7.600</b>		

De acordo com o modelo estratigráfico, as idades esperadas para estas amostras estariam dentro do Holoceno. No entanto, o resultado da datação apontou apenas a amostra Campinho (II)B a.6 como holocênica.

Como é possível notar, a variação entre as alíquotas de uma mesma amostra é bastante grande. Na amostra Campinho (II)B a.6, há três idades (1.900 $\pm$ 300, 4.600 $\pm$ 700 e 7.300 $\pm$ 1.100) que estariam de acordo com o modelo estratigráfico. Na amostra Campinho (II)B a.5, nenhuma das idades corresponderia ao modelo estratigráfico disponível.

Os dados SAR de cada uma das alíquotas estão apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Dados SAR para as amostras Campinho (II)B a.5 e Campinho (II)B a.6.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Campinho II B a.5	805 $\pm$ 107	3,8 $\pm$ 0,0	4.720 $\pm$ 860	10,0	12.400 $\pm$ 2.300
		6,3 $\pm$ 6,4	7.830 $\pm$ 1.430		
		6,8 $\pm$ 0,0	8.450 $\pm$ 1.550		
		8,5 $\pm$ 9,6	10.560 $\pm$ 1.930		
		11,6 $\pm$ 5,9	14.410 $\pm$ 2.640		
		15,9 $\pm$ 3,0	19.750 $\pm$ 3.610		
		17,3 $\pm$ 1,1	21.490 $\pm$ 3.930		
Campinho II B a.6	823 $\pm$ 81	5,6 $\pm$ 4,7	6.810 $\pm$ 1.010	7,2	8.800 $\pm$ 1.300
		6,9 $\pm$ 1,2	8.390 $\pm$ 1.250		
		7,3 $\pm$ 0,6	8.870 $\pm$ 1.320		
		7,3 $\pm$ 1,2	8.870 $\pm$ 1.320		
		8,9 $\pm$ 4,0	10.820 $\pm$ 1.610		

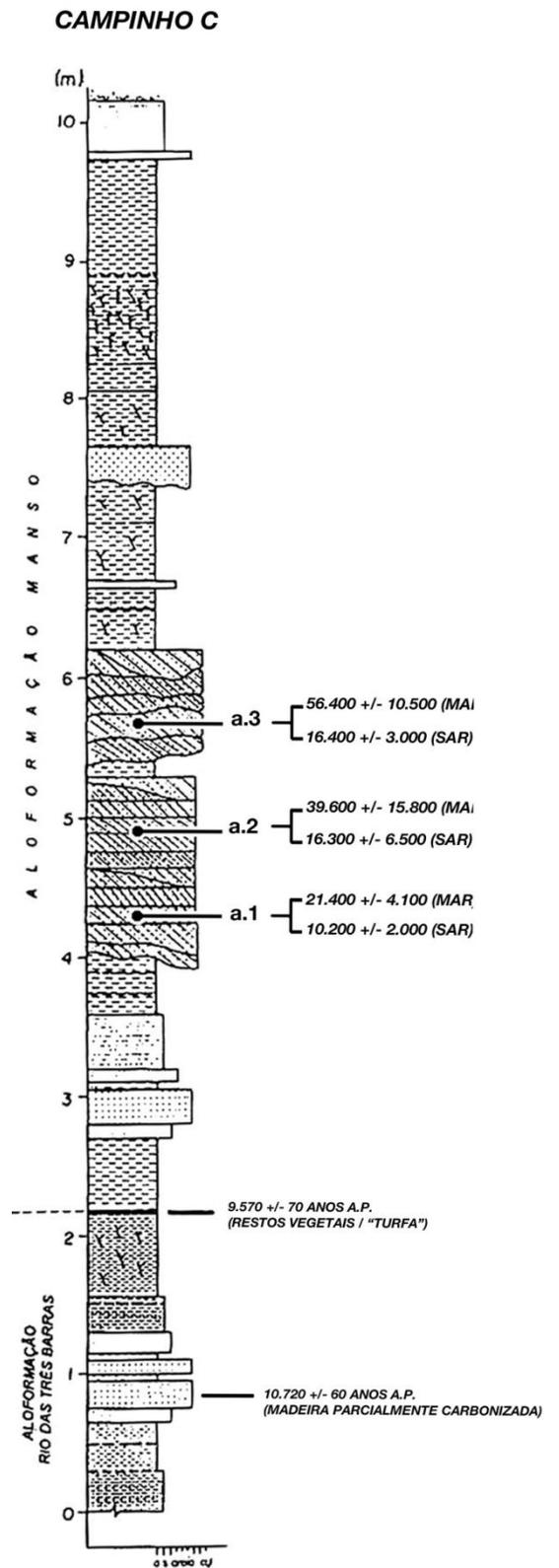
A idade média obtida pelo protocolo SAR para a amostra Campinho (II)B a.5 não está dentro da faixa que seria esperada com base nas relações estratigráficas já discutidas. Três alíquotas desta amostra apresentaram idades condizentes com o esperado (4.720 $\pm$ 860, 7.830 $\pm$ 1.430, 8.450 $\pm$ 1.550). A variação entre as idades das alíquotas foi alta, mas muito mais baixa que a variação apresentada pelo protocolo MAR.

