

COMPORTAMENTO GEOTÉRMICO E GEOQUÍMICO DAS ÁGUAS DO AQUÍFERO BOTUCATU NA BACIA DO PARANÁ.

* CETESB/DAEE - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo

** ENCO-Engenharia Consultoria Planejamento Ltda., Rio de Janeiro.

RÉSUMÉ : L'aquifère Botucatu-Pirambaia représenté par des grès peu consolidés du Trias-Jurassique s'étale sur plus de 1.000.000 km² dans le Bassin du Parana. Cette formation est recouverte par d'épaisses coulées basaltiques qui atteignent une puissance maximum de 1.600 m et forment la couche confinante supérieure.

Cet aquifère de près de 500 m d'épaisseur constitue la plus grande réserve en eau douce d'Amérique du Sud, c'est pourquoi il est étudié plus en détail dans l'Etat de São Paulo où il occupe les 2/3 de l'Etat. Son exploitation est faite par des forages profonds de quelques centaines de mètres à plus de 1.500 m.

Une étude sur la température de l'eau a montré qu'il existe une relation linéaire entre la profondeur du toit de la nappe et les températures mesurées à la sortie des forages. Les températures sont dues au gradient géothermique qui correspond à 1°C/35 m en moyenne.

Les variations géochimiques en fonction de la profondeur du toit de l'aquifère ne fournissent pas de résultats cohérents. Cependant, on a pu constater une évolution géochimique en fonction de l'éloignement des distances d'affleurement et du gradient hydraulique.

RESUMO : O aquífero Botucatu-Pirambóia, representado por arenitos do Triássico-Jurássico, estende-se sobre mais de 1.000.000 km² na Bacia do Paraná. Esta formação encontra-se capeada por espessos derames basálticos de mais de 1.600 m de espessura que formam a camada confinante superior.

Este aquífero de 500 m de espessura representa a maior reserva em água doce da América do Sul. Encontra-se estudado em detalhes no Estado de São Paulo, onde cobre cerca de 2/3 da superfície do Estado. Sua exploração é feita através de poços profundos de algumas centenas de metros, até mais de 1.500 m.

O presente trabalho sobre a temperatura da água, mostrou a existência de uma relação linear entre a profundidade do topo do Botucatu e as temperaturas medidas na boca dos poços. As temperaturas correspondem a um gradiente geotérmico de $1^{\circ}\text{C}/35\text{m}$ em média.

As variações geoquímicas em função da profundidade do topo do Botucatu não representam correlação nítida. Anotou-se, porém, uma evolução geoquímica em função das distâncias de afloramento e do gradiente hidráulico.

INTRODUÇÃO

As formações Botucatu-Pirambóia de idade Triássico-Jurássico representadas por arenitos finos a médios, bem arredondados, de origem eólica, constituem o melhor aquífero da Bacia do Paraná, conhecido como aquífero Botucatu. Este aquífero ocorre em toda a bacia sobre mais de 1 milhão de km^2 , compreendendo o sul do Brasil, leste do Paraguai, noroeste do Uruguai e nordeste da Argentina. A formação Botucatu é sobrejacente aos estratos argilo-siltitosos do grupo Estrada Nova e encontra-se confinada pelos espessos derrames basálticos da formação Serra Geral.

Os arenitos afloram nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso, nas bordas da bacia onde se efetua a recarga profunda. A formação mergulha para o centro da bacia, onde se encontra numa profundidade de mais de 1.500 m abaixo dos derrames basálticos. Sua parte mais profunda coincide aproximadamente com o curso do rio Paraná e sua espessura varia de 100 a 500 m.

O aquífero Botucatu foi estudado em detalhes no Estado de São Paulo, através de estudos hidrogeológicos regionais, executados pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). Nos poços executados pelo Departamento e pela PETROBRÁS foram efetuadas medidas de temperatura e coleta de amostra de água para análise físico-química. Uma análise de temperatura em função da profundidade do aquífero e dos dados geoquímicos é objeto do presente trabalho.

