

MOBILIDADE URANÍFERA NOS AQUIFEROS DE ÁGUAS DA PRATA (SP)

DANIEL MARCOS BONOTTO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP
 Departamento de Física
 Campus de Rio Claro
 Caixa Postal 178
 13500 – Rio Claro – SP

KENKICHI FUJIMORI

Instituto Astronômico e Geofísico da USP
 Departamento de Geofísica
 Caixa Postal 30627
 01051 – São Paulo – SP

The uranium-238 content of spring waters of Águas da Prata (SP) – Platina, Paiol, Villela, Prata-Radioativa, Prata-Nova, Vitória, Boi and Prata-Antiga – was found.

The uranium analysis procedure consisted of the following steps: addition of ^{232}U spike to the samples, coprecipitation with iron, iron extraction with organic solvent, separation on anion-exchange resin, extraction with iron, iron extraction with TTA, deposition on stainless steel disc and determination of uranium content by alpha spectrometry.

The results were correlated with the chemical analysis of the principal anionic and cationic species dissolved in these waters. Direct significative correlations between uranium content and sulfate, bicarbonate and chloride were observed, showing that uranium probably forms soluble complexes with anions SO_4^{2-} , CO_3^{2-} and Cl^- .

INTRODUÇÃO

O urânio possui muitas valências (2+, 3+, 4+, 5+ e 6+) sendo um agente redutor tão poderoso nas duas valências menores que pode liberar hidrogênio da água (Krauskopf, 1972). Ocorrências de urânio nos estados de oxidação 4+ e 6+ são comuns na natureza e a valência 5+, em presença de água, é instável em relação a 4+ e 6+.

O íon uranoso (U^{4+}) tem raio iônico 1,05Å, próximo ao do cálcio e terras raras trivalentes e seu potencial iônico é 4 (Rösler & Lange, 1972). Nesse estado é considerado primário, sendo o UO_2 o principal composto em depósitos, o qual ocorre na variedade bem cristalizada uraninita e na forma microcristalina pechblenda. Na faixa de variação de pH entre 2 e 7, a uraninita é extremamente insolúvel em solução. Os complexos uranosos de flúor aumentam a solubilidade da uraninita nas águas subterrâneas abaixo de pH 4, estando ilustrada na Fig. 1 sua contribuição em relação à de outros compostos uranosos presentes nas águas subterrâneas.

O U^{6+} , quase sempre encontrado na forma do radical uranila UO_2^{2+} , tem raio iônico 0,80Å e potencial iônico 7 (Rösler & Lange, 1972). O campo de estabilidade do UO_2^{2+} é bem mais amplo que o do U^{4+} e U^{5+} (como UO_2^+), o que pode ser visualizado num diagrama Eh – pH (Fig. 2).

Apesar de presente no estado de valência 4+ nos minerais ígneos primários, em contato com ambientes oxidantes

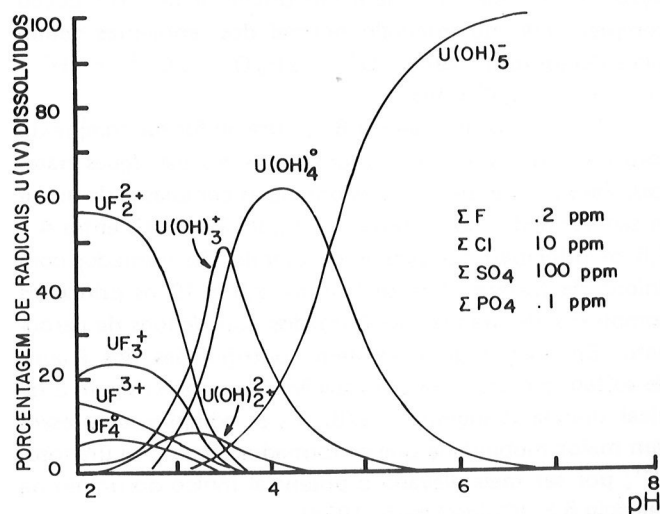


Figura 1 – Distribuição dos complexos uranosos em função do pH para algumas concentrações típicas de radicais em águas subterrâneas a 25°C. Segundo Langmuir (1978).

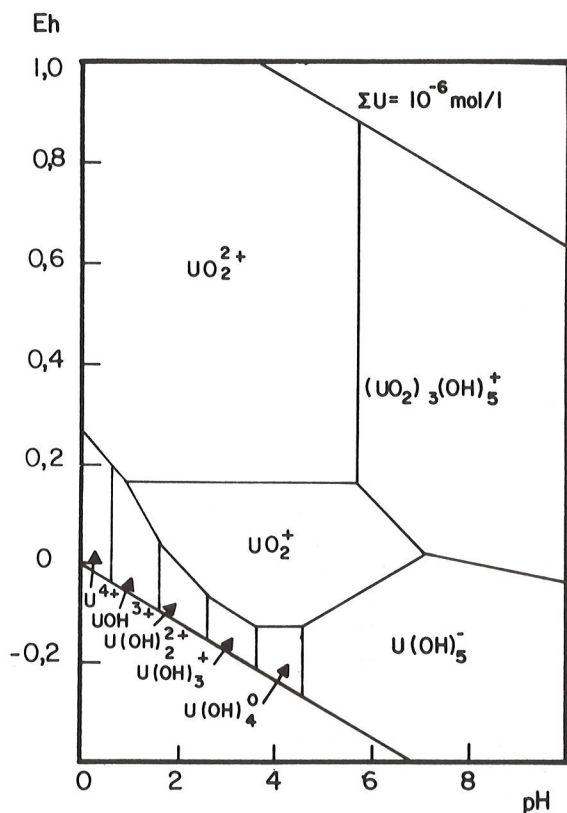


Figura 2 — Diagrama Eh-pH mostrando a importância relativa das valências 4+, 5+ e 6+ do urânio, a 25°C e para $\Sigma U = 10^{-6} M$. Segundo Langmuir (1978).