A idade média apresentada para a amostra Campinho (II)B a.6 situa-se no Holoceno, o que está em concordância com o esperado. A variação entre as alíquotas foi bem menor comparada ao protocolo MAR e também quando comparada a outras amostras analisadas pelo protocolo SAR no presente estudo.

### 6.3.3 Seção Campinho C

As amostras coletadas na seção Campinho (II)C - Campinho(II)C a.1, Campinho(II)C a.2 e Campinho(II)C a.3 – assim como aquelas coletadas na seção Campinho (II)B, correspondem a depósitos fluviais arenosos da “fácies” Campinho da Aloformação Manso.

Nesta seção, Mello *et al.* (1995) dataram por radiocarbono turfa coletada a 770cm de profundidade, no topo da Aloformação Rio das Três Barras, e obtiveram a idade de 9.570 +/- 70 anos AP (Figura 6.11). Barros (2003) datou, por radiocarbono, madeira parcialmente carbonizada, também na Aloformação Rio das Três Barras, a 912cm de profundidade, obtendo a idade de 10.720 +/- 60 anos AP (Figura 6.11).



Os dados obtidos pelo protocolo MAR estão dispostos na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Dados MAR para as amostras Campinho(II)C a.1, Campinho(II)C a.2 e Campinho(II)C a.3.

<b>Amostra</b>	<b>Dose Anual (<math>\mu</math>Gy/ano)</b>	<b>Dose Acumulada LOE (Gy)</b>	<b>Idade LOE (anos)</b>	<b>Dose acumulada MÉDIA (Gy)</b>	<b>Idade LOE MÉDIA (anos)</b>
<b>Campinho II C a.1</b>	<b>501<math>\pm</math>71</b>	<b>5,86</b>	<b>11.700<math>\pm</math>2.300</b>	<b>10,74</b>	<b>21.400<math>\pm</math>4.100</b>
		<b>9,91</b>	<b>19.800<math>\pm</math>3.800</b>		
		<b>12,51</b>	<b>25.000<math>\pm</math>4.800</b>		
		<b>14,69</b>	<b>29.300<math>\pm</math>5.600</b>		
<b>Campinho II C a.2</b>	<b>713<math>\pm</math>250</b>	<b>19,35</b>	<b>27.200<math>\pm</math>10.900</b>	<b>28,19</b>	<b>39.600<math>\pm</math>15.800</b>
		<b>19,79</b>	<b>27.800<math>\pm</math>11.100</b>		
		<b>32,13</b>	<b>45.100<math>\pm</math>18.000</b>		
		<b>41,47</b>	<b>58.200<math>\pm</math>23.300</b>		
<b>Campinho II C a.3</b>	<b>879<math>\pm</math>119</b>	<b>7,52</b>	<b>8.600<math>\pm</math>1.600</b>	<b>49,57</b>	<b>56.400<math>\pm</math>10.500</b>
		<b>22,06</b>	<b>25.100<math>\pm</math>4.700</b>		
		<b>83,94</b>	<b>95.500<math>\pm</math>17.700</b>		
		<b>84,77</b>	<b>96.400<math>\pm</math>17.900</b>		

Segundo o modelo estratigráfico disponível, as três amostras deveriam apresentar idades holocênicas. Os resultados obtidos pelo protocolo MAR, entretanto, apresentaram idades mais antigas que o esperado. Além disso, é possível observar uma inversão na ordem das idades, considerando os níveis estratigráficos amostrados: a amostra Campinho(II)C a.1, que está em um nível estratigráfico inferior em relação às demais, foi datada com a menor idade entre as três amostras; a amostra Campinho(II)C a.3, por sua vez, está estratigraficamente acima das demais, mas a idade obtida pelo protocolo MAR foi a mais antiga. Pode-se observar também uma variação muito grande entre as quatro alíquotas de cada amostra. Dentre os dados obtidos para todas as alíquotas analisadas, o único que corresponde a uma idade holocênica é o de 8.600 $\pm$ 1.600 anos, referente a uma das alíquotas da amostra Campinho(II)C a.3.

Os dados SAR referentes a cada uma das alíquotas estão na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Dados SAR para as amostras Campinho(II)C a.1, Campinho(II)C a.2 e Campinho(II)C a.3.