COMPORTAMENTO HIDROGEOLÓGICO DO AQUIFERO BOTUCATU

O aquífero Botucatu tem sua recarga direta nas zonas de afloramento na borda da bacia. Calcula-se em aproximadamente 16.665 km^2 a zona de recarga deste aquífero no Estado de São Paulo. A recarga provém diretamente da água de chuva e em parte dos rios que recortam os afloramentos. Nas partes mais profundas e nas zonas fraturadas pode haver contribuição dos aquíferos superiores e inferiores. Nas áreas de afloramento o aquífero é freático, com níveis de água nas cotas + 550 a 600 acima do nível do mar. Quando capeado pelos derrames basálticos, o aquífero torna-se confinado e apresenta condições de artesianismo, principalmente no centro da bacia perto do rio Paraná, onde o nível está na cota + 400. Nas zonas de recarga foi verificado um gradiente hidráulico da ordem de 3 m/km ; quando o aquífero encontra-se sob pressão o gradiente torna-se bem menor, correspondendo a $0,3 \text{ m/km}$. As linhas equipotenciais indicam, em geral, um fluxo para o centro da bacia em direção ao rio Paraná, a exceção de zonas de afloramento, onde o fluxo converge para os principais tributários. O escoamento lento dentro do aquífero deve-se às estruturas particulares da bacia sedimentar e à porosidade efetiva dos arenitos pouco consolidados. As transmissividades do Botucatu variam de $100 \text{ m}^2/\text{dia}$ na parte livre, enquanto na faixa sob pressão, podem ser superiores a $500 \text{ m}^2/\text{dia}$. Esses valores foram determinados em poços profundos, fornecendo vazões da ordem de $500 \text{ m}^3/\text{h}$. A respeito do fluxo de base do Botucatu existem, ainda, controvérsias. Parece exist

tir um fluxo ascendente nos derrames basálticos nas zonas mais fraturadas, como comprovariam algumas anomalias geoquímicas encontradas no centro da bacia. Isto ocorre quando a pressão hidráulica do Botucatu é superior ao nível piezométrico do basalto. No caso de haver uma pressão inferior, o sistema poderia funcionar ao inverso, dando um fluxo descendente do basalto para o Botucatu.

TEMPERATURA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Na tabela 1, aparecem os valores de temperaturas, medidas na boca de poços profundos do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. As temperaturas foram registradas após várias horas de bombeamento, de tal forma a obter-se um valor representativo da água do Botucatu e eliminar as possíveis influências de água do basalto e/ou do Bauru. Observa-se que as temperaturas variam de 24,2 em poços pouco profundos, elevando-se para 63 no poço de Presidente Prudente. Nesta tabela constam, também, a profundidade do topo do aquífero Botucatu e a profundidade total do poço.

Os dados de temperatura versus a profundidade do topo do aquífero Botucatu (fig.1), mostram um comportamento linear em função da profundidade. A equação da reta determinada por correlação linear foi a seguinte :

$$T (^{\circ}\text{C}) = 0,0282 P (\text{m}) + 22$$

com um coeficiente de correlação de 0,99, onde T representa a temperatura medida na boca do poço, segundo as condições mencionadas em grau Celsius e, P a profundidade do topo do aquífero Botucatu em metros. A temperatura 22 $^{\circ}\text{C}$, corresponde à temperatura média anual do ar registrada na região, que varia de 21 a 23 $^{\circ}\text{C}$.

A partir da reta estabelecida e da equação, calcula-se um gradiente geotérmico de 1 $^{\circ}\text{C}/35 \text{ m}$, que corresponde a um gradiente normal de zona estável tectonicamente.

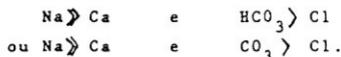
Este resultado mostra que o aquífero Botucatu revela-se o maior produtor de água na bacia, pelo fato de não haver relação entre a profundidade total dos poços e as temperaturas como era de esperar-se nos poços da PETROBRÁS.

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DAS ÁGUAS DO BOTUCATU

Em geral as águas do Botucatu apresentam uma concentração em sais dissolvidos bastante baixa, como pode ser visto na tabela 2. Os valores TDS ou RS não ultrapassam os 500 mg/l. Os ânions predominantes são o bicarbonato e/ou o carbonato, enquanto nos cátions, o sódio é quase sempre mais elevado. Pode-se distinguir dois tipos de água : nas áreas de afloramento ou proximidades, as águas são classificadas de bicarbonatadas com a seguinte relação iônica:



Nos poços mais profundos, onde o aquífero apresenta condições de pressão, as águas são bicarbonatadas sódicas ou carbonatadas sódicas, dependendo de altos valores de pH. A relação pode ser escrita, como segue :



Alguns exemplos do primeiro grupo estão representados no diagrama de Schoeller-Berkaloff; são águas do poço de Bariri e, do segundo grupo, as águas de Fernandópolis e Presidente Prudente (fig.2). As outras águas encontram-se intercaladas entre essas linhas. Observa-se um aumento progressivo do cloro e do sulfato, em função da profundidade do topo do Botucatu, como é normal.