o urânio sofre modificação em seu estado de valência, passando de 6+, sob a forma do radical uranila UO_2^{2+} . A transição de U^{4+} para U^{6+} tem um potencial de oxidação-redução compreendido no intervalo normal dos ambientes geológicos (Krauskopf, 1972): $U^{4+} + 2H_2O \rightleftharpoons UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e^-$ $E^0 = +0,33$ Volts.

No estado de valência 6+, o urânio forma complexos solúveis com os ânions comuns presentes nas águas naturais. Para pH's entre 2 e 4 os principais complexos de uranila são formados com ânions de flúor. Para pH's entre 4 e 7,5 os principais complexos de uranila são formados com ânions de fosfato. Para pH's entre 7,5 e 10 os principais complexos de uranila são formados com ânions de carbonato. Em menor grau, existem contribuições dos ânions de sulfato e cloro para a formação de complexos com o radical uranila (Langmuir, 1978). Esses complexos apresentam maior mobilidade que os formados com o íon uranoso, U^{4+} , por ser mais elevado o potencial iônico do urânio na valência 6+, (Goldschmidt, 1954).

No presente trabalho determinou-se a concentração de urânio-238 nas águas subterrâneas das principais fontes da Estância Hidromineral de Águas da Prata, no Estado de São Paulo, conhecida por sua natureza turística e econômica. Analisaram-se as águas das seguintes fontes: Platina, Paiol, Villela, Prata-Radioativa, Prata-Nova, Vitória, Boi e

Prata-Antiga. Os resultados obtidos foram correlacionados com os resultantes das análises químicas existentes para as águas dessas fontes e então interpretados em função da mobilidade geoquímica do urânio nas águas subterrâneas.

SITUAÇÃO GEOLÓGICA

A cidade de Águas da Prata situa-se no Estado de São Paulo na divisa com Minas Gerais, localizando-se à borda ocidental do Planalto de Poços de Caldas. No mapa geológico de Bittencourt & Taltasse (1972) estão localizadas as fontes amostradas e o contexto em que estão inseridas (Fig. 3).

A Fonte Platina surge de uma lente de fonólitos, que aparece no fundo do vale de um pequeno córrego.

A Fonte Paiol localiza-se em um vale onde se efetuaram perfurações que encontraram tufo vulcânicos, foiaftos e fonólitos.

A Fonte Villela emerge ao pé de um paredão de arenito há 180m acima do nível do vale onde se situa o Rio dos Quartéis.

A Fonte Prata-Radioativa surge das fraturas de arenito silicificado e recristalizado, em contato com siltitos.

A Fonte Prata-Nova consiste de perfurações em diabásio e fonólito.

A Fonte do Boi nasce diretamente de paredão de arenito, através de fraturas.

A Fonte Vitória surge ao pé de uma elevação de diabásio.

A Fonte Prata-Antiga apresenta captação efetuada por uma perfuração de 13m do diabásio.

As fontes Prata-Antiga, Prata-Nova, Prata-Radioativa, Paiol e Villela pertencem à Empresa das Águas Prata S.A. e somente as três primeiras são usadas para fins comerciais. A Fonte Paiol, antigamente engarrafada, encontra-se abandonada ao uso do público, o mesmo ocorrendo com a Fonte Platina. As fontes Vitória e do Boi, localizadas na propriedade da Empresa das Águas Prata S.A. são reservadas ao público sob os cuidados da Prefeitura de Águas da Prata.

METODOLOGIA

A campanha de coleta de amostras foi realizada em 05 de junho de 1982. Para a análise do teor de urânio, coletou-se uma amostra de cada fonte referida, a qual foi recolhida diretamente da fonte em vasilhame de polietileno com capacidade para 20 litros. Adicionou-se a cada amostra HCl para diminuir o pH e evitar a precipitação de ferro no recipiente. Após filtração, introduziu-se uma quantidade conhecida do traçador ^{232}U - ^{228}Th em equilíbrio radioativo, sendo a amostra vigorosamente agitada para difusão completa dos isótopos adicionados. A quantidade de traçador utilizada foi de $8,65 \pm 0,20$ dpm, tendo sido determinada por intermédio de um padrão de urânio de atividade conhecida.

O ^{232}U possui meia-vida de 72 anos, é produzido em reator nuclear por ativação neutrônica de ^{232}Th e origina o

^{228}Th em seu decaimento por emissão de partícula α de 5,3 MeV de energia. A energia e respectiva intensidade das partículas α emitidas pelos isótopos presentes em seu esquema de decaimento estão ilustradas na Fig. 4.