Amostra	Dose Anual ( $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ )	Dose Acumulada LOE (Gy)	Idade LOE (anos)	Dose acumulada MÉDIA (Gy)	Idade LOE MÉDIA (anos)
Campinho II C a.1	501 $\pm$ 71	3,4 $\pm$ 0,4	6.790 $\pm$ 1.310	5,1	10.200 $\pm$ 2.000
		4,5 $\pm$ 0,6	8.980 $\pm$ 1.730		
		4,5 $\pm$ 0,5	8.980 $\pm$ 1.730		
		5,3 $\pm$ 0,3	10.580 $\pm$ 2.040		
		5,3 $\pm$ 0,7	10.580 $\pm$ 2.040		
		5,6 $\pm$ 0,4	11.180 $\pm$ 2.150		
		5,6 $\pm$ 0,4	11.180 $\pm$ 2.150		
		6,4 $\pm$ 0,4	12.770 $\pm$ 2.460		
Campinho II C a.2	713 $\pm$ 250	7,1 $\pm$ 0,5	9.960 $\pm$ 3.990	11,6	16.300 $\pm$ 6.500
		8,8 $\pm$ 0,4	12.350 $\pm$ 4.940		
		9,2 $\pm$ 0,2	12.910 $\pm$ 5.170		
		9,9 $\pm$ 0,6	13.890 $\pm$ 5.560		
		11,4 $\pm$ 1,1	15.990 $\pm$ 6.400		
		12,9 $\pm$ 0,3	18.100 $\pm$ 7.240		
		16,0 $\pm$ 0,9	22.450 $\pm$ 8.990		
		17,2 $\pm$ 0,5	24.130 $\pm$ 9.660		
Campinho II C a.3	879 $\pm$ 119	8,0 $\pm$ 0,5	9.100 $\pm$ 1.690	14,4	16.400 $\pm$ 3.000
		8,5 $\pm$ 0,4	9.670 $\pm$ 1.790		
		11,4 $\pm$ 1,0	12.970 $\pm$ 2.400		
		12,2 $\pm$ 0,4	13.880 $\pm$ 2.570		
		15,7 $\pm$ 0,6	17.860 $\pm$ 3.310		
		16,3 $\pm$ 2,3	18.540 $\pm$ 3.440		
		19,8 $\pm$ 2,9	22.520 $\pm$ 4.180		
		23,4 $\pm$ 2,5	26.620 $\pm$ 4.940		

Assim como no protocolo MAR, os dados obtidos pelo protocolo SAR também não estão condizentes com o modelo estratigráfico disponível, já que apontaram idades médias mais antigas que o esperado. Mais uma vez, a amostra Campinho (II)a.1 apresentou a menor idade dentre as três amostras, embora fosse esperado, devido à sua posição estratigráfica em relação às demais, que apresentasse o maior valor. Apenas seis alíquotas, no total, apontaram idades concordantes com o modelo estratigráfico: 6.790 $\pm$ 1.310, 8.980 $\pm$ 1.730, 8.980 $\pm$ 1.730 para a amostra Campinho(II)a.1; 9.960 $\pm$ 3.990 para a amostra Campinho (II)a.2; e 9.100 $\pm$ 1.690 e 9.670 $\pm$ 1.790 para a amostra Campinho (II)a.3. A amostra Campinho (II)a.1 é a que apresenta menor dispersão entre os valores das alíquotas.

#### 6.4 Discussões

As localidades estudadas são representativas dos diferentes padrões sedimentares descritos para a Aloformação Manso (Moura e Mello, 1991; Mello, 1992), como pode ser visualizado na Figura 6.12, estando os materiais investigados sobre marcadores estratigráficos/cronológicos regionais (paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do Bananal ou sedimentos orgânicos da Aloformação Rio das Três Barras, ambos datados em aproximadamente 10.000 anos AP). Com base nisso, é feita uma tentativa, neste item, de se discutir o valor cronológico das idades LOE obtidas para os depósitos da Aloformação Manso. São consideradas apenas as idades médias encontradas com o protocolo SAR, tendo em vista a maior dispersão nas idades das alíquotas analisadas pelo protocolo MAR (conforme apresentado por localidade nos itens anteriores). Deve-se ressaltar que são conhecidas as limitações para a análise das médias mesmo com dados SAR, devido à dispersão dos dados.

A localidade Bom Retiro exhibe depósitos coluviais e alúvio-coluviais das “fácies” Fazendinha e Quebra-Canto, enquanto a localidade Cotiara apresenta depósitos alúvio-coluviais da “fácies” Quebra-Canto. Nestas duas localidades, os depósitos da Aloformação Manso ocorrem sobre os colúvios da Aloformação Rio do Bananal e abaixo dos colúvios das aloformações Piracema e Carrapato. Os dados obtidos nestas duas localidades podem ser discutidos quanto ao seu valor como indicadores cronológicos para a Aloformação Manso, especialmente no que se refere aos depósitos alúvio-coluviais. As idades médias encontradas pelo protocolo SAR variam, na localidade Bom Retiro, entre  $16.600 \pm 2.600$  e  $8.200 \pm 1.800$  anos e, na localidade Cotiara, entre  $13.000 \pm 2.600$  e  $6.700 \pm 1.400$  anos. Considerando-se a idade máxima possível para estes depósitos em torno de 10.000 anos AP (idade radiocarbono aproximada do paleo-horizonte A no topo da Aloformação Rio do

