



## Inferência de mudanças climáticas a partir de fonte de dados geotermiais na região de Manaus, AM, Brasil.

Flavio Natal Mendes de Oliveira\* UFAM-INMET Rutemio Luiz Castro de Araujo e João Carvalho UFAM, Brazil

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Recent studies had showed that the heat flux across the land surface into the subsurface and it is manifested at a later time by a perturbation to the background temperature field. We have analyzed temperature versus depth profiles measured in 11 sites distributed in Manaus City, Brazil and show that the temperature mean of surface in Manaus have warmed about  $3,23^{\circ}\text{C} \pm 0,07^{\circ}\text{C}$  in the last 250 and 300 years. But, According to surface meteorological data from meteorological station of the INMET about 80 years ago, the average air temperature increasing only  $0,27^{\circ}\text{C} \pm 0,037^{\circ}\text{C}$  in Manaus City, based on the climatological period 1950-1979. This increasing in the mean temperature referring to borehole data is related to past anthropogenic actions, though, the recent warming about meteorological data is associated with circulation atmospheric of large scale as El Niño.

### Introdução

O conhecimento do passado climático se faz necessário à medida que procuramos prever mudanças climáticas regionais e seus impactos sobre determinada região. Contudo, os dados meteorológicos disponíveis não ultrapassam os últimos cem anos e torna-se necessário a aplicação de dados pré-instrumentais no auxílio da informação climática de longa-data.

Neste trabalho, utilizou-se de dados geotermiais para inferir mudanças climáticas de longa-data.

Recentes estudos têm mostrado que mudanças nas temperaturas médias superficiais são propagadas para o subsolo e são manifestadas ao longo do tempo climático, como perturbações nos perfis geotérmicos.

Contudo, na atualidade, grande parte dos trabalhos sobre temperatura de solo são limitados à profundidade de 1m, já que são literalmente voltados à estudos de solo para o uso agrícola. De outro lado, pesquisadores geotérmicos convencionais, usualmente, trabalhavam a partir de 30 metros, mas evitavam as perturbações mais superficiais, porque creditavam pontos à literatura clássica, onde se afirma que as variações diurnas e sazonais atingem profundidades da ordem de 1,0m e 25,0m, respectivamente (CARSLAW & JAEGER, 1959), e toda perturbação climática verificada nos primeiros níveis do

solo eram consideradas ruídos e rotineiramente desprezadas.

A perspectiva do uso destas perturbações térmicas do subsolo para investigações climáticas permaneceu inalterada até o trabalho clássico de LACHENBRUCH e MARSHALL (1986), quando alertaram a comunidade científica sobre a importância das informações climáticas contidas nos perfis geotérmicos nos estudos sobre o aquecimento global na superfície. Após LACHENBRUCH e MARSHALL (1986), muitos trabalhos científicos foram apresentados, os quais retratam bem as novas correntes da Geotermia nas pesquisas climáticas. No entanto, poucos destes trabalhos foram realizados em regiões tropicais, como na Amazônia, com aplicabilidade em mudanças climáticas. Por outro lado, nas duas últimas décadas, trabalhos científicos executados na Amazônia registraram perturbações diurnas e sazonais em profundidades de até 250 metros (SERRA, 2002), permitindo concluir que tais variações térmicas persistem a maiores profundidades (ARAUJO e SILVA, 1982; ARAUJO et al. 1984; ARAUJO et al. 1985; ARAUJO, 1987; ARAUJO et al. 1991; ARAUJO, 1999; SOUZA et al. 1996; SILVA, 2003; SERRA, 2002).

Este trabalho apresenta a análise de perfis de temperatura de onze locais distribuídos na região de Manaus. Desta maneira, estimamos quantitativamente o efeito do desmatamento e do crescimento urbano sobre o clima de longa data na cidade de Manaus.

### Metodologia

Nas perfilagens rasas foram utilizados sondas cujo sensor térmico foi um termopar, com precisão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  (ARAUJO, 1999). Nas perfilagens profundas, o sensor térmico foi de termistor, com precisão de  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$  (ARAUJO, 1999).