O procedimento de extração de urânio das águas envolveu várias etapas:

- coprecipitação de urânio com $\text{Fe}(\text{OH})_3$;
- extração de ferro com solvente orgânico, no caso, éter isopropílico;
- eliminação de tório através de passagem da solução contendo urânio em resina aniônica, fortemente básica, cujo grupo ativo é o radical R_4N^+ ;
- extração de urânio com Tenoil Tri-Fluoracetona diluído em benzeno;
- deposição em disco de aço inoxidável.

O procedimento básico de extração de urânio tem sido descrito por vários pesquisadores, a maioria dos quais estão referidos no artigo de Osmond & Cowart (1976). A metodologia empregada no presente trabalho seguiu a orientação geral apresentada por Osmond & Cowart (1976), com algumas modificações introduzidas por Gomes (1978) e Bonotto (1982).

Determinou-se um rendimento químico de 62% para o processo de extração de urânio, efetuando-se a dissolução da quantidade de traçador utilizada em 19 litros de água destilada e aplicando-se toda a metodologia empregada para as amostras coletadas. Para se determinar a concentração de urânio-238, C_{238} , empregou-se um espectrômetro alfa tipo detector semiconductor de barreira de superfície, da Ortec Incorporated (Fig. 5).

Calibrou-se o espectrômetro por intermédio de padrão de urânio preparado no Centre de Faibles Radioactivités, Laboratoire Mixte CNRS-CEA, Gif-sur-Yvette, França. A Fig. 6 apresenta o diagrama Energia vs Canal na região de energia dos isótopos naturais de urânio ^{238}U , ^{234}U e ^{235}U — e traçador ^{232}U adicionado às amostras (os isótopos de ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po e ^{212}Bi são "filhos" do ^{232}U). A resolução espectroscópica do detector pa-

ra o pico do ^{238}U foi 1,8% (67 KeV) e, na região dos picos de interesse, a faixa de canais usada foi 350-530, o que resultou em uma dispersão de 9,6 KeV/canal.

O valor de C_{238} é obtido pelo princípio de diluição isotópica que estabelece que quando se mistura um número conhecido A_{232} de átomos de ^{232}U com um número desconhecido A_{238} de átomos de ^{238}U , após completa homogeneização isotópica, a razão entre as contagens N_{238} e N_{232} obtidas a partir do espectrograma obedecerá a relação:

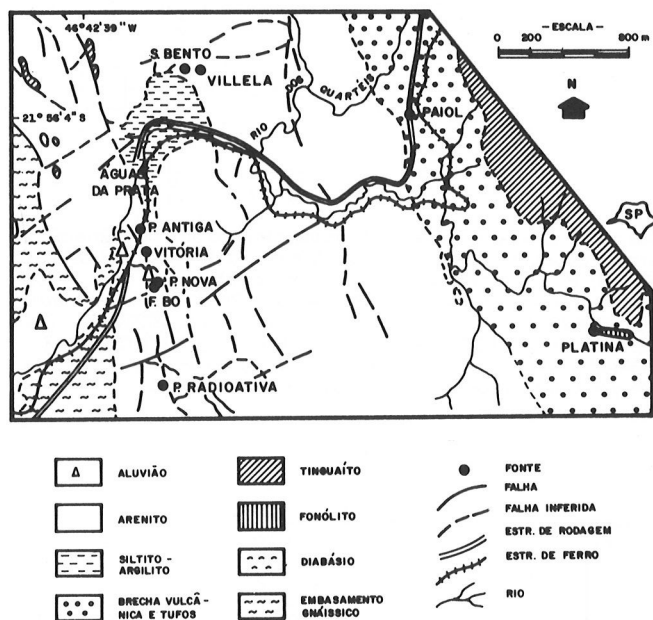


Figura 3 — Mapa geológico do município de Águas da Prata (SP). Conforme Bittencourt & Taltasse (1972).

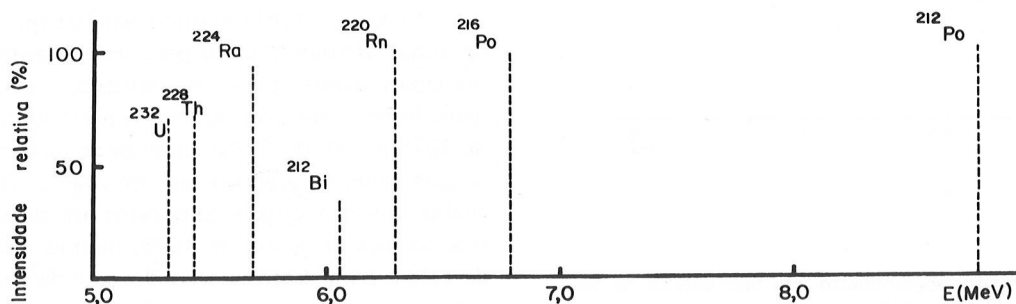


Figura 4 — Energia e intensidade das partículas alfa emitidas pelos isótopos da série de decaimento do ^{232}U . Conforme Lederer et al. (1967).

$$\frac{A_{238}}{(A_{232}) \text{ conhecido}} = \left[\frac{N_{238}}{N_{232}} \right] \text{ medido}$$