Bananal), não podem ser aceitas as idades mais antigas que este valor. A menor idade média obtida para estes depósitos ( $6.700 \pm 1.400$  anos) pode indicar que a idade mínima não seria muito menor. A amostra Bom Retiro (II)a.2 – depósito coluvial da “fácies” Fazendinha da Aloformação Manso, situada em nível estratigráfico equivalente aos depósitos alúvio-coluviais, apresentou idade média de  $4.800 \pm 1.300$  anos, que é menor que a idade média mínima anteriormente citada para os depósitos alúvio-coluviais. Considerando os erros associados às medidas, apenas uma idade média - Bom Retiro(II)a.3 – não alcançaria uma faixa de idade aceitável.

A localidade Campinho é representativa dos depósitos aluviais da “fácies” Campinho da Aloformação Manso, com a presença, no perfil Campinho A, de depósitos coluviais da “fácies” Fazendinha. Estes depósitos estão estratigraficamente acima de um nível com restos vegetais datados por radiocarbono em  $9.570 \pm 70$  anos AP, pertencente à Aloformação Rio das Três Barras. As idades médias obtidas pelo protocolo SAR nas três seções analisadas nesta localidade estão discrepantes em relação ao marcador estratigráfico considerado, com exceção da amostra Campinho (II)B a.6 ( $8.800 \pm 1.300$  anos). Considerando os erros associados às medidas, a amostra Campinho (II)C a.1 também se torna compatível com os dados radiocarbono presentes na seção (ver Figura 6.12).

Considerando que em todas as localidades há marcadores estratigráficos confiáveis obtidos pelo método do radiocarbono e o fato de as idades mais novas indicarem os eventos mais recentes, foi feita uma análise considerando apenas as médias de idades das alíquotas cujos resultados são compatíveis com os dados de radiocarbono, sem considerar as incertezas associadas (Tabela 6.14). É possível verificar que, com a exclusão de dados discrepantes em relação às idades radiocarbono, os resultados tornam-se bem mais

aceitáveis dentro do contexto estratigráfico, ainda com exceção das seções Campinho B - onde surge uma inversão das idades - e Campinho C.

Tabela 6.14 – Idades médias (protocolo SAR) obtidas considerando-se apenas alíquotas cujos resultados são compatíveis com os dados de radiocarbono disponíveis.

<b>Amostra</b>	<b>Idade média (anos)</b>
Bom Retiro (II)a.1	40.900
Bom Retiro (II)a.2	4.800
Bom Retiro (II)a.3	9.060
Bom Retiro (II)a.4	7.492
Cotiara (II)a.1	9.400
Cotiara (II)a.2	5.158
Cotiara (II)a.3	4.520
Campinho (II)C a.1	8.250
Campinho (II)C a.2	9.960
Campinho (II)C a.3	9.385
Campinho (II)A a.4	7.000
Campinho (II)B a.5	7.000
Campinho (II)B a.6	8.235

