

# CARACTERIZAÇÃO E PERSPECTIVAS DE USO DA ENERGIA GEOTERMAL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

Luiz Amore<sup>1</sup> & Célia Surita<sup>2</sup>

**RESUMO** - O Sistema Aquífero Guarani é o maior aquífero confinado do mundo, estendendo aproximadamente por 1.200.000 km<sup>2</sup> por quatro países: Argentina (19%), Brasil (71%), Paraguai (6%) e Uruguai (4%). No Brasil também predomina a ocorrência de energia geotermal potencial. As isotermas acima de 40 °C ocupam mais de 81 % do território.

Este artigo apresenta resultados de avaliações iniciais indicando que a energia geotermal potencial no Brasil, considerando isotermas entre 20 °C e 40 °C, seja de cerca de 33.210 x 10<sup>18</sup> J, correspondente a 810.000 milhões de toneladas de combustível fóssil. O valor econômico da reserva técnica de calor seria de aproximadamente US\$ 29.000 bilhões, indicando a importância do Sistema como fonte de recurso energético.

**ABSTRACT** - The Guarani Aquifer System is the largest transboundary confined aquifer system in the world, extending over 1,200,000 square kilometers in four countries: Argentina (19%), Brazil (71%), Paraguay (6%) and Uruguay (4%). Geothermal energy occurs mainly within the Brazilian territory (at the 40°C isotherm as mapped Brazil's part of the aquifer system 81%).

An assessment of the geothermal energy potential of the Guarani Aquifer System, considering temperature values between 20 °C and 40 °C, indicates values over 33,210 x 10<sup>18</sup> J. Potential Technical heat reserves are calculated equivalent to 810 x 10<sup>9</sup> ton of fossil fuel. The economic asset value of this energy is about US\$ 29,000 billions, only considering Brazil, which makes it an important energy source.

**Palavras-chave:** Guarani, Geotermalismo, Potencialidade.

---

<sup>1</sup> Técnico da Superintendência de Cobrança e Conservação da Agência Nacional de Águas da Agência Nacional de Águas (SCC/ANA) e Coordenador Nacional do Projeto Aquífero Guarani.

Setor Policial Sul, área 5, quadra 3, bloco L, sala 237 - CEP 70610-200 Brasília/DF  
amore@ana.gov.br;

<sup>2</sup> Técnica da SCC/ANA e integrante da equipe de coordenação do Projeto Aquífero Guarani.

Setor Policial Sul, área 5, quadra 3, bloco L, sala 237 - CEP 70610-200 Brasília/DF  
cesurita@ana.gov.br.

## **O Sistema Aquífero Guarani**

Com referência às áreas de afloramento do Guarani e dos limites da bacia hidrogeológica do Paraná, com idade que vai do Siluriano ao Cretáceo Superior (de 400 a 70 milhões de anos), a extensão do aquífero foi definida em aproximadamente 1.200.000 km<sup>2</sup>, abrangendo quatro países: Argentina (19 %), Brasil (71 %), Paraguai (6 %) e Uruguai (4 %) [1]. Em relação ao território ocupado pelo aquífero em cada um dos países tem-se: Argentina (6 %), Brasil (19 %), Paraguai (18 %) e Uruguai (25 %) [2].

Considerando uma porosidade efetiva de 15 %, espessura média dos arenitos do Guarani da ordem de 280 m (varia de 50 a 600 m), e recarga anual indireta do aquífero de 138 km<sup>3</sup>, o volume de água estocado tem sido estimado em 45.000 km<sup>3</sup> [3]. Por outro lado, as curvas de depleção dos hidrogramas dos rios indicam, em São Paulo, recarga direta nas áreas de afloramento do Guarani da ordem de 26 km<sup>3</sup>/ano. O sistema hidrográfico do rio Paraná tem descarga média normal da ordem de 498 km<sup>3</sup>/ano [3].