Em todas as análises permaneceram fixos o volume de água empregado (19l) e a quantidade de traçador adicionada (8,65 dpm), de maneira que a concentração C_{238} (em $\mu\text{g/l}$ ou ppb) é obtida a partir da expressão:

$$C_{238} = 0,61 \left[\frac{N_{238}}{N_{232}} \right] \text{ medido}$$

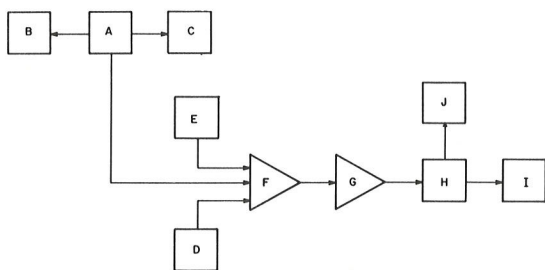


Figura 5 — Diagrama de bloco do espectrômetro alfa tipo detector de barreira de superfície. A — Detetor de barreira de superfície ORTEC BA-026; B — Bomba de vácuo, Welch Scientific Co, Mod. 1402; C — Vacuômetro Varian NRC 804-A; D — Polarizador do detetor, ORTEC 428; E — Fonte de alimentação, ORTEC 402M; F — Pré-amplificador, ORTEC 109A; G — Amplificador, ORTEC 485; H — Analisador Multicanal, Norland IT-5300, 1024 canais; I — Teletipo, Teletype Corporation; J — Registrador X-Y, HP 7034A.

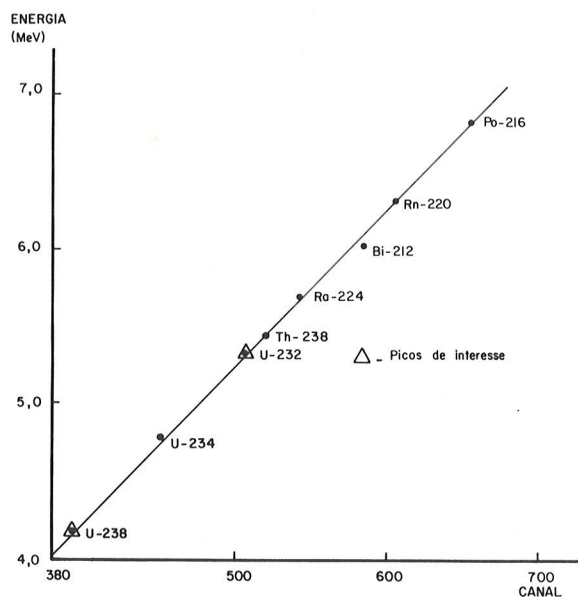


Figura 6 — Calibração do espectrômetro alfa tipo detector de barreira de superfície em energia x canal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos para C_{238} , sendo o erro associado a cada valor calculado a partir do teorema de propagação de erros. Considerações acerca do desequilíbrio entre ^{234}U e ^{238}U estão inseridas em Bonotto & Fujimori (1984).

SIGLA	FONTE	$C_{238} \pm \sigma_{C_{238}}$ (ppb)
PL	Platina	$0,24 \pm 0,03$
PN	Prata-Nova	$3,87 \pm 0,40$
PR	Prata-Radioativa	$0,03 \pm 0,007$
PA	Prata-Antiga	$0,59 \pm 0,15$
PO	Paiol	$0,60 \pm 0,12$
VL	Villela	$0,53 \pm 0,07$
VT	Vitória	$1,04 \pm 0,21$
BO	Boi	$0,08 \pm 0,02$

Tabela 1 — Concentração de urânio-238 nas águas das Fontes de Águas da Prata (SP).

As águas surgentes das rochas vulcânicas das fontes de Prata-Nova e Vitória apresentaram os valores mais elevados de concentração de urânio, respectivamente, 3,87 ppb e 1,04 ppb. A água da Fonte Prata-Radioativa, surgente das fraturas de arenito silicificado e recristalizado, apresentou o valor menos elevado de concentração de urânio, isto é, 0,03 ppb. Na Fig. 7 está representado o espectrograma alfa resultante da amostra analisada.

As águas das Fontes Prata-Radioativa e do Boi, surgentes de arenitos, apresentaram os menores valores de concentração de urânio e os dados de concentração de ^{238}U das águas das fontes surgentes das rochas vulcânicas sugerem a ocorrência de maior dissolução de urânio em relação às águas das fontes areníticas.

Perfurações efetuadas na Fonte Villela mostraram que o perfil de sondagem consiste de arenito muito alterado entre 0 e 10m de profundidade, de diabásio entre 10 e 59m e de fonólito entre 59 e 61m de profundidade. Como a água nessa fonte surge de fraturas no sentido vertical e horizontal, possivelmente ela percola rochas vulcânicas em seu trajeto até a surgência, aumentando o teor de ^{238}U dissolvido em relação ao das águas das outras fontes areníticas.

Szikszy (1981) efetuou análises químicas das águas de todas as fontes, tanto para os elementos e compostos principais como para os elementos traços, coletando mensalmente amostras durante o período de um ano (maio de 1978 a abril de 1979), anterior ao da campanha de coleta para determinação do teor de urânio. Os resultados da análise dos elementos e compostos principais para as amostras do mês de junho de 1978, mesmo mês da campanha de coleta para determinação do teor de urânio, e para as médias anuais das análises estão representados na Tabela 2. Na mesma tabela r'_s representa o coeficiente de correlação de Spearman entre C_{238} e os resultados da análise química

Tabela 2 — Resultados da análise química dos elementos e compostos principais das águas das Fontes de Águas da Prata (SP), conforme Szikszay (1981). Todos os resultados estão expressos em mg/l.