Conforme ROY et al (1971), a extrapolação da reta que determina o gradiente geotermal profundo, possibilita o cálculo da temperatura média anual concernente ao período anterior às ações antrópicas locais. Conforme ARAUJO (1999), a extrapolação da reta, logo após a inversão térmica subsuperficial, possibilita o cálculo da temperatura média anual atual. Assim sendo, os resultados das perfilagens geotermiais rasas e profundas propiciarão a obtenção de dados necessários e suficientes para a realização de estudos geotermiais e ambientais e climáticos locais.

Apresentamos, as variáveis de interesse de forma abreviada, sendo denominadas a "temperatura superficial do perfil" por " $T_s$ ", a "temperatura média atual superficial" por " $T_a$ " e a "temperatura média atinente ao período anterior a qualquer desequilíbrio térmico local" por " $T_l$ ", bem como a "variabilidade do aumento da temperatura no ambiente local" por " $\Delta T$ ", conforme representado teoricamente no eixo das temperaturas da figura 1.

Com relação aos dados meteorológicos de superfície, analisamos os dados climatológicos de temperatura média do ar referentes à cidade de Manaus correspondentes ao período dos anos de 1921 a 2000, aos quais aplicamos uma equação de regressão linear simples do tipo:

$$y = Dx + b \quad (1)$$

Onde:

y é o elemento meteorológico; x é o ano correspondente ao período; D é a inclinação e b a interseção.

### Dados Meteorológicos de Superfície

Dos dados referentes às temperaturas médias anuais do ar da estação climatológica principal de Manaus, correspondente a série histórica de 1921 a 2000, verificamos um aumento nas temperaturas médias do ar da ordem de 0,27°C, com 95% de confiança entre +0,23°C e +0,31°C, tomando como base para os cálculos dos desvios o período climatológico de 1950 a 1979, conforme representado na figura 5.

Na figura 6, observa-se que o aquecimento de 0,27°C não está uniformemente distribuído ao longo do período sob análise e que tais diferenças estão atribuídas primeiramente às frequências da ocorrência do fenômeno El Niño – Oscilação do Sul.

### Dados Geotermiais

Segundo BELTRAMI & HARRIS (2001) a grande vantagem de se usar dados geotermiais para inferir mudanças climáticas são: Medições diretas do campo de temperaturas; Melhor sensibilidade às tendências de temperaturas ocorridas nos últimos 5 séculos; Boa espacialidade continental; e melhor continuidade dos dados do que sensibilidade sazonal.

### Configuração Normal de um Perfil Geotermal

Considerou-se, inicialmente, para o propósito prático deste trabalho, um perfil geotérmico hipotético, ou ideal, onde a superfície terrestre local assume comportamento adiabático e o material litológico é completamente homogêneo. Nesta hipótese, não há trocas de calor entre a interface subsolo e a atmosfera e as variações térmicas são funções, apenas, do fluxo de calor oriundo do interior da Terra, conforme representado na parte “a” da figura 1. Contudo, em uma superfície terrestre real, as trocas de calor entre o subsolo e a atmosfera são constantes e de magnitudes elevadas nas camadas subsuperficiais do subsolo. O modo como o fluxo de calor é transferido no subsolo depende da propriedade do meio em transmiti-lo, ou seja, da condutividade térmica.

ROY et al (1971) e ARAUJO (1999), desenvolveram metodologias para inferência de variações climáticas usando dados geotermiais, conforme apresentamos em resumo gráfico, representado pela figura 1. Particularmente, a parte “c” da figura 1, representa uma condição real de aquecimento em superfície. Neste caso, um progressivo aquecimento em superfície, seria o responsável por um perfil de temperatura com gradientes térmicos negativos nas profundidades mais rasas do perfil geotérmico raso e em algum nível de profundidade haverá, obrigatoriamente, a existência de uma zona de

fluxo de calor nulo, denominada de “zona de cotovelo” (ARAUJO, 1987), e a partir da qual ocorre à inversão do gradiente térmico e conseqüentemente, o perfil apresentará um incremento linear da temperatura com a profundidade. Já um progressivo esfriamento em superfície, esfriaria o material existente no subsolo e o resultado é a presença de gradientes térmicos negativos, às pequenas profundidades, como representado na parte “b” da figura 1.