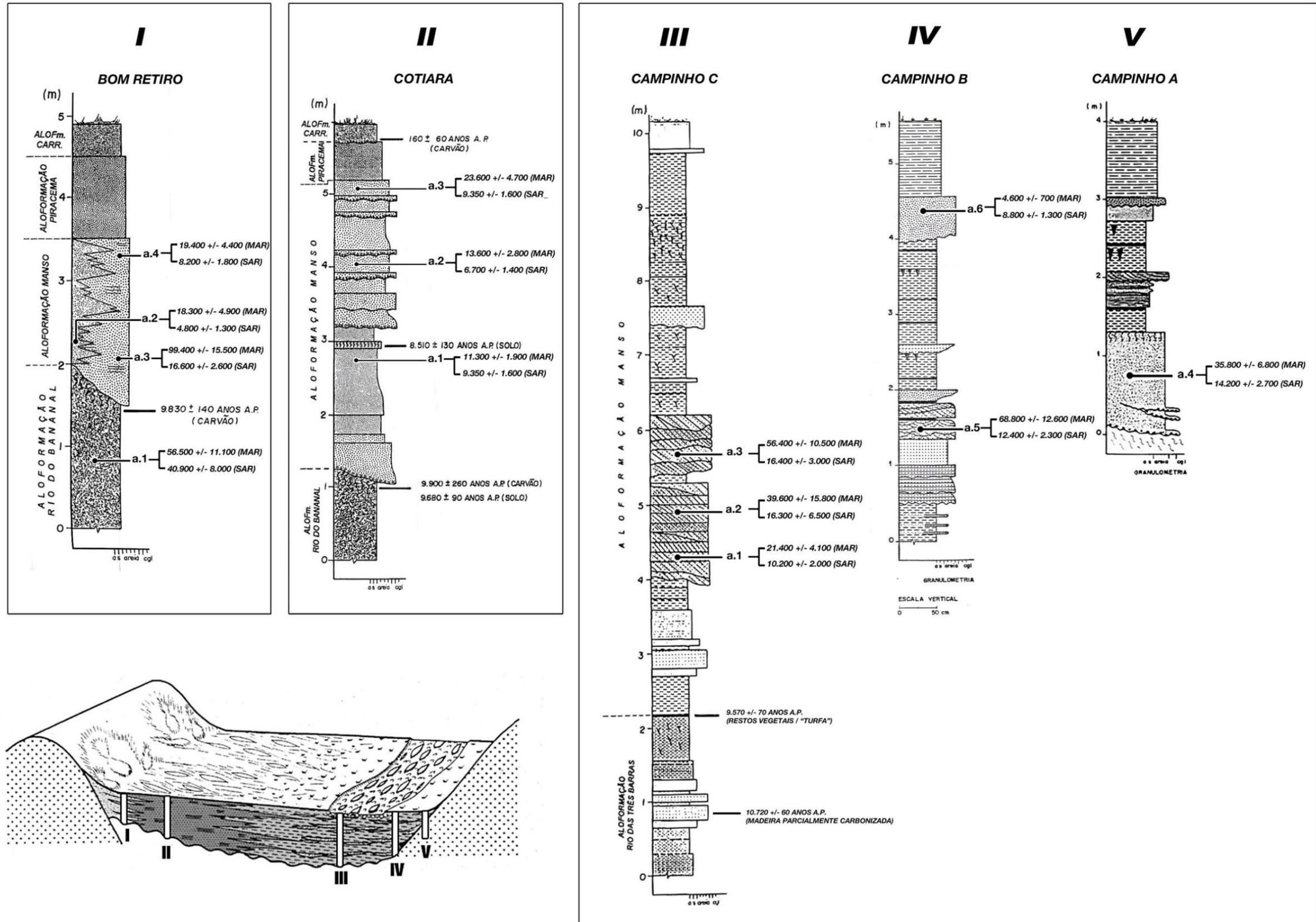


Figura 6.12 – Perfis das seções estudadas com a localização das amostras coletadas e idades obtidas neste trabalho, além de idades radiocarbono anteriores; localização das seções em contexto morfoestratigráfico.

## 7 Conclusões

A partir das análises efetuadas, pode-se concluir que o protocolo MAR não foi adequado para a datação dos depósitos coluviais e aluviais estudados, já que houve uma variação bastante grande entre os valores das alíquotas para cada amostra e os dados mostraram-se discrepantes em relação às idades radiocarbono disponíveis. Dada a natureza dos depósitos investigados, tal resultado já seria esperado, considerando as limitações inerentes a este protocolo, que supõe que a dose equivalente em cada alíquota é idêntica - uma suposição nem sempre válida.

O protocolo SAR tem por princípio investigar as idades utilizando-se uma curva de calibração para cada alíquota utilizada, fornecendo resultados mais confiáveis. No entanto, os dados SAR obtidos também se apresentaram distantes do que seria esperado com base no modelo estratigráfico disponível e em datações radiocarbono anteriores.

A explicação para a inconsistência nos resultados obtidos provavelmente está relacionada à própria natureza dos depósitos coluviais e aluviais, sendo possível considerar:

1 - materiais coluviais e aluviais representam um grande desafio para a técnica de datação por luminescência. Os processos que atuam na formação dos depósitos coluviais podem mover massas sedimentares de modo que apenas uma pequena fração de sedimentos seja exposta à luz do sol (por exemplo, os sedimentos da porção externa) e, portanto, tenha o sinal LOE zerado. Além disso, como a distância de viagem do sedimento tende a ser pequena, as chances de um zeramento eficiente são diminuídas. No caso de depósitos aluviais, a intensidade e a composição espectral da luz solar são subtraídas por cargas suspensas, o que também atrapalha o zeramento. Este pode ser o caso dos depósitos

aluviais estudados, nos quais as camadas arenosas estão intercaladas por pacotes argilosos relativamente espessos. Tais aspectos deposicionais podem justificar a existência de valores muito distantes de idade para alíquotas de uma mesma amostra, especialmente aqueles muito acima das idades esperadas: alguns grãos podem ter sido suficientemente zerados e outros não;

2 - algumas alíquotas com idades muito jovens puderam ser constatadas nos resultados obtidos, particularmente nos depósitos coluviais. Uma possível explicação seria a atividade de organismos (bioturbação), resultando na mistura de grãos originalmente depositados em níveis estratigráficos distintos (grãos de níveis superiores seriam levados para níveis inferiores). Depósitos coluviais são particularmente suscetíveis a este processo, sendo difícil detectá-lo em depósitos com aspecto maciço. Em depósitos aluviais, as feições relacionadas à atividade de organismos podem ser facilmente identificadas, pois a bioturbação oblitera as estruturas primárias (estratificações), permitindo que o local seja, então, evitado para a coleta de material para datação. Bateman *et al.* (2007) indicam, como prováveis sinalizações de atividades de bioturbação, uma distribuição multi-modal das doses equivalentes ou uma distribuição ampla. Estes autores ressaltam ainda que, se ocorrerem tais distribuições, inversões de idades podem ser também observadas. A relevância da bioturbação ainda deve ser investigada quando se trata de datações por luminescência;