Fonte	Período de Coleta	Sólidos totais dissolvidos	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	SiO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	PO ₄	F	NH ₄	NO ₂	NO ₃
Prata-Antiga	junho de 1978	2160,00	14,40	14,00	448,00	20,50	0,000	0,030	4,00	1426,80	35,00	26,00	0,44	14,90	0,000	0,020	12,30
	05/78 a 04/79 (média)	2257,17	8,86	13,67	501,91	20,62	0,004	0,098	11,57	1376,00	24,70	89,60	0,27	13,50	0,010	0,043	12,88
Prata-Radioativa	junho de 1978	102,00	4,50	3,80	2,00	6,60	0,000	0,050	4,00	54,90	5,00	0,00	0,48	0,50	0,000	0,020	18,00
	05/78 a 04/79 (média)	82,00	3,95	4,36	2,52	5,55	0,004	0,037	10,88	48,50	1,35	1,90	0,36	0,54	0,006	0,056	7,19
Prata-Nova	junho de 1978	1872,00	4,80	5,20	570,00	12,00	0,008	0,060	4,20	1417,70	35,00	44,00	0,48	14,50	0,000	0,060	17,60
	05/78 a 04/79 (média)	2258,08	4,49	5,96	619,86	14,79	0,010	0,097	12,27	1389,20	27,30	98,00	0,21	14,80	0,010	0,040	15,62
Vitória	junho de 1978	1078,00	3,10	0,40	310,00	4,00	0,018	0,030	7,30	609,80	15,00	21,00	0,54	6,50	0,030	0,020	13,60
	05/78 a 04/79 (média)	1042,00	3,50	3,42	272,70	7,63	0,010	0,103	11,19	604,70	18,90	38,60	0,22	8,30	0,007	0,045	13,14
Boi	junho de 1978	79,00	2,40	3,20	4,20	6,80	0,015	0,010	5,50	24,40	3,00	3,00	0,38	0,56	0,050	0,030	16,70
	05/78 a 04/79 (média)	54,00	1,71	1,84	3,87	5,79	0,006	0,020	10,37	26,80	1,70	1,20	0,18	0,66	0,004	0,050	6,6
Platina	junho de 1978	895,00	1,60	2,30	240,00	4,70	0,009	0,010	6,00	573,20	5,00	16,00	0,48	18,40	0,060	0,060	16,70
	05/78 a 04/79 (média)	935,67	1,21	1,01	250,04	4,80	0,003	0,029	11,14	571,10	13,10	13,00	0,23	16,90	0,028	0,044	10,82
Paíol	junho de 1978	2260,00	0,38	0,30	590,00	7,00	0,004	0,040	5,90	1512,20	28,00	33,00	0,50	20,20	0,000	0,006	15,80
	05/78 a 04/79 (média)	2625,42	0,87	1,23	734,50	11,93	0,003	0,070	11,00	1572,00	18,80	91,20	0,18	20,60	0,019	0,040	13,41
Villete	junho de 1978	47,00	1,60	0,20	2,00	5,80	0,000	0,000	3,30	15,00	2,50	0,00	0,45	0,66	0,060	0,030	15,40
	05/78 a 04/79 (média)	43,08	1,24	0,78	2,56	6,93	0,002	0,019	5,72	17,00	1,25	2,70	0,16	0,56	0,016	0,060	6,01
	r's	0,64	0,16	-0,02	0,74	0,21	0,26	0,36	0,29	0,64	0,67	0,83	0,50	0,52	-0,23	0,00	-0,36
	t's	0,71	0,17	0,26	0,81	0,76	0,40	0,67	0,69	0,71	0,78	0,88	-0,23	0,55	0,28	-0,56	0,81

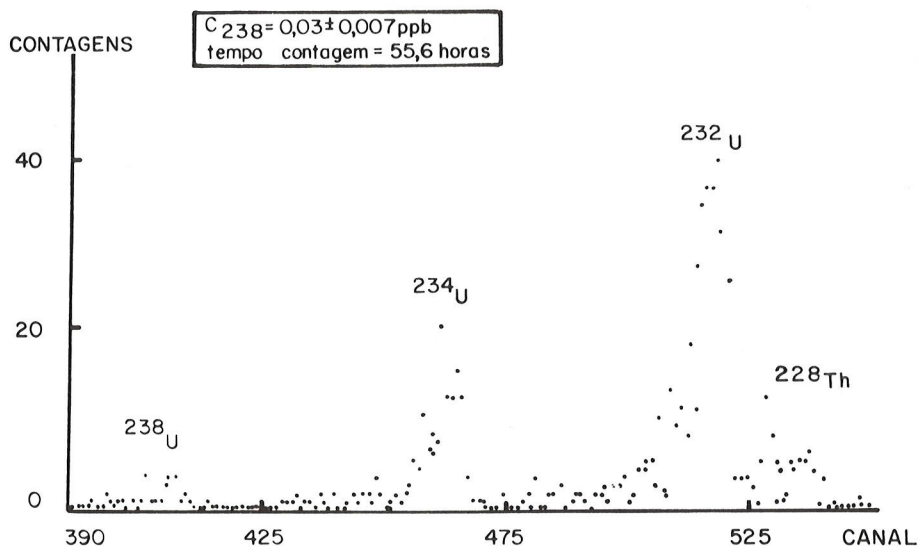


Figura 7 — Espectrograma alfa de amostra da Fonte Prata-Radioativa, Águas da Prata (SP).

do mês de junho, enquanto que r_s representa o coeficiente de correlação de Spearman entre C_{238} e a média anual das análises químicas.