No subsolo, além da perturbação térmica gerada pelo fluxo de radiação solar incidente, a presença de fontes internas, fluxo de água subterrânea, material inconsolidado, reações químicas e flutuações no nível do lençol freático, podem exercer influências sobre as configurações rasas do perfil geotérmico (ROY et al., 1971; ARAUJO, 1987; SOUZA et al., 1989; ARAUJO, 1999). Nas camadas profundas, algumas fontes internas, como concentração de elementos radioativos naturais, fluxo de gás natural e fraturamentos podem exercer atividades anômalas sobre os valores de temperatura.

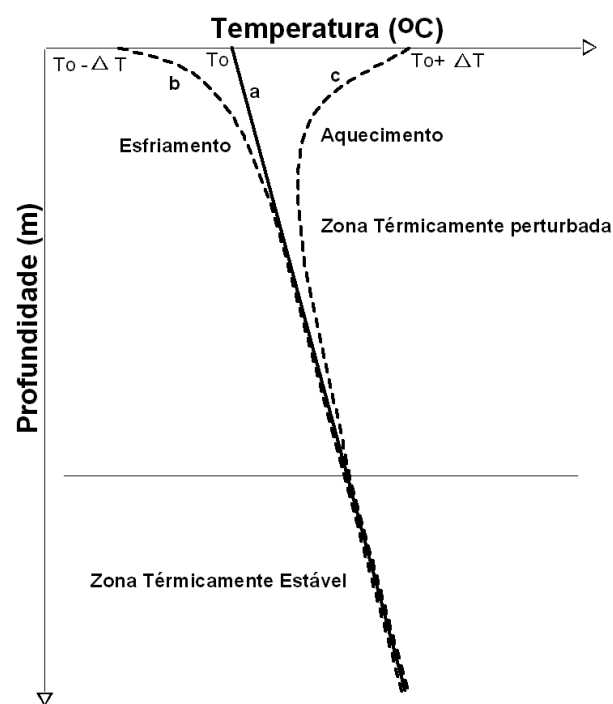


Figura 1 – Configuração normal de perfis geotérmicos. a) estável b) esfriamento e c) aquecimento.

As informações contidas na figura 1 são ratificadas por dados reais, conforme apresentado na figura 2, onde se observa a existência de duas regiões térmicas. Uma zona superior, termicamente perturbada, a qual denominamos de ZTP e outra inferior, termicamente estável, a qual denominamos de ZTE, onde predomina o fluxo de calor oriundo do interior da Terra. Para estas regiões térmicas calculou-se, para cada perfil, os valores do gradiente geotérmico local raso, denominado de “Gr” e do gradiente geotérmico local profundo, denominado de “Gp”, respectivamente. Desta forma, determinamos os padrões para a identificação de um perfil normal geotérmico.

## Resultados

Na figura 2, ratificamos com dados reais as informações expressas na figura 1. Tais configurações permitem concluir que os perfis resultantes, embora registrem valores diferentes de temperatura têm, no entanto, configurações semelhantes.