O sistema aquífero Guarani-SAG é do tipo confinado, pois cerca de 90 % de sua extensão está recoberta por derrames basálticos com espessura de até 1.529 m [3]. Por não ter sido inundada por águas marinhas, nem quando da separação das placas tectônicas, as águas do sistema aquífero Guarani são doces e, em geral, de excelente qualidade. As interações entre os sistemas aquíferos da bacia do Paraná foram estudadas com base em dados hidroquímicos e isotópicos (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>13</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C). Estudos anteriores (citados em [3]), indicam que as águas do Guarani são de origem meteórica e que a cinemática do sistema de fluxo é relativamente baixa, existindo um incremento gradual dos fluxos das bordas para centro da bacia, bem como da variação de diversos parâmetros: temperatura da água, alcalinidade (pH de 5,36 a 9,62), teor de sódio, sólidos totais dissolvidos (STD de 37 a 540 mg/l) e idades aparentes que passam de 480 a 38.825 anos.

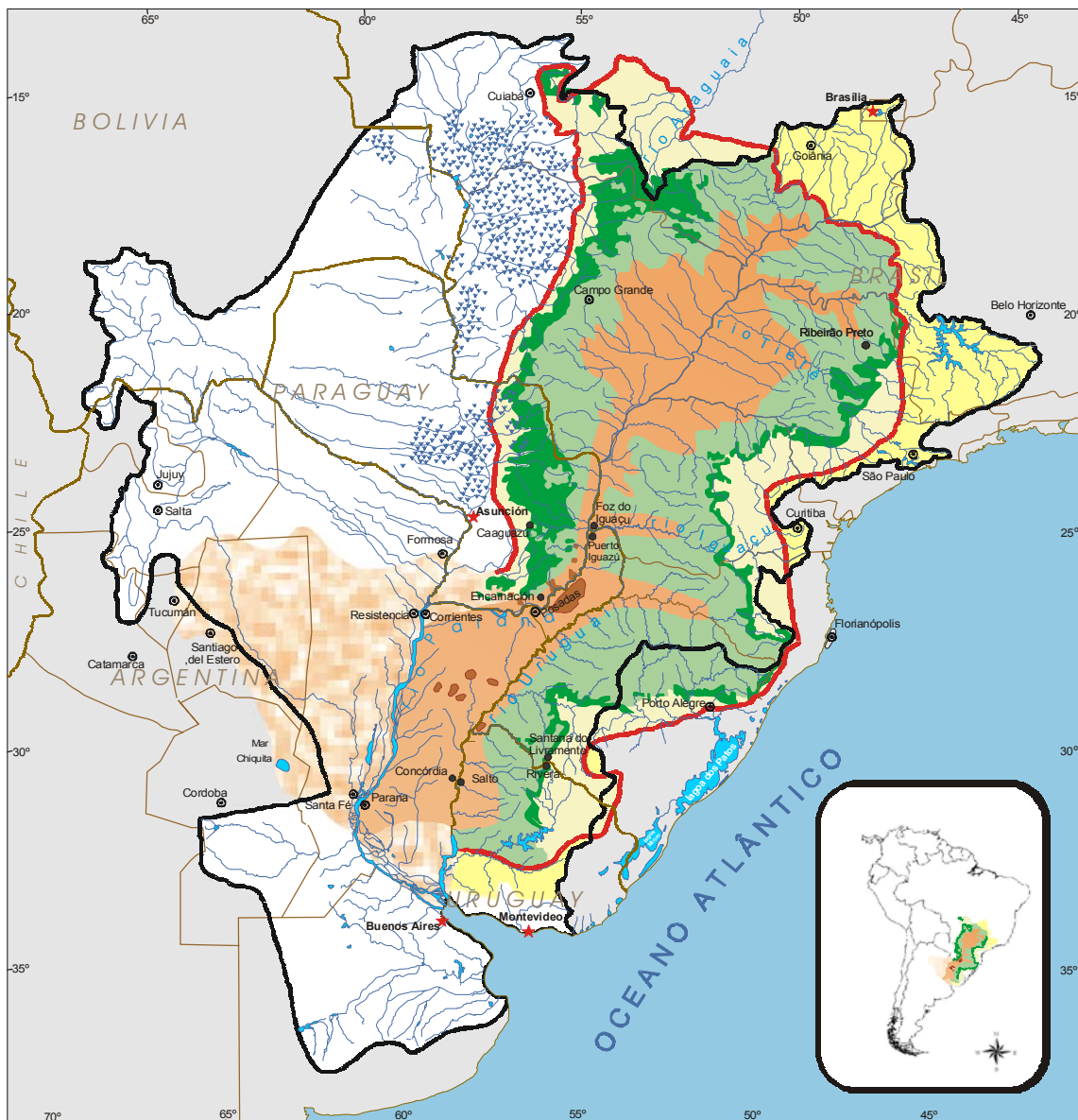
Com base nas informações cartográficas e dados disponíveis sobre o sistema, foi elaborado um mapa esquemático inovador para o aquífero onde estão identificadas as áreas potenciais de recargas indireta e direta, trânsito, descarga ou artesianismo do sistema aquífero (Mapa 1). O mapa foi produzido pela coordenação nacional do projeto no Brasil e adotado pelo Conselho Superior de Preparação do Projeto Aquífero Guarani [4]. Com o georreferenciamento das informações espaciais produzidas, o cálculo das áreas poderá ser alterado.