3 - outro ponto importante a ser considerado é o fato de os materiais aluviais analisados apresentarem bastante óxido de ferro. Revestimentos minerais, como os de ferro, manganês e carbonatos, podem dificultar a penetração da luz nos grãos minerais (Quickert *et al.*, 2003). Além disso, a dissolução de minerais primários, a formação de minerais secundários, a migração vertical destes minerais e outros fatores podem alterar o valor da dose anual ao

longo do tempo, reduzindo-a, além das doses equivalentes. Em um clima úmido, a dissolução de alguns minerais, precipitação de outros e a redistribuição dos elementos radioativos são processos inevitáveis. O sedimento passa por mudanças no teor de água e na concentração dos elementos, o que resulta em mudanças na dose anual e na dose equivalente, causando inconsistências na idade obtida por LOE. A datação de depósitos intemperizados requer, possivelmente, um estudo mineralógico e químico mais aprofundado. São poucos os trabalhos que realizam estimativas quantitativas desses aspectos como fontes de erro na datação por LOE (Jeong *et al.*, 2007);

4 - é necessário investigar um número de alíquotas maior do que foi possível no presente estudo, de modo a excluir valores muito superiores (grãos não zerados que acumularam sinal) e muito inferiores a uma determinada média. Rodnight (2008) sugere no mínimo 50 valores de dose equivalente por amostra, independente do método estatístico utilizado. Utilizando-se um número elevado de alíquotas é possível investigar a dispersão dos valores e realizar uma análise estatística para se obter a idade. Além disso, quando são obtidos dados muito heterogêneos, como os encontrados neste trabalho, Bateman *et al.* (2007) recomendam que sejam realizadas novas medidas com grãos únicos.

Considerando os motivos expostos, pode-se concluir que o método de datação por luminescência deve ser aplicado com ressalvas a depósitos aluviais e coluviais similares aos investigados no presente estudo. Deve-se considerar ainda a maior relevância das limitações quando são analisados depósitos de idade holocênica, onde uma grande dispersão de idades tem maior impacto na datação pretendida.

Os resultados obtidos no presente estudo indicam a necessidade de ampliar as investigações sobre a aplicação do método de datação por luminescência aos depósitos

analisados. O tratamento de um número maior de alíquotas é recomendável de modo a se obter uma análise estatística que permita uma interpretação mais precisa de possíveis eventos deposicionais ou pós-deposicionais que tenham influência na distribuição das idades. Muito pouco tem sido publicado acerca dos impactos de processos pós-deposicionais sobre a datação por luminescência, embora tais fatores pareçam ter um significado muito relevante nos resultados obtidos, devendo ser investigados com profundidade.

## Referências

- Aitken, M.J. 1985. *Thermoluminescence Dating*. London, Academic, 359p.
- Bailey, R.M., Arnold, L.J. 2006. Statistical modelling of single grain quartz De distributions and an assessment of procedures for estimating burial dose. *Quaternary Science Reviews*, **25**: 2475–2502.
- Barros, M.A., 2003. *Pleistoceno Superior e Transição Pleistoceno/Holoceno, médio vale do rio Paraíba do Sul*. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Bateman M.D., Boulter C.H., Carr A.S., Frederick C.D., Peter D., Wilder M. 2007. Preserving the palaeoenvironmental record in Drylands: bioturbation and its significance for luminescence-derived chronologies. *Sedimentary Geology* **195 (1-2)**: 5-19.
- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S. W. S., Wintle, A. G. 2003. *Optically stimulated luminescence dosimetry*, Elsevier.
- Bøtter-Jensen, L., Bulur, E., Duller, G.A.T., Murray, A.S. 2000. Advances in luminescence instrument systems. *Radiation Measurements* **32**: 523-528.
- Brückmann, M. E.; Fries, S. G. 2002. Radioatividade, Textos de Apoio ao Professor de Física. N. 2. Instituto de Física da UFRGS. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/radio/radioatividade.html>>, acessado em 02/04/2009.
- Coelho Netto, A. L. 1998. Catastrophic Landscape Evolution in a Humid Region (SE Brazil): Inheritances from Tectonic, Climatic and Land use Induced Changes. *Geografia Física e Dinamica Quaternaria*, **3(3)**: 21-48.
- Coelho Netto, A. L. 2003. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): bases para um modelo de formação e crescimento da rede de canais sob controle estrutural. *Revista Brasileira de Geomorfologia* **4(2)**: 69-100.
- Duller G.A.T. 1994. A new method for the analysis of infrared stimulated luminescence data from potassium feldspars. *Radiation Measurements* **23(2-3)**: 281-285
- Fernandes, N.F. 1990. *Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos complexos de rampa – Bananal (SP)*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 151p.
- Ferreira, S.R., Chang, M.R.C. 2008. Datação das Formações Rio Claro e Piraçununga por termoluminescência. *Revista da Escola de Minas* **61(2)**: 129-134.