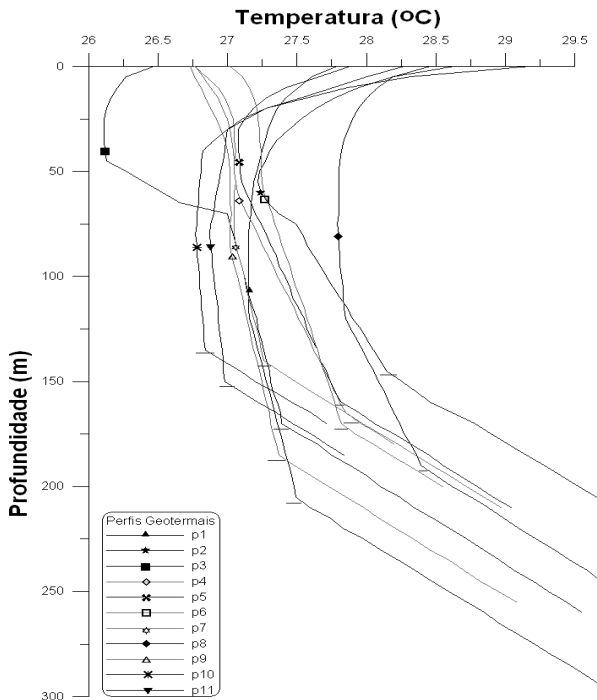


Figura 2 – Perfis geotérmicos registrados – Manaus-AM

Dos onze locais perfilados, cinco perfis foram característicos de locais com boa cobertura vegetal e outros seis perfis, representativos de locais com baixa densidade vegetal e/ou sem nenhuma cobertura vegetal. Como exemplo, apresentamos o perfil da figura 3, o qual é representativo de local com boa cobertura vegetal, onde foram verificados gradientes positivos desde a superfície e o perfil da figura 4, representativo de uma série de perfis sob locais com pouca densidade vegetal e/ou sem cobertura vegetal e apresentando gradientes negativos em superfície.

Dos perfis sob áreas com cobertura vegetal, determinou-se os valores de  $T_s$ , quais variaram entre 26,47°C e 27,02°C, com valor médio de 26,75°C. Nestes perfis determinou-se para  $G_r$ , um valor mínimo de 0,0036°C/m e um máximo de 0,0098°C/m, sendo um valor médio de 0,0060°C/m. Já os valores de  $G_p$  ficaram entre 0,0237°C/m (mínimo) e 0,025°C/m Máximo) e um valor médio de 0,0245°C/m. Os valores calculados para  $T_a$  nestes perfis estiveram entre 26,60°C e 26,90°C com valor médio de 26,75°C. Dos valores calculados para  $T_i$ , estes variaram entre 22,75°C e 24,0°C, com valor médio de 23,46°C.

Já os perfis pertinentes às áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, apresentaram elevados gradientes térmicos, sendo os mesmos, negativos na subsuperfície, indicando que as taxas de radiação solar incidente na superfície vem gradualmente aumentando ao longo do

tempo. Neste aspecto, notamos que quanto maior o grau de inclinação do perfil superficial de temperatura, conforme a figura 4, maior é o tempo relativo da incidência de radiação solar sobre o local, bem como maior é a área estimada sem cobertura vegetal. Com isto, demonstramos que a retirada da floresta para o uso do solo, contribui efetivamente na condução de fluxos de calor para maiores profundidades do subsolo. As profundidades registradas das zonas de inversão térmica e região inicial da ZTE sob locais sem cobertura vegetal variaram notavelmente de 45m a 120m e 140m a 210m, respectivamente.

O valor médio calculado de  $G_r$  para os perfis atinentes aos locais sem cobertura vegetal foi de 0,0051°C/m. Interessante observar que o valor foi muito próximo do verificado de 0,0060°C/m, relativo aos perfis dos locais com cobertura vegetal. Não obstante, o valor médio de  $G_p$  nestes tipos de perfis foi de 0,0248°C/m, praticamente o mesmo valor encontrado para os perfis dos poços sob boa cobertura vegetal. Disto, concluímos que em profundidades elevadas, todos os perfis aproximam-se de um padrão regular, conforme verificado na figura 2.

Desta série de perfis com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, verificamos que, o valor médio da  $T_s$  foi de 28,37°C, sendo o valor considerado elevado, quando comparamos com o valor médio de 26,75°C, referente aos poços sob locais com cobertura vegetal. Estes resultados demonstram que os valores de  $T_s$  nos perfis sem cobertura são em média 1,62°C mais elevadas do que os valores de  $T_s$  registrados nos perfis dos poços com cobertura vegetal. A diferença entre o maior e o menor valor de  $T_s$  nos locais com pouca e/ou nenhuma cobertura vegetal foi de 1,38°C, enquanto que a verificada nos poços com cobertura vegetal foi de apenas 0,55°C. No que concerne aos valores de  $T_a$  referentes aos locais sem cobertura vegetal, calculou-se o valor mínimo de 26,65°C e um máximo de 26,90°C. O valor médio de  $T_a$  foi de 26,77°C. Quanto aos valores relativos de  $T_i$  calculamos um valor médio de 23,59°C. Este valor médio para  $T_i$ , foi muito próximo daquele de 23,50°C, referente aos perfis geotérmicos relativos sob locais com boa cobertura vegetal.