## **Geotermalismo e hidrotermalismo no Guarani**

As águas geotermiais e termais são diferenciadas pelo modo de ocorrência. As águas geotermiais são águas doces, com mineralização total abaixo de 0,25 g/l, confinadas no sistema aquífero Botucatu/Tacuarembó; águas levemente salinas com mineralização total entre 1 e 10 g/l confinadas no sistema aquífero Pirambóia/Buena Vista. As águas termais são caracterizadas pela

alcalinidade e teor de flúor de origem magmática, sendo localmente confinadas em sistemas aquíferos confinados profundos [5].

MAPA 1 – Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani



**LEGENDA**

- Drenagens não relacionadas ao Aquífero Guarani (não integram o Sistema)
  - ▨ Área potencial de recarga indireta
    - ▨ .a partir da drenagem superficial
    - ▨ .a partir do fluxo subterrâneo
  - ▨ Área potencial de recarga direta
    - ▨ .regime poroso: afloramento do Guarani
    - ▨ regime fissural/poroso: basaltos e arenitos
  - ▨ Área potencial de descarga
    - ▨ regime fissural /poroso: basaltos e arenitos (indivisos)
    - ▨ regime poroso: afloramentos do Guarani
    - ▨ regime fissural /poroso (relação com o Guarani a definir)
  - Limite bacia hidrográfica do Prata
  - Limite bacia sedimentar do Paraná
  - Rios
  - Áreas alagadas
  - Limite político de País
  - Limite político de Estados/Províncias
  - Cidade
  - Capitais Estados/Províncias
  - ★ Capital dos Países
- Escala Aproximada 1: 13.600.000  
0 100 200 300 km

**Notas:**  
 - Figura ilustrativa elaborada pela CAS/SRH/MMA (UNPP/Brasil) aprovada pelo Conselho Superior de Preparação do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai - GEF/Banco Mundial- OEA).  
 - As porções coloridas representam as áreas que, em potencial, compõe o Sistema Aquífero Guarani. As áreas em branco e cinza não integram o Guarani. Os limites do Aquífero Guarani não estão totalmente definidos na Argentina e no Paraguai, tampouco se as áreas de descarga assinaladas estão a ele relacionadas.

**Fontes:**  
 - Mapa Hidrogeológico de America del Sur, 1996. DNPM/CPRM/Unesco.

Fonte: [4].

O aumento da temperatura das águas é devido ao gradiente geotermal regional médio, que a partir de poços de petróleo foi determinado como sendo de 2,9 °C/100 m [6]. Utilizando os dados de temperaturas do aquífero em 322 poços profundos e as temperaturas estimadas com base no gradiente geotermal para os poços com ausência de medidas de temperatura, foi produzido o mapa de isotermas do aquífero Guarani [6]. Uma segunda versão do mapa de isotermas foi produzida como decorrência da redefinição de limites de contorno [7].