Sabendo-se que a dissolução da sílica aumenta em função da temperatura, os valores foram plotados num gráfico em relação à profundidade do topo do Botucatu (fig.3). Verifica-se que alguns poços contêm

teores de sílica anormais, como no caso de Lins; sendo que este poço penetrou nas camadas subjacentes à formação Botucatu, deve ocorrer uma contaminação e uma mistura das águas com as dos aquíferos mais profundos. Porém, este ponto foi desprezado no cálculo da equação da sílica, em função da profundidade do topo do Botucatu. A partir da regressão linear, obtivemos a seguinte equação com um coeficiente de correlação de 0,86 :

$$\text{SiO}_2 \text{ (mg/l)} = 0,152 P \text{ (m)} + 16$$

Combinando essa equação com a da temperatura, obtivemos a equação abaixo :

$$T \text{ (}^\circ\text{C)} = 1,855 \text{ SiO}_2 \text{ (mg/l)} - 7,68.$$

Como exemplo, uma verificação feita sobre o poço de Fernandópolis, usando o valor da sílica da reta do gráfico, forneceu a temperatura de 58,2 $^\circ\text{C}$ contra 58,7 $^\circ\text{C}$, medida na boca do poço.

Para os outros elementos, uma comparação das concentrações em função da profundidade do topo do Botucatu, não mostrou nenhuma tendência, como pode ser visto na fig. 4.

Várias tentativas foram feitas em função da cota dos níveis piezométricos e das distâncias de afloramento. Combinando as áreas de recarga com as direções do fluxo subterrâneo, chegamos a uma interpretação das concentrações, em função da distância aproximada da zona de recarga (fig.5). Neste gráfico, nota-se um aumento progressivo do cloreto e do sulfato. Nos poços de Bariri e Monte Alto, o conteúdo de cloreto está quase nulo, enquanto nos poços do centro da bacia, Três Lagoas e Presidente Prudente, afastados de quase 300 km da zona de afloramento, o teor aumenta para 125 mg/l; o mesmo acontecendo com o sulfato, que aumenta gradativamente para atingir 104 mg/l em Presidente Prudente. Pode-se observar, também, um aumento do conteúdo de sódio e de bicarbonato em relação ao cálcio e magnésio que diminuem em função, provavelmente, de um mecanismo de troca de base. Este fenômeno de troca de base realiza-se dentro do próprio aquífero, entre os arenitos e as raras camadas argilosas da parte inferior ou no contato com os derrames basálticos. Além disso, a evolução geoquímica das águas do Botucatu, deve-se ao tempo de permanência em contato com as rochas, aliado a um gradiente hidráulico muito baixo.

CONCLUSÕES

O aquífero Botucatu estende-se por toda a bacia do Paraná e constitui um grande potencial de água doce, certamente o maior reservatório da América do Sul. Atualmente, ele é pouco explorado, pelo fato de encontrar-se em grande profundidade, o que exige investimentos enormes e técnicas de perfuração especializadas para atingi-lo. A tendência futura é de se explorar melhor o aquífero para o abastecimento de cidades de médio e grande portes.

Os resultados geoquímicos esparsos mostraram que a água é de excelente qualidade, no que se refere ao conteúdo em sais dissolvidos. Observa-se um aumento de sódio e bicarbonatos em relação aos outros íons, em função do afastamento da área de recarga. As águas passam a alcalinas e os altos valores de pH e de sódio provocam um aumento de SAR que torna essas águas impróprias para uso agrícola, sem um prévio tratamento. Nos poços de Presidente Prudente, Fernandópolis e Três Lagoas, foram encontrados valores de SAR de 23, 21 e 43, respectivamente. Os conteúdos de cloretos e sulfatos não chegam a prejudicar sua qualidade para os diversos usos.