## Conclusões

Verificou-se que às profundidades médias de 170 metros, as perturbações térmicas oriundas da superfície sob ambos os tipos de perfis, com ou sem cobertura vegetal, praticamente desaparecem. Nestas profundidades médias, o fluxo de calor proveniente da radiação solar não é mais mensurável e o gradiente térmico tende a estabilizar-se em função do fluxo de calor oriundo do interior da Terra. As perturbações térmicas alcançam tais profundidades elevadas, devido às altas quantidades de radiação solar incidente sobre a cidade de Manaus-AM, quantia aproximada de 180 W/m<sup>2</sup>, conforme mencionado em SOUZA et al., 1989.

A figura 7 apresenta um resumo dos dados pertinentes a este trabalho, onde verificamos que todos os perfis estudados indicam condições de aumento dos valores das temperaturas médias anuais superficiais na cidade de Manaus.

Conclui-se que, por meio de dados geotermiais, o valor da temperatura média superficial atual ( $T_a$ ) é de  $26,76^\circ\text{C} \pm 0,07^\circ\text{C}$ . Tal valor está em perfeita concordância com os valores obtidos via estação meteorológica de Manaus (AM), demonstrando que esta técnica é perfeita para a aquisição de informações climatológicas nos locais onde não há instalado uma estação meteorológica de superfície. Das análises, também concluímos que o valor médio da temperatura média superficial atinente ao período anterior a qualquer perturbação antrópica ( $T_i$ ) é de  $23,53^\circ\text{C} \pm 0,42^\circ\text{C}$ . Estes resultados inferem um aumento nas temperaturas médias anuais de  $3,23^\circ\text{C} \pm 0,41^\circ\text{C}$ , que é representativo ao histórico de ocupação do homem na região de Manaus (AM), ou seja, durante os últimos 250 a 300 anos.

Todavia, verificamos que, nos últimos 80 anos, segundo dados meteorológicos de superfície, houve um aumento nas temperaturas médias superficiais de apenas  $0,27^\circ\text{C}$ , com 95% de confiança entre  $+0,23^\circ\text{C}$  e  $+0,31^\circ\text{C}$ . Desta maneira, o aumento nas temperaturas médias atribuído aos dados geotermiais são em grande parte, referente à atividades antrópicas, e que tal mudança climática ocorreu devido à substituição de floresta para fins de pastagens e/ou urbanização. Já o aquecimento de  $0,27^\circ\text{C}$ , relativo às informações meteorológicas, não deve ser atribuído às atividades antrópicas, devido à falta de evidências, mas principalmente às oscilações atmosféricas de grande escala com El Niño, visto que a cidade de Manaus já tem incorporado neste pequeno período, valores climatológicos distintos da época da colonização portuguesa e ao período áureo do desenvolvimento econômico.

### Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Meteorologia por disponibilizar registros instrumentais de superfície e ao Laboratório de Geofísica do Departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas que forneceu a infra-estrutura necessária para a execução do projeto.