Devido ao gradiente geotermal regional médio, a temperatura da água pode chegar a superfície entre 40 °C e 80 °C. Estas temperaturas são comparativamente elevadas em relação às temperaturas médias anuais do ar obtidas entre 1930 e 1990: outubro a março: 15 °C a 24 °C; setembro e maio: 12 °C a 21 °C; junho a agosto: 9 °C a 21 °C [8].

As isotermas do aquífero Guarani seguem a estrutura do topo da Formação Botucatu, evidenciando a existência de três áreas no Brasil (Oeste dos Estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina) e uma na Argentina (Província de Entre Rios), onde as temperaturas são maiores que 55 °C. As isotermas de 40 °C no Brasil ocupam 81 % da área total. Já as isotermas de 60 °C ou mais estão inteiramente distribuídas dentro do Brasil (Mapa 2).

A extensão da área e distribuição de isotermas de 25 °C, 40 °C e 50 °C pelos quatro países são apresentadas na seguinte tabela 1.

TABELA 1 – Extensão de áreas com distribuição de isotermas de 25 °C, 40 °C e 50 °C nos quatro países, e distribuição da energia geotermal no topo do aquífero.

Países	25 °C	40 °C	50 °C
	(772.500 km <sup>2</sup> )	(424.000 km <sup>2</sup> )	(213.200 km <sup>2</sup> )
Área (km <sup>2</sup> ) (%)			
Argentina	93.500 (12)	71.500 (16,4)	49.000 (23)
Brasil	626.000 (81)	343.500 (81)	160.000 (75)
Paraguai	21.000 (3)	2.500 (0,6)	
Uruguai	32.000 (4)	6.500 (2)	4.200 (2)

Fonte: [5].

### Avaliação da energia geotermal potencial

A energia geotermal potencial foi estimada por Tallbacka [5], considerando determinadas características do aquífero como porosidade de 20 %, temperatura de 40 °C, capacidade de calor específico da rocha e capacidade de calor específico da água de 2,2 e 4,5 x 10<sup>6</sup> J/m<sup>3</sup>/°C, respectivamente. A distribuição de energia geotermal potencial nos quatro países é apresentada na tabela 2.

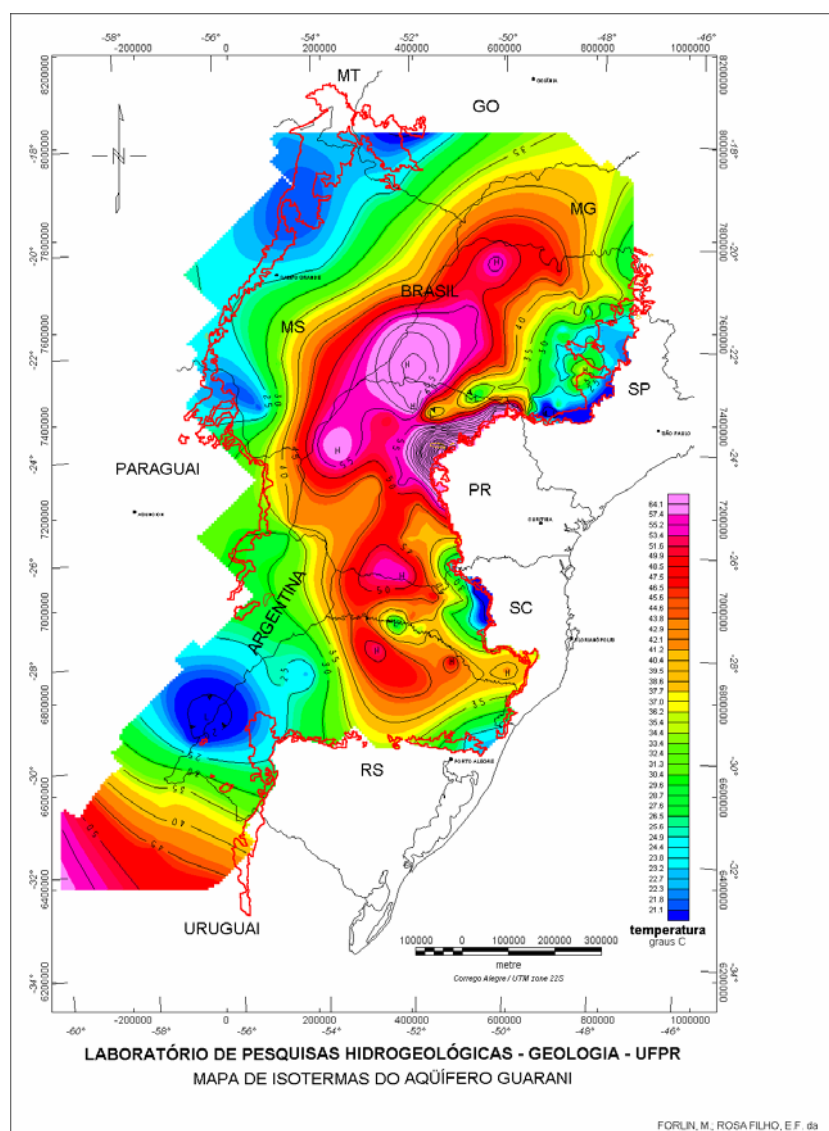
TABELA 2 – Estimativa de energia geotermal potencial nos quatro países.