- Fonseca, A.P. 2006. *Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceira de drenagem na Bacia do rio Bananal (SP/RJ)*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, 348p.
- Fuchs, M., Lang, A. 2001. OSL dating of coarse-grain fluvial quartz using single-aliquot protocols on sediments from NE-Peloponnese, Greece. *Quaternary Science Reviews* **20**: 783–787.
- Fuchs, M., Lang, A. 2009. Luminescence dating of hillslope deposits - a review. *Geomorphology* **109(1-2)**: 17-26.
- Galbraith, R., Roberts, R.G., Laslett, G., Yoshida, H., Olley, J. 1999. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, Northern Australia. Part I: Experimental Design and Statistical Models. *Archaeometry* **41**: 339-364.
- Huntley, D.J. & Lamothe, M. 2001. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Sciences* **38**: 1093-1106.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W. 1985. Optical dating of sediments. *Nature* **313**: 105-108.
- Huntley, D.J. 2006. An explanation of the power-law decay of luminescence. *Journal of Physics – Condensed Matter* **18**: 1359-1365.
- Jeong G.Y., Cheong C., Choi, J. 2007. The effect of weathering on optically stimulated luminescence dating. *Quaternary Geochronology* **2**: 117-122
- Lamothe, M., Auclair, M., Hamzaoui, C., Huot, S. 2003. Towards a prediction of long-term anomalous fading of feldspar IRSL. *Radiation Measurements* **37**: 493-498.
- Lang, A., Wagner, G.A., 1996. Infrared stimulated luminescence dating of archaeosediments. *Archaeometry* **38**: 129–141.
- Lepper, K., McKeever, S. W. S. 2002. An Objective Methodology for Dose Distribution Analysis. *Radiation Protection Dosimetry* **101**:349–52.
- Moura, J. R. S. ; Meis, M. R. M. 1986. Contribuição à estratigrafia do quaternário no Planalto SE do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **58(1)**: 89-102.
- Mello, C.L., Moura, J.R.S., Carmo, I.O., Silva, T.M., Peixoto, M.N.O. 1995. Eventos de sedimentação durante o Holoceno no médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ) – alostratigrafia e datações por radiocarbono. Congresso da ABEQUA, Niterói, 5: 193-201.

- Mello, C. L. ; Moura, J. R. S. ; Carmo, I. O. ; Madeira, C. V. 1999. Allostratigraphic studies and radiocarbon dating of the late quaternary sedimentary events in the middle valley of the Paraíba do Sul river. In: GEOVEG99, Rio de Janeiro. Proceedings on geomorphic responses to environmental (vegetation) changes, problems and remedial work. Rio de Janeiro.
- Mello, C.L. 1992. *Fácies Sedimentares, Arquitetura Depositional e Relações Morfoestratigráficas em um Sistema de Leques Aluviais Holocênicos: Aloformação Manso - Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ)*. Dissertação (Mestrado em Geologia). Programa de Pós-Graduação em Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Métodos radiométricos, 2006. Geofísica Nuclear – Métodos radiométricos. 2006. Disponível em [http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/103/apostila\\_final\\_3\\_1302006.pdf](http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/103/apostila_final_3_1302006.pdf), acessado em 02/04/2009.
- Moura, J.R.S. ; Mello, C.L. 1991. Classificação aloestratigráfica do quaternário superior da região de Bananal (SP/RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, **21(3)**: 236-254.
- Murray, A.S., Olley, J.M. 1999. Determining sedimentation rates using luminescence dating. In: Bruns P. and Hass H.C., eds., Determination of Sediment Accumulation Rates. GeoResearch Forum, Trans Tech Publications: 121-144.
- Murray, A.S., Wintle, A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative- dose protocol. *Radiation Measurements* **32**: 57-73.
- Murray, A. S., Wintle, A. G. 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements* **37**: 377-381.
- Oliveira, C.H.C. 2006. A radioatividade e o ambiente. Dissertação (Mestrado) -- Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. Universidade de Lisboa, Lisboa, 188p. Disponível em < [www.lip.pt/~luis/teses/Carmen\\_Oliveira\\_tese.pdf](http://www.lip.pt/~luis/teses/Carmen_Oliveira_tese.pdf)>
- Olley, J.M., Caitcheon, G.C., Murray, A.S. 1998. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)* **17**: 1033-1040.
- Peixoto, M.N.O. 2002. *Evolução do relevo, coberturas sedimentares e formação de solos em superfícies geomorfológicas - Médio Vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ)*. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 212p.

