

PREVISÃO DO CICLO ANUAL DE TEMPERATURA E CIRCULAÇÃO DO FUTURO RESER-
VATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITÁ.

Bianchini Jr., Irineu*

Perazza, Maria Cláudia D.*

Abstract

Studies about water quality alterations due to reser-
voir formation comprise prediction of temperature and water circu-
lation annual cycles in the new system.

The present study on this subject has been carried out
through mathematical modelling, considering the hydroclimatological
and morphometric characteristics of a projected reservoir.

Results of the modelling study for the Itá Reservoir
project shows that it probably will have a subtropical or warm
monomictic pattern. It is discussed also some limnological aspects
and a discharge operation strategy for undesirable effects miti-
gation downstream.

Resumo

Esse trabalho que foi elaborado para a ELETROSUL visa
prever o comportamento hidrotérmico do futuro reservatório da Usina

*Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores (CNEC).

Departamento de Recursos Naturais.

Hidrelétrica de Itá, a ser formado pelo barramento do rio Uruguai (27°16'S e 52°23'W). Para tanto, utilizou-se um modelo matemático, dinâmico e unidimensional vertical que considera variáveis morfológicas e hidroclimatológicas do futuro reservatório.

A partir da aplicação do modelo, prevê-se que no futuro reservatório da UHE Itá uma estratificação térmica deverá ocorrer no final da primavera até o outono (aproximadamente de novembro a maio). Essa estratificação deverá se acentuar de janeiro até maio, quando então as condições hidráulicas e climatológicas favorecerão a desestabilização da termoclina e a consequente mistura das águas.

Com base nesse estudo discutem-se algumas alterações da qualidade da água, decorrentes do ciclo hidrotérmico previsto, bem como, uma estratégia de operação de descarga, visando minimizar os efeitos indesejáveis, para jusante.

1. Introdução

A estratificação térmica é um processo que ocorre frequentemente em lagos e reservatórios. Esse fenômeno tem como origem a baixa condutividade térmica da água, a limitada penetração da energia radiante e o fato das vazões afluentes poderem apresentar temperaturas mais elevadas que as observadas na superfície dos ambientes lênticos.

O fluxo aquecido das vazões afluentes difundem-se ao longo da camada superficial do reservatório. Além disso, todo o ca-

lor, além do decorrente da convecção térmica, penetra no reservatório através da superfície, na forma de energia radiante. Uma grande parte dessa energia é absorvida nos primeiros metros, havendo um aquecimento mais acentuado da água próxima à superfície que das camadas mais profundas. Essa água aquecida tende a permanecer na superfície, resultando uma condição de estabilidade.

A evaporação acarreta um resfriamento das camadas superficiais, gerando correntes de convecção térmica e a ação do vento favorece uma mistura da água na superfície.

Esse processo de aquecimento, esfriamento e ação do vento tende a desenvolver uma circulação na região superior do reservatório (epilímnio). O epilímnio, por sua vez, cobre e isola uma camada mais fria e estável, o hipolímnio.

Um ciclo anual típico mostra uma condição quase isotérmica no início da primavera, o desenvolvimento de uma estratificação térmica na primavera e verão e o retorno à condição inicial no inverno. Na condição estratificada, o hipolímnio permanece isolado da atmosfera, pelo epilímnio, impedindo que haja renovação do oxigênio. Esse fato, aliado a uma demanda contínua de oxigênio nas camadas mais profundas, pode resultar no desenvolvimento de condições anaeróbicas no hipolímnio.

A destruição da estratificação térmica é acompanhada de uma mistura vertical ao longo do reservatório, podendo acarretar profundas alterações físico-químicas na água, em curto período.

Por essas razões, a previsão de ocorrência de termoclina é essencial para os estudos de impacto ambiental, tendo em vista as

consequentes alterações da qualidade da água, bem como para a proposição de ações de monitoramento e medidas atenuadoras, tais como estratégias de operação de descarga.

2. *Objetivos*

O presente trabalho tem por objetivo prever o regime hidrotérmico do reservatório da UHE Itá, a partir da simulação dos perfis mensais de temperatura da coluna d'água, tendo por base as variações médias das condições hidroclimatológicas e as características morfométricas do futuro reservatório.

Esse estudo visa também antever algumas possíveis alterações na qualidade da água de jusante, devido à variação de espessura de captação da água turbinada a ainda, propor medidas atenuantes para os efeitos indesejados.

3. *Material e Métodos*

O modelo hidrotérmico, utilizado nesse estudo, pode ser caracterizado como dinâmico e unidimensional vertical, isto é, calcula as variações temporais de temperatura do reservatório, no sentido vertical, em detrimento das variações laterais.

Basicamente, esse modelo matemático simula a distribuição e difusão do calor na coluna d'água, em condições de isoterminia e de estratificação térmica, a partir do balanço de massa e de calor. Foi desenvolvido a partir dos conceitos sugeridos por HUBER e

HALERMAN (1968), MARKOFISKY (1971), RYAN e HARLERMAN (1971) e OCTAVIO et al. (1977) e resolve a equação que governa a conservação de calor pelo método das diferenças finitas. Define, temporalmente, os perfis de temperatura no reservatório e identifica a ocorrência, ou não, de estratificação, com base na aplicação do critério do gradiente térmico. Gera ainda, como resultado, um arquivo temporal de ocorrência de estratificação, nível da termoclina e temperatura média do reservatório.

Para a realização das simulações, necessita-se das séries temporais de radiação solar, de radiação atmosférica, de temperatura do ar, de umidade relativa, da velocidade do vento, de temperatura da água e das vazões afluente e defluente. Em adição a essas variáveis, devem ser fornecidos também, os seguintes parâmetros básicos do reservatório: função entre cota e área, função entre cota e comprimento, coeficientes de extinção e de absorção.

Para a caracterização do regime fluvial, em termos de vazões médias, máximas e mínimas mensais, utilizou-se o período histórico disponível, que vai de 1931 a 1984, da estação do DNAEE: Usina Itá (código: 730001000).

A variação da radiação global foi estimada a partir dos dados obtidos junto à estação climatológica de Marcelino Ramos (período 1984 a 1986). A série temporal de radiação atmosférica