As altas temperaturas encontradas nos poços mais profundos não são devidas a anomalias geotérmicas, mas, correspondem a um gradiente geotérmico normal de 1 $^\circ\text{C}/35$. A perfeita correlação entre a temperatura e a profundidade do topo do Botucatu, é uma ferramenta valiosa para definir melhor o comportamento do aquífero. As elevadas temperaturas criam problemas para o abastecimento público, mas, o calor produzido pode ter outras utilidades. As águas podem ser aproveitadas nas estâncias termais, para recreação, banhos e, servir, também,

para calefação de casas e para agricultura no aquecimento de solos e estufas, principalmente no sul do Brasil, que é a região mais fria.

Uma exploração racional deste aquífero, sobretudo nas partes mais profundas, deve considerar os fatores da qualidade da água e o comportamento hidrológico que podem influenciar seu desenvolvimento futuro.

BIBLIOGRAFIA

- DAEE-TAHAL/GEOPEAQUISADORA - (1972) - Estudo de Águas Subterrâneas-Avaliação Preliminar - Estado de São Paulo. 2 vol., DAEE-São Paulo.
- DAEE-TAHAL/GEOPESQUISADORA - (1974) - Estudo de Águas Subterrâneas-Região Administrativa 6 - Ribeirão Preto. 4 vol., DAEE-São Paulo.
- DAEE-ENCO - (1976) - Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 7, 8 e 9 - Bauru, São José do Rio Preto e Aracatuba. 4 vol., DAEE - São Paulo.
- GILBOA, Y. and MARIANO, I.B. - (1976) - The Botucatu Aquifer of South America Model of Untapped Continental Aquifer - Journal of Hydrology, 29.
- REBOUÇAS, A. da C. - (1976) - Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná - Tese de Livre Docência - IG/USP - São Paulo.

TEMPERATURAS DA ÁGUA NO AQUIFERO BOTUCATU-PIRAMBÓIA

TABELA 1

POÇOS	Temperaturas da Água (°C)	Profundidade do Topo do Botucatu (m)	Profundidade Total dos Poços (m)
Bauru	24,2	60	354
Bariri	25,4	131	145
Itápolis	29	277	450
Novo Horizonte	34,5	420	600
Catanduva	34,5	457	860
Monte Alto	36,2	464	581
Lins	41,2	595	3.459
Barretos	36	600	720
São José do Rio Preto	44,3	790	1.100
Três Lagoas	45,5	823	4.560
Paraguaçu Paulista	48	964	3.663
Fernandópolis	58,7	1.285	1.460
Presidente Prudente	63	1.445	1.800

ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA DO AQUIFERO BOTUCATU-PIRAMBOIA
(concentrações em mg/l)

Tabela - 2

P O Ç O S	Temp. °C	pH	Condutiv- idade 25°C µS/cm	TDS 180°C	Alcalinidade em CaCO ₃		Cl	SO ₄	F	Ca	Mg	Na	K	Dureza Total CaCO ₃	SiO ₂	B µg/l
					CO ₃	HCO ₃										
Bauru	24,2	9,15	160	114	18	64	0,5	3	0,17	2,8	0	36	1,2	7	14,5	0
Bariri	25,4	-	250	158	124	2	0,5	0	0,14	37	4	9,3	5,4	110	19,4	0
Catanduva	35,4	9,57	300	192	70	97	1,0	6	0,37	0,8	0,4	72	0,4	4	25,4	0,8
Monte Alto	36,2	8,11	160	112	0	88	0	0	0,1	20	0,9	14,8	2,3	54	16,1	<21
Itins	41,2	9,65	430	265	152	81	4,5	12	-	5	5	122	1,4	42	58	-
S.J.do Rio Preto	44,3	9,25	410	267	65	113	12	15	0,78	1,6	0,2	90	1,2	4,8	35	133
Três Lagoas	45,5	8,4	680	440	51	130	78	77	1,44	1,1	0,3	196	0,9	2	28	10,4
Fernandópolis	58,7	-	470	324	44	75	54	68	0,9	1,5	0,1	100	2,5	4	38	0
Pres.Prudente	63	8,75	850	615	20	193	125	104	11,6	4,7	1,8	230	2,1	19,1	33	2230