### Referências

- ARAUJO, R.L.C & SILVA, R.M (1982). Estimativas preliminares de gradiente geotérmico concernente à cidade de Manaus. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador (BA), setembro, V.4, 16015-1620.
- ARAUJO, R.L.C; SOUZA, J.R.S & MAKINO, M (1984). Análises de perfis de temperatura na camada intempérica da área metropolitana de Belém. Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro (RJ), outubro, V.4, 2073-2083.
- ARAUJO, R.L.C; MAKINO, M & SOUZA, J.R.S (1985). Estudo da variação temporal de perfis geotérmicos na camada intempérica na Amazônia. Anais do II Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém (PA), dezembro, V.3, 195-206.
- ARAUJO, R. L. C. 1987. Geotermia Rasa em Belém. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará (PA). 149p.
- ARAUJO, R. L. C. 1999. Contribuição da Geotermia Rasa aos Estudos Ambientais. Manaus. Ed. Universidade do Amazonas. 88p.
- ARAUJO, R.L.C; SOUZA, J.R.S & MAKINO, M (1991). Análises dos perfis geotérmicos rasos em poços sujeitos a aquecimento superficial e bombeamento de água. Revista Brasileira de Geofísica. 9: 47-53.
- BELTRAMI, H; HARRIS, R.N (2001). Inferences of climate change from geothermal data. Global and Planetary Change. 29: 149-152.
- CARSLAW, H. S. and JAEGER, J. C. 1959. Conduction of Heat in Solids. 2ª ed. Oxford. Clarendon Press. 527 p.
- LACHENBRUCH, A., MARSHALL, B.V., 1986. Changing Climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaska artic. Science 234: 689-696.
- ROY, R. F., Blackwell, D.D., Decker, E.R. (1971) Continental Heat Flow. In: Robertson, R. The Nature of Soil. New York: Mc Graw-Hill. P.506-543.
- SERRA, P.N. (2002) Determinação da Profundidade de Influência da Perturbação Térmica Sazonal Gerada pelo Aquecimento Solar na Região Metropolitana de Manaus. Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de Mestrado. 80p.
- SILVA, R.M. (2003) Influência Ambiental sobre a Estrutura Geotermal Rasa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas (AM). 102p.
- SOUZA, J.R.S.; PINHEIRO, F.M.A.; ARAUJO, R.L.C.; PINHEIRO Jr., H.S. & HODNETT, M.G. (1996) Temperature and Moisture Profiles in Soil Beneath Forest and Pasture Areas in Eastern Amazonia. Amazonian Deforestation and Climate. Capítulo 6. Editado por Gash, J.H.C., Nobre, C.A.; Roberts, J.M. & Victoria, R.L. John Wiley & Sons. England. 125-137.
- SOUZA, J. R. S., ARAUJO, R. L. C., MAKINO, M. (1989) Heat transfer and thermal properties of the subsoil in Belém. Revista Brasileira de Geofísica, n. 7,p.19-28.

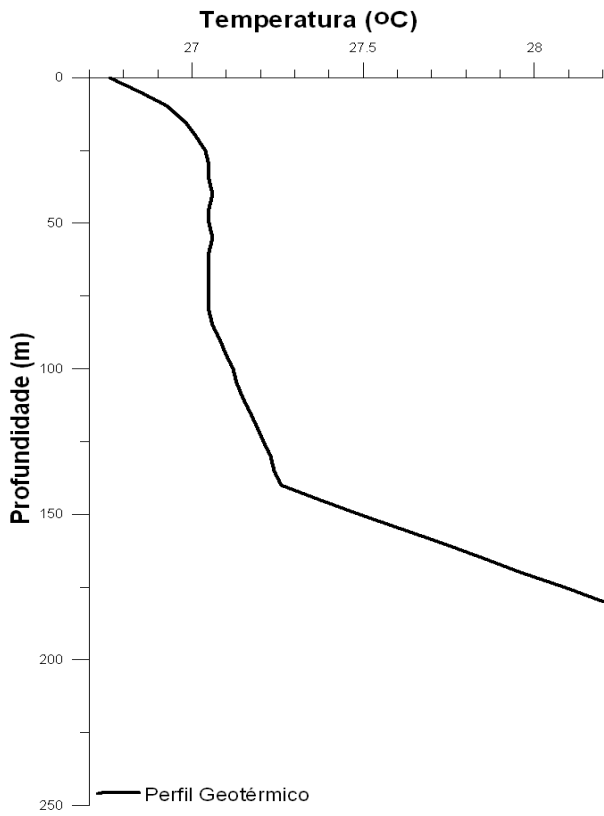


Figura 3 – Perfil de temperatura representativo de locais com boa cobertura vegetal.