Parâmetro	Total	Argentina	Brasil	Paraguai	Uruguai
Volume de rocha: $10^{12} \text{ m}^3$	276	45	233	2	6
Volume de água: $10^{12} \text{ m}^3$	92	15.1	74.5	0,6	1.8
Energia geotermal (no local) $10^{18} \text{ J}$	41.000	6.724	33.210	246	820

Fonte: [5].

A energia potencial geotermal de  $41.000 \times 10^{18} \text{ J}$  corresponde a cerca de 1.000 bilhões de toneladas de óleo combustível, considerando que a energia térmica deste combustível seja de  $41 \times 10^9 \text{ J/ton}$ ; ou a aproximadamente  $1.170 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de gás natural, assumindo a energia térmica de  $35 \times 10^9 \text{ J/100 m}^3$ .

MAPA 2 – Mapa de isotermas do Sistema Aquífero Guarani



Fonte: [7], modificado de [6].

O calor que pode ser armazenado em superfície é dividido em reserva técnica e reserva econômica. A reserva técnica é calculada como uma fração da energia potencial (30 %), e a reserva econômica é calculada mediante o conhecimento da demanda, do tipo de utilização e da tecnologia adotada para relacionar o calor e a energia fornecida. A reserva técnica estimada nos quatro países é apresentada na tabela 3.

TABELA 3 – Reserva de energia geotermal técnica

Parâmetro	Total	Argentina	Brasil	Paraguai	Uruguai
Energia térmica (no local) $10^{18}$ J	41.000	6.724	33.210	246	820
Reserva Técnica $10^{18}$ J	12.300	2.017	9.963	74	246
Óleo combustível $10^9$ ton	1.000	164	810	6	20
Gás natural $10^{12}$ m <sup>3</sup>	1.170	192	948	7	23

Fonte: [5].

De acordo com esta estimativa, a reserva técnica no Brasil equivale a 810.000 milhões de toneladas de óleo combustível ou a 948.000.000 trilhões de m<sup>3</sup> de gás natural.

Considerando o preço do óleo combustível em USD 120/ton, pode-se estimar o valor econômico da energia térmica equivalente (tabela 4).

TABELA 4 – Avaliação econômica da reserva técnica nos quatro países (equivalência em óleo combustível).

Parâmetro	Total	Argentina	Brasil	Paraguai	Uruguai
Reserva Técnica $10^{18}$ J	12.300	2.017	9.963	74	246
Óleo combustível equivalente $10^9$ ton	300	49	243	2	6
Valor em $10^{12}$ USD	36	5,88	29,16	0,24	0,7
MWh $10^9$	3,416	0,56	2,767	0,023	0,068

Fonte: modificado de [5].