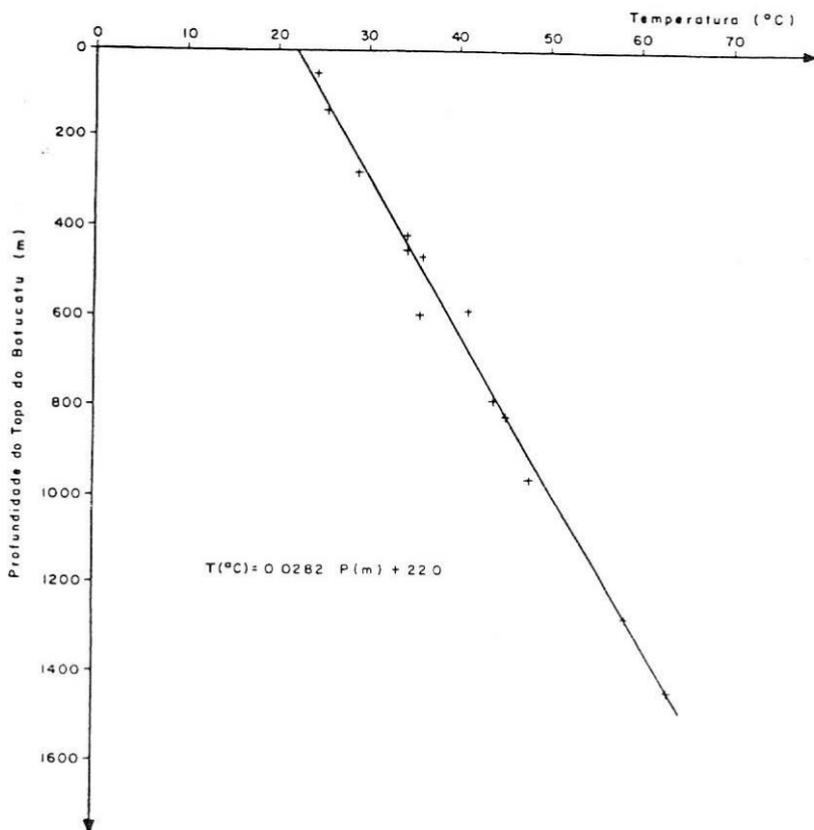


Fig. 1 - Temperatura da Água em Função da Profundidade do Topo do Aquífero Botucatu - Piramboia.

DAEE

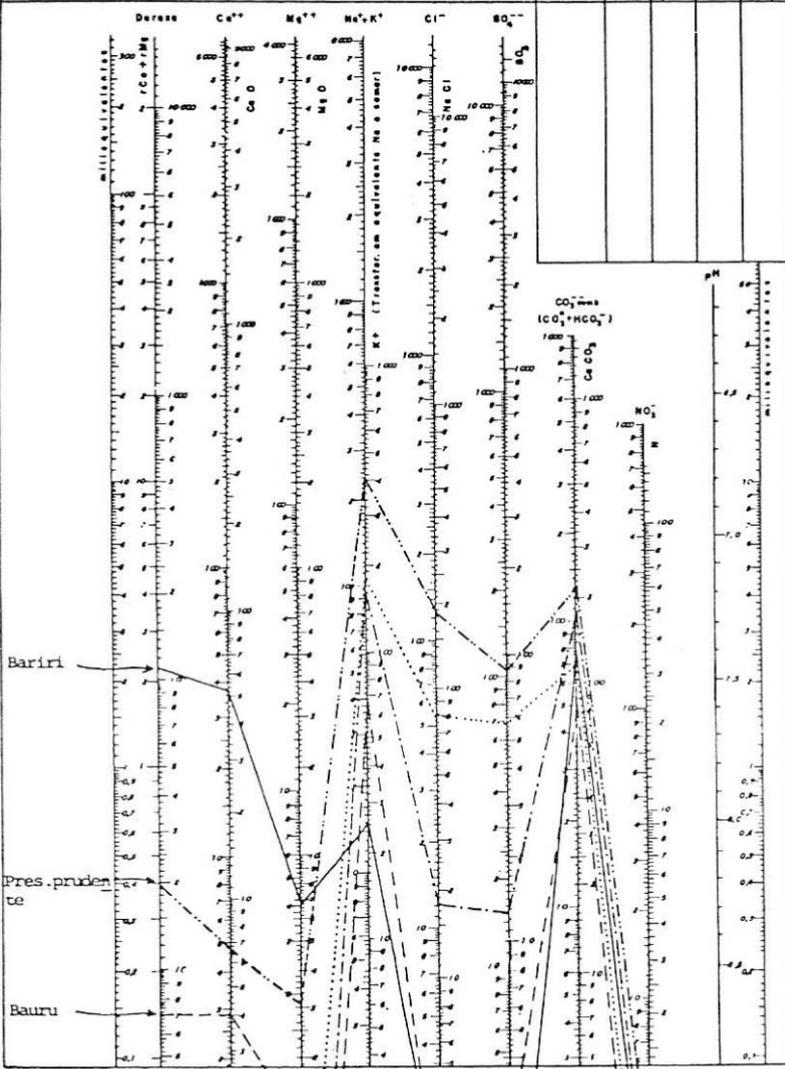
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Fig. 2