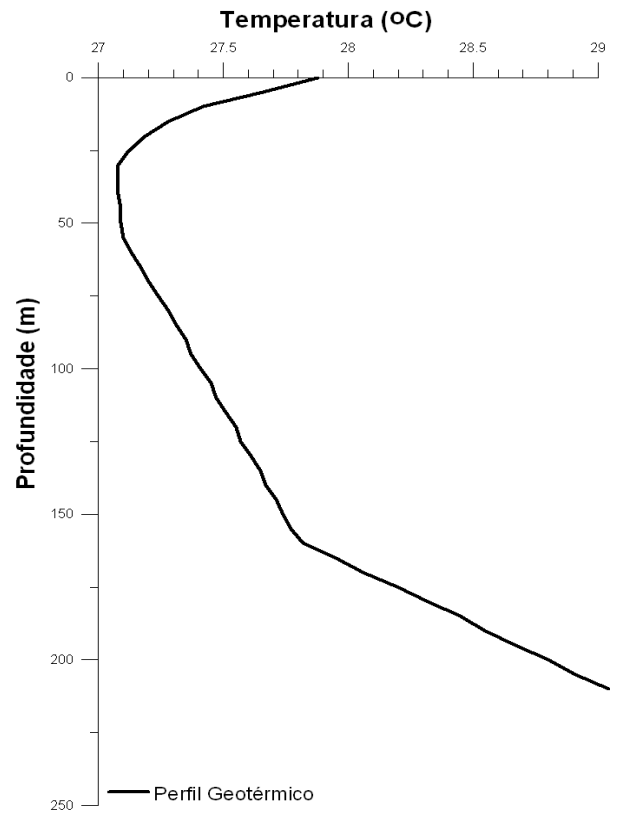


Figura 4 – Perfil de temperatura representativo de locais com pouca ou nenhuma cobertura vegetal.

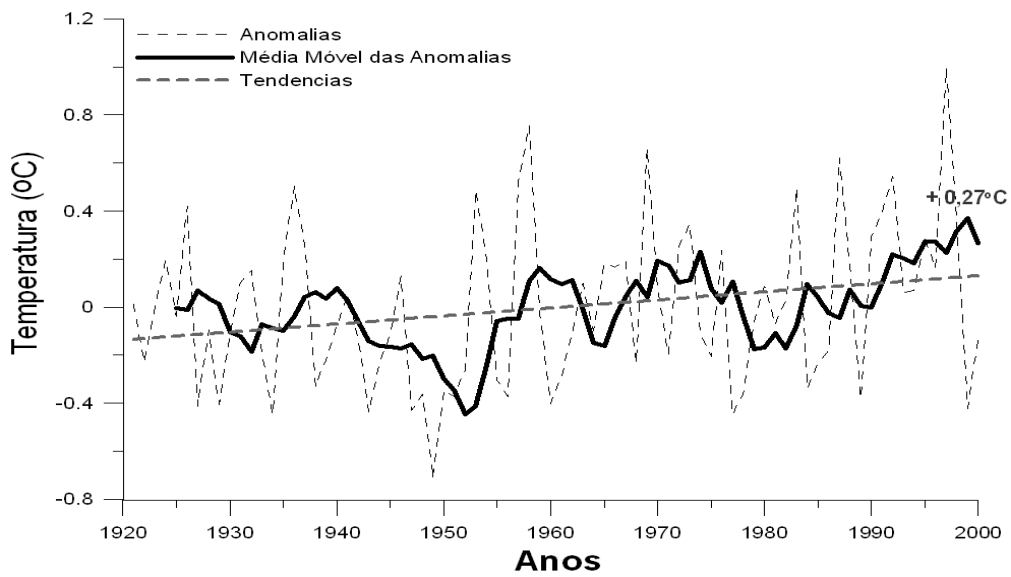


Figura 5 – Desvios e tendências da temperatura média do ar em Manaus – AM referentes à série histórica de 1921 a 2000.