Considerando a tarifa média total de energia elétrica no Brasil de R\$122,79/MWh [9] o valor correspondente à reserva técnica seria de 339 bilhões de reais.

### Usos e potencialidade das águas termais

As águas termais podem ser utilizadas direta ou indiretamente e escalas variáveis dependendo da tecnologia empregada.

- Balneoterapia: o uso mais antigo e difundido no mundo, tanto para recreação como para tratamento fisioterápico (SPAs).

- Controle da temperatura ambiente: por não requer temperaturas elevadas são utilizadas na calefação de criadouros e controle da temperatura ambiente, em especial para recém nascidos. De modo particular as águas termais também podem ser utilizadas para o cultivo de flores e vegetais fora de estações, aquicultura e combate a geadas.
- Aplicação industrial: utilização no processo de fermentação de cerveja (temperatura próxima a 40 °C), geração de biogás, desidratação de frutas e ervas (temperaturas do ar entre 40 °C e 100 °C), pelar animais como o frango ou porco, e nos processos de limpeza em geral. Devido a processos de troca de calor em refrigeradores, o uso do calor geotermal poderá vir a ter importante aplicação em câmaras frigoríficas.

Contudo, a capacidade de geração de energia das águas termais do Sistema Aquífero Guarani em substituição da energia elétrica, numa região relativamente rica em potencial hidrelétrico, nunca foi adequadamente discutida.

Adicionalmente, deve ser considerado ainda que o despejo de águas aquecidas no meio ambiente pode gerar impactos altamente significativos nos ecossistemas de rios e lagos. Como sugestão de Tallbacka [5], poços de produção e injeção poderiam atuar conjuntamente, de modo a manter as águas termais num sistema (parcialmente) fechado.

Tallbacka [5] sugere ainda a possibilidade de implementação de sistemas de co-geração de energia elétrica, como tem sido implementado na Europa oriental. Nos sistemas térmicos, a energia gasta para levar a água à temperatura de turbinamento seria significativamente mais baixa se fossem contemplados sistemas de troca de calor da água aquecida do Guarani. Ressalta-se que a água do Guarani poderia não ser consumida, apenas o calor geotermal seria captado. Os combustíveis de usos termoeletrônicos convencionais seriam poupados ou ainda substituídos por combustíveis alternativos.

É possível avaliar o benefício ambiental e o benefício social que estariam relacionados à substituição da energia geotermal pela energia térmica gerada, pela queima de combustível fóssil, que resulta em liberações de gases (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) e partículas. Uma primeira aproximação dos benefícios ambientais e sociais, proposta por Tallbacka [5], apresenta o cálculo dos benefícios considerando um sistema de aquecimento e resfriamento para uma planta piloto operando durante um ano. Foi considerada uma redução de emissões em toneladas por ano e o valor monetário de acordo com o fornecido pelo Banco Mundial e GEF, supondo o fornecimento de 500 x 10<sup>12</sup> J de energia geotermal durante o período de um ano (tabela 5).

TABELA 5 – Benefícios ambiental e econômico relacionados à substituição de combustíveis tradicionais por energia geotermal de  $500 \times 10^{12}$  J.

Parâmetros	Óleo Combustível	Gás Natural	Carvão
Energia ( $10^9$ J/ton)	41	35	24,4
Eficiência	0,85	0,9	0,8
Calor bruto ( $10^{12}$ J)	588	555	625
CO <sub>2</sub> emissão (kg/ $10^9$ J)	78	57	95
SO <sub>2</sub> emissão (kg/ $10^9$ J)	0,5	-	1,2
NO <sub>x</sub> emissão (kg/ $10^9$ J)	0,2	0,1	0,3
CO <sub>2</sub> emissão anual (ton)	45.864	31.635	59.375
SO <sub>2</sub> emissão anual (ton)	294	-	750
NO <sub>x</sub> emissão anual (ton)	118	56	188
Deposição de Partículas emitidas (kg/ $10^9$ J)	0,03	-	n.a
Deposição de Partículas depositadas (ton)	18	-	n.a
Custo de emissão de CO <sub>2</sub> (R\$/ton)	17,15		
Custo de emissão de SO <sub>2</sub> (R\$/ton)	1.470,00		
Custo de emissão de NO <sub>x</sub> (R\$/ton)	612,50		
Custo de partículas depositadas (R\$/ton)	2.450,00		
Benefício Ambiental (CO <sub>2</sub> + deposição) (R\$)	830.667,6	542.564,75	1.165.281,25*
Benefício Social (SO <sub>2</sub> + NO <sub>x</sub> ) (R\$)	504.455,00	34.300,00	1.217.650,00