Para as análises de potássio, ferro, sílica, nitrito e nitrato os resultados obtidos para r_s mostraram-se significativos a um nível de significância de 0,05, o mesmo não ocorrendo para r'_s . Possivelmente isto se deve ao fato de que as condições climáticas afetam diferentemente os resultados das análises químicas mensais, tornando os valores médios não representativos dos obtidos para o mês de junho, razão pela qual essas correlações não são consideradas no presente trabalho.

Sob este aspecto, dentre as espécies catiônicas dissolvidas nas águas das fontes, o urânio estaria relacionado com o sódio solubilizado dos diferentes extratos geológicos ao passo que dentre as espécies aniônicas estaria associado com o sulfato, cloro e bicarbonato. A correlação positiva entre C_{238} e sólidos totais dissolvidos pode ser justificada pela possível associação do urânio com os radicais desses ânions e o cátion Na^+ .

Dentre as espécies aniônicas que forneceram correlações positivas, obteve-se o valor mais significativo para o radical de sulfato ($r_s = 0,88$), conforme ilustra a Fig. 8. A reta traçada foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados, estando também representado seu intervalo de confiança de 95%. Considera-se como fonte principal de sulfato nessas águas o material de origem vulcânica e o grupo de feldspatóides alcalinos (Szikszay, 1981). O teor mais elevado de sulfato e urânio dissolvido foi encontrado para as águas da Fonte Prata-Nova, que sai jorrante das perfurações efetuadas em diabásio e fonólito, ao passo que o teor menos elevado foi obtido para as águas da Fonte Prata-Radioativa, localizada em lugar elevado e surgente das fraturas do arenito.

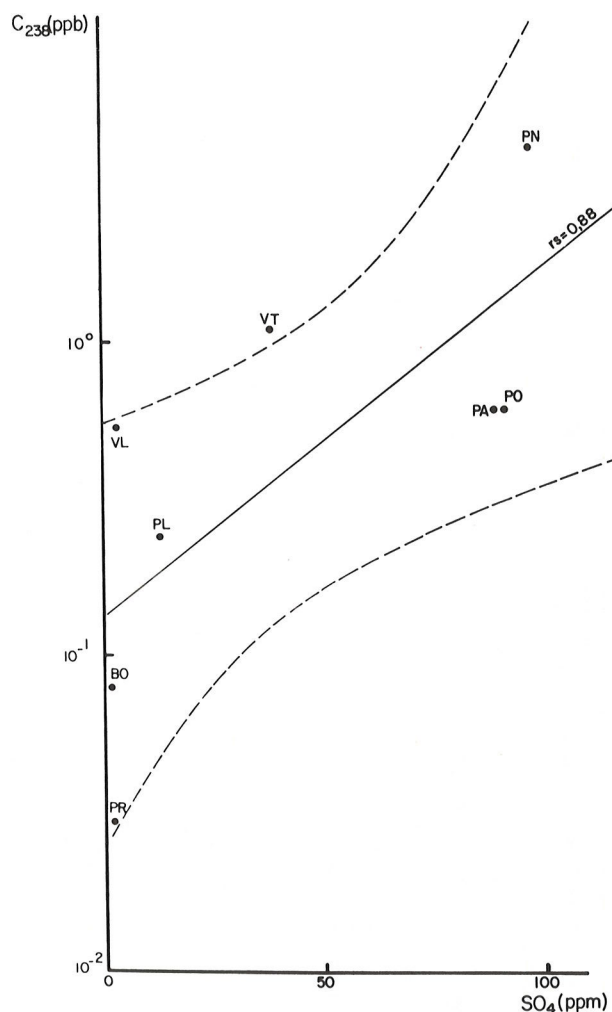


Figura 8 — Urânio-238 vs sulfato dissolvido nas águas das fontes de Águas da Prata (SP). Dados de SO_4 : média das análises mensais efetuadas no período de maio/78 a abril/79, por Szikszay (1981).

Esses resultados demonstram que a presença de enxofre nessas águas é um fator importante na solubilização de urânio. Também pode-se notar isto quando se analisa a Fig. 9, ilustrativa da solubilidade do complexo de uranila UO_2SO_4 e outras espécies químicas significantes em função do pH, numa água subterrânea a 25°C com $\Sigma U = 10^{-8} M$ (2,4 ppb) e $\Sigma SO_4 = 10^{-3} M$ (100 ppm). No período de maio de 1978 a abril de 1979, Szikszay (1981) também obteve dados mensais de pH para as águas das fontes estudadas, observando que as águas das Fontes Prata-Radioativa, Villela e do Boi apresentaram valores de pH variando de 4 a 5, enquanto que as águas das Fontes Paiol, Prata-Nova, Prata-Antiga, Platina e Vitória apresentaram valores entre 5,3 e 6,5.