- Prescott, J.R. Hutton, J.T. 1994. Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements* **23(2-3)**: 497-500
- Quickert, N.A., Godfrey-Smith, D.I., Casey, J.L. 2003. Optical and thermoluminescence dating of Middle Stone Age and Kintampo bearing sediments at Birimi, a multicomponent archaeological site in Ghana. *Quaternary Science Reviews* **22**: 1291–1297.
- Ricomini C., Sant'anna L.G., Ferrari A.L. 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro CDR, Brito Neves BB. (Ed.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, p. 383-405.
- Rittenour, T.M. 2008. Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas Special Issue: Luminescence dating of Quaternary sediments* **37(4)**: 613–635.
- Rodnight, H. 2008. How many equivalent dose values are needed to obtain a reproducible distribution? *Ancient TL* **26**: 3–9.
- Rodnight, H., Duller, G.A.T., Wintle, A.G., Tooth, S. 2006. Assessing the reproducibility and accuracy of optical dating of fluvial deposits. *Quaternary Geochronology* **1**: 109–120.
- Sallun, A. E. M., Suguio, K. 2007. Datação por luminescência do Alogrupo Alto Rio Paraná (SP, PR e MS). *Revista do Instituto Geológico* **27-28**: 13-29.
- Sallun, A. E. M., Suguio, K., Tatumi, S. H., Yee, M., Santos, J., Barreto, A. M. F. 2007. Datação absoluta de depósitos quaternários brasileiros por luminescência. *Revista Brasileira de Geociências* **37**: 401-412.
- Sanson, M.S.R. 2006. *Sistemas Depositionais Aluviais e Tectônica Rúptil Cenozóica na Região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rio de Janeiro. 142p.
- Sapucaia, N.S., Argollo, R.M., Barbosa, J.S.F. 2005. Teores de potássio, urânio, tório e taxa de produção de calor radiogênico no embasamento adjacente às bacias sedimentares de Camamu e Almada, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica* **23**: 4.
- Silva, D.G., Correa, A.C.B. 2009. Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* **2**: 43-56.
- Silva, T.M., Moura, J.R.S., Mello, C. L., Peixoto, M.N.O. 1993. O estudo do Quaternário aplicado à elaboração de mapas de coberturas sedimentares - abordagem morfo-

- aloestratigráfica. In: V Simpósio de Geografia Física Aplicada. v. 5. p. 217-220. USP, São Paulo.
- Silva, T. M. 1991. *Evolução geomorfológica e sedimentação de canais erosivos holocênicos no Médio Vale do rio Paraíba do sul*. Programa de Pós-graduação em Geografia. 166 p.
- Singhvi, A.K., Deraniyagala, S.U., Singupta, D. 1986. Thermoluminescence dating of Quaternary red-sand beds: a case study of coastal dunes in Sri Lanka. *Earth and Planetary Science Letters* **80**: 139–144.
- Souza, J.H. 1990. *Termoluminescência: instrumentação e aplicações*. Tese (Doutorado em Física). CBPF, Rio de Janeiro.
- Tatumi, S.H., Sallun, A.E.M., Gozzi, G., Yee, M., Oliveira, V.I., Suguio, K. 2006. Luminescence dating of Quaternary geological sediments in Brazil. *Radiation Protection Dosimetry* **119**: 462-469.
- Tatumi, S., Peixoto, M.N.O., Moura, J.R.S., Mello, C.L., Carmo, I.O., Kowata, E.A., Yee, M., Brito, S.L.M., Gozzi, G., Kassab, L.R.P. 2003. Optical dating using feldspar from quaternary alluvial and colluvial sediments from SE Brazilian plateau, Brasil. *Journal of Luminescence* **102**: 566-570.
- Tauhata, L., Almeida, E.L. 1984. *Radiações Nucleares*. CNEN, Rio de Janeiro.
- Tauhata, L., Salati, I.P.A., Prinzió, R.D. 2005. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. 5ª rev. IRD/CNEN, Rio de Janeiro.
- Tipler, Paul. A., Llewellyn, Ralph A. 2001. *Física Moderna*. 3ª ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Van Es, H.J., Vainshtein, D.I., Rozendaal, A., Donoghue, J.F., De Meijer, R.J. & Den Hartog, H.W., 2002. Thermoluminescence of ZrSiO<sub>4</sub> (zircon): A new dating method? *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B - Beam Interactions with Materials and Atoms* **191**: 649-652.
- Wallinga, J., Bos, A. J. J., Dorenbos, P., Murray, A. S. & Schokker, J. 2007. A test case for anomalous fading correction in IRSL dating. *Quaternary Geochronology* **2**: 216–221.
- Wallinga, J., Murray, A. & Wintle, A. 2000. The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grained feldspar. *Radiation Measurements* **32**: 529–533.
- Wallinga, J. 2002. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. *Boreas* **31**: 303-322.

Wintle, A.G., Murray A.S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* **41**: 369- 391.