\* incluindo deposição de cinzas ao custo de R\$ 17.640.000

USD = R\$ 2,45

Fonte: [5].

## Conclusão

Dentro do contexto atual de conhecimentos disponíveis e da necessidade de suprimento da demanda de energia, os recursos energéticos do Sistema Aquífero Guarani-SAG devem ser considerados como de extrema importância.

A avaliação precisa do uso potencial da energia termal do SAG está diretamente relacionada ao avanço dos conhecimentos básicos dos recursos do aquífero, dos aspectos legais e de um arranjo institucional adequado ao desenvolvimento e às necessidades do setor no país, em articulação com os demais países envolvidos. A preparação do Projeto Aquífero Guarani vai possibilitar o desenvolvimento de conhecimentos cruciais, como a taxa de uso sustentável da energia geotermal do Guarani.

O desenvolvimento dos conhecimentos sobre o SAG possibilita abrir o debate sobre a energia geotermal no contexto da matriz energética brasileira. Assim, o aprofundamento desse debate deverá ser favorecido uma coordenação estratégica que permita acompanhar e favorecer a incorporação dos conhecimentos gerados pela Agência Nacional de Águas e as diversas instituições envolvidas na temática.



## Referências bibliográficas

- [1] ROCHA, G.A. 1997. *O grande manancial do Cone Sul*. USP. Revista de Estudos Avançados n. 30. p. 191-212.
- [2] WORLD BANK - Report nº. 23490 LAC (2002). *Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System Project: Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai*, Global Environment Facility-GEF, World Bank, Organização dos Estados Americanos. 150 p.
- [3] REBOUÇAS, A. (2000) – *Aqüífero Guarani, Características Gerais e Potenciais*. Secretaria de Recursos Hídricos – Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Nota Técnica.
- [4] AMORE, L.; VARGAS, F.P.H.; OLIVEIRA, W.A. (2001). *Mapa Esquemático do Sistema Aqüífero Guarani Como Contribuição à Gestão*. In: Anais , II Simpósio Paraguaio de Geologia e III Simpósio Paraguaio de Águas Subterrâneas e Perfuração de Poços. Assunção, Paraguai.
- [5] TALLBACKA L. (2001). *An Assessment of Opportunities for Geothermal Energy Utilization. Geothermal Project Component*. Organization of American States (Contract no. R-20226). In: Brasil. Agência Nacional de Águas, Site Experimental do Projeto Aqüífero Guarani ([www.aquiferoguarani.hpg.com.br](http://www.aquiferoguarani.hpg.com.br)).
- [6] ARAÚJO, L.M., FRANÇA, A.B. E POTTER, P.E. (1999). *Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and Comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA*. Hydrogeology Journal (1999) 7:317-336.
- [7] ROSA FILHO, E.F. (2001). *Informe do Componente 1: Conhecimentos básicos do SAG*. In: Brasil. Agência Nacional de Águas, Site Experimental do Projeto Aqüífero Guarani ([www.aquiferoguarani.hpg.com.br](http://www.aquiferoguarani.hpg.com.br)).
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 2002. *Temperaturas anuais médias entre 1930 e 1990*. In: Página internet. ([www.inmet.gov.br/climato/mapclima.html](http://www.inmet.gov.br/climato/mapclima.html)).
- [9] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA – ANEEL. 2002. *Preço médio da tarifa de energia elétrica no Brasil em 2001*. In: Página internet ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) - tarifas praticadas).