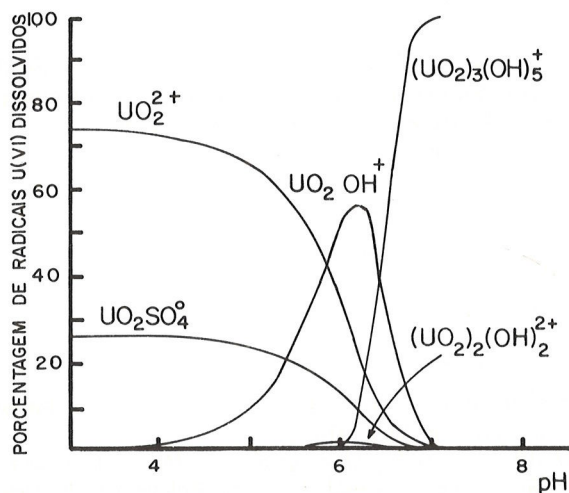


Figura 9 — Distribuição de complexos de sulfato de uranila em função do pH, a 25°C, com $\Sigma U = 10^{-8} M$ e $\Sigma SO_4 = 10^{-3} M$. Segundo Langmuir (1978).

Correlações significativas também foram encontradas entre a concentração de urânio e os teores de cloro e bicarbonato nas águas. A fonte principal de cloro nessas águas é o material proveniente da atividade vulcânica e os feldspatóides das rochas alcalinas enquanto que a fonte de bicarbonato constitui o gás carbônico proveniente das reações biológicas e químicas que ocorrem no solo (Szikszay, 1981). Obteve-se um coeficiente de correlação $r_s = 0,78$ entre os teores de cloro e urânio nessas águas (Fig. 10) e $r_s = 0,71$ entre os teores de bicarbonato e urânio (Fig. 11).

Esses resultados sugerem que o íon uranila UO_2^{2+} também pode estar formando complexos solúveis com os ânions CO_3^{2-} e Cl^- . Para o caso dos ânions CO_3^{2-} , pode-se obter uma comprovação deste fato quando se observa em detalhes a Fig. 12. Ela mostra que os complexos de carbonato de uranila são as principais espécies químicas em pH's de 5 a 10, em água subterrânea a 25°C, com $\Sigma U = 10^{-8} M$ e à pressão de CO_2 de 10^{-2} atm.

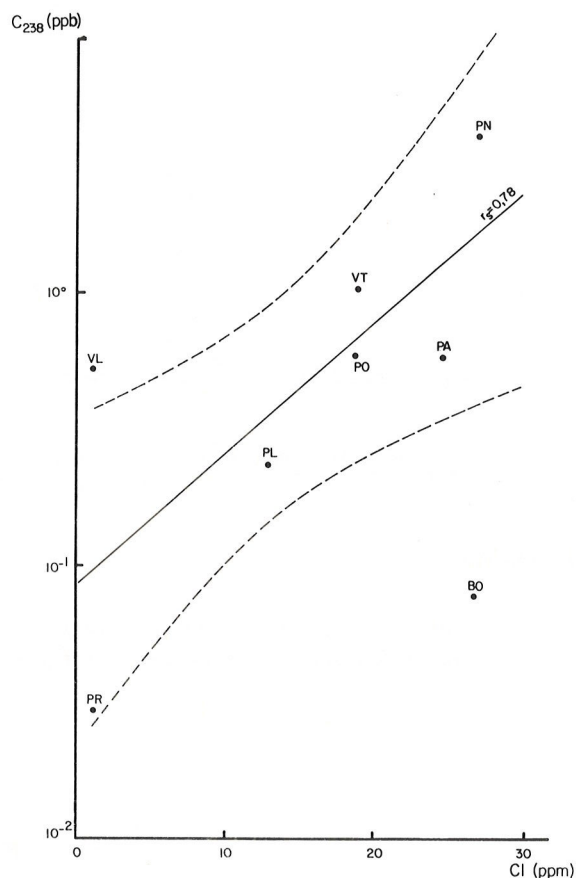


Figura 10 — Urânio-238 vs cloro dissolvido nas águas das fontes de Águas da Prata (SP). Dados de Cl: média das análises mensais efetuadas no período de maio/78 a abril/79, por Szikszay (1981).

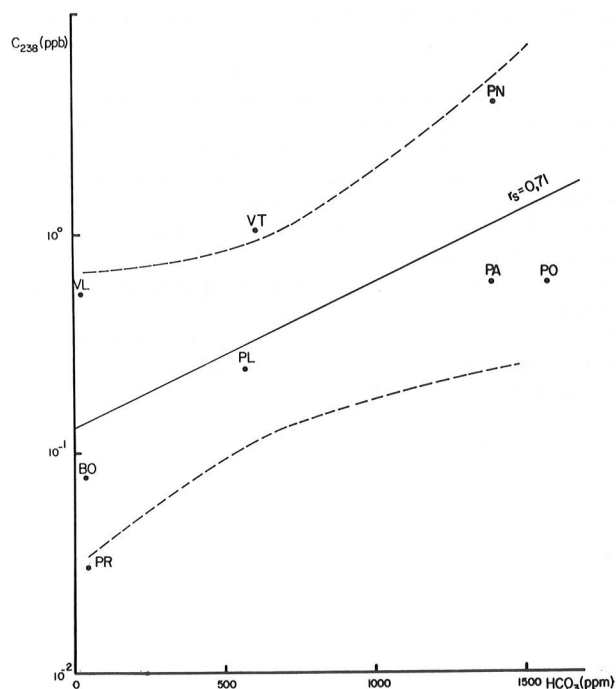


Figura 11 — Urânio-238 vs bicarbonato dissolvido nas águas das fontes de Águas da Prata (SP). Dados de HCO_3 : média das análises mensais efetuadas no período de maio/78 a abril/79, por Szikszay (1981).