DIAGRAMA DE ANÁLISE D'ÁGUA
TEORES EM MILIGRAMA POR LITRO

LEGENDA

Nº	R.S. mg/l	C p.p.m.	T. %	pH cm.p.p.
----	--------------	-------------	---------	---------------



Revisado por J.M. TEISSEIRE

Segundo SCHÄLLER
e BERKALOFF

Fernandópolis S.J. do Rio Preto

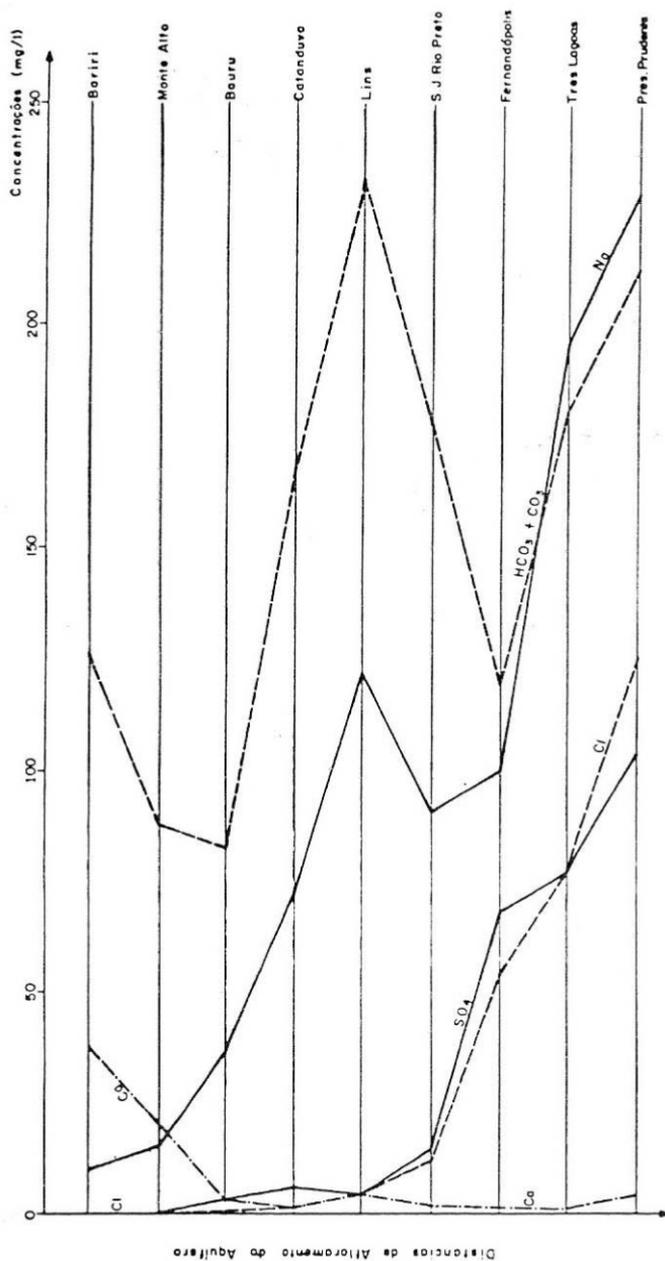


Fig. 5 - Variações Geoquímicas em Função das Distâncias de Afloramento