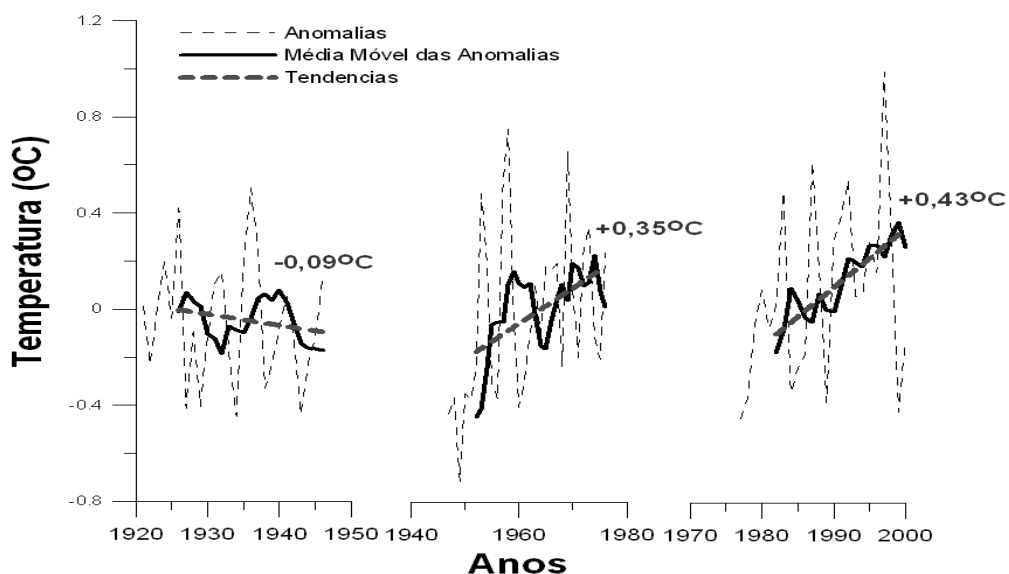


Figura 6 – Desvios e tendência da temperatura média do ar em Manaus para três períodos distintos.

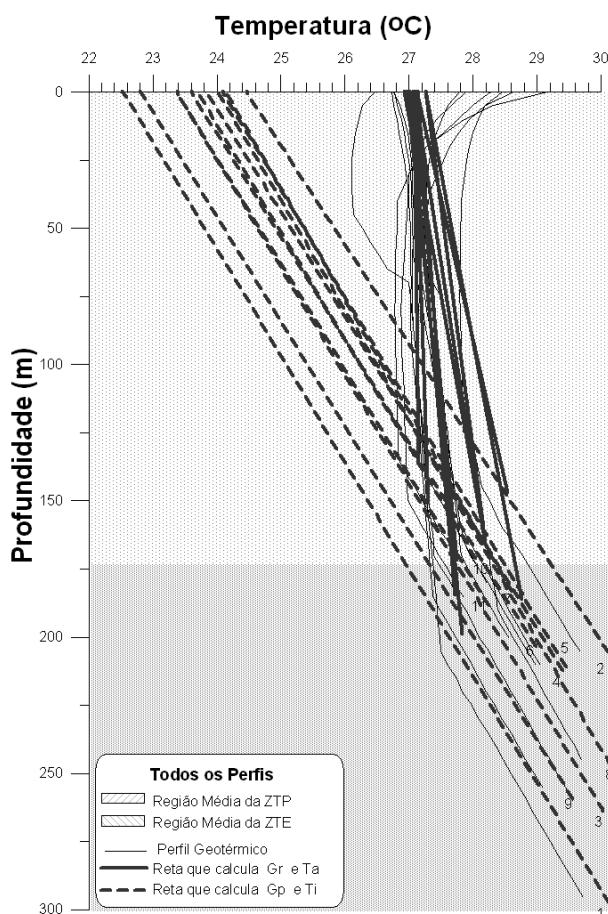


Figura 7 – Série dos perfis geotermiais e as retas que calculam os gradientes geotermiais locais e as temperaturas médias atual e passada.