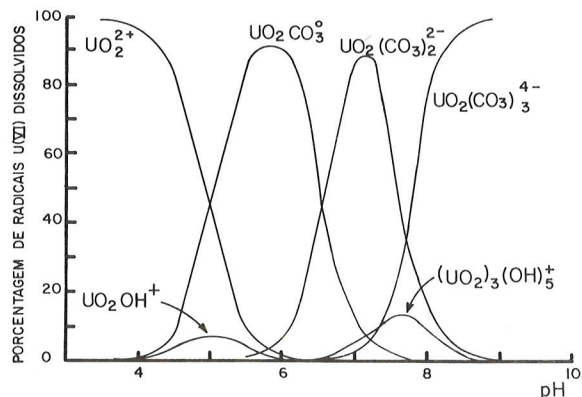


Figura 12 — Distribuição de complexos de carbonato de urânio em função do pH, a 25°C, para $PCO_2 = 10^{-2}$ atm e $\Sigma U = 10^{-8}$ M. Segundo Langmuir (1978).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a concentração de urânio dissolvido nas águas da Estância Hidromineral de Águas da

Prata acusaram valores menores que 10 ppb, comuns nas zonas oxidantes de recarga das águas subterrâneas em áreas uraníferas (Chatam et al., 1981). Obteve-se o maior teor (3,87 ppb) para a água da Fonte Prata-Nova, surgente de perfurações em diabásio e fonólito.

Os dados indicam que o urânio é transportado para as águas subterrâneas estudadas, sugerindo que o transporte possivelmente ocorre no estado de valência 6+ na forma do fon uranila UO_2^{2+} .

Correlações efetuadas entre o teor de urânio e as principais espécies aniônicas presentes nas águas estudadas mostram que o fon uranila pode estar formando complexos solúveis com os ânions SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e Cl^- , com uma provável predominância do complexo UO_2SO_4 , por ser mais significativo o coeficiente de correlação encontrado ($r_s = 0,88$).

AGRADECIMENTOS

À Dra. Lycia M. C. P. M. Nordemann, pela cessão do padrão de urânio utilizado na calibração do espectrômetro alfa. A FINEP pelo auxílio à pesquisa concedido.

REFERÊNCIAS

- BITTENCOURT, I. & TALTASSE, P. — 1972 — Mapa Geológico de Águas da Prata (SP), IG/USP.
- BONOTTO, D. M. — 1982 — Aplicação dos Dados do Fracionamento Isotópico $^{234}U/^{238}U$ nos Problemas Geoquímicos dos Aquíferos de Águas da Prata (SP). Dissertação de Mestrado, IAG/USP, São Paulo.
- BONOTTO, D. M. & FUJIMORI, K. — 1984 — Interpretação Geoquímica do Fracionamento Isotópico de Urânio nos Aquíferos de Águas da Prata (SP). An. Acad. Brasil. Ciênc., 56: 33-41.
- CHATAM, J. R., WANTY, R. B. & LANGMUIR, D. — 1981 — Groundwater Prospecting for Sandstone-Type Uranium Deposits: The Merits of Mineral-Solution Equilibria Versus Single Element Tracer Methods. National Uranium Resource Evaluation. U. S. Dept. of Energy, 168 pp.
- GOLDSCHMIDT, V. M. — 1954 — Geochemistry. Oxford, Clarendon Press, 730 pp.
- GOMES, F. V. M. — 1978 — Aplicação dos Isótopos do Urânio como Traçadores de Água Subterrânea do Bambuí, Bahia. Dissertação de Mestrado, UFBa, Salvador.
- KRAUSKOPF, K. B. — 1972 — Introdução à Geoquímica. Editora Polígono S.A., São Paulo, 315 pp.
- LANGMUIR, R. — 1978 — Uranium Solution-Mineral Equilibria at low Temperatures with Applications to Sedimentary Ore Deposits. Geochim. Cosmochim. Acta, 42: 547-569.
- LEDERER, C. M., HOLLANDER, J. M. & PERLMAN, I. — 1967 — Table of Isotopes. 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- OSMOND, J. K. & COWART, J. B. — 1976 — The Theory and uses of Natural Uranium Isotopic Variations in Hydrology. At. Energy Rev., 14: 621-679.
- RÖSLER, H. J. & LANGE, H. — 1972 — Geochemical Tables. Elsevier Amsterdam, 468 pp.
- SZIKSZAY, M. — 1981 — Hidrogeoquímica das Fontes de Águas da Prata, Estado de São Paulo. Tese de Livre Docência, IG/USP, São Paulo.

Versão original recebida em Jul/84
Versão final, em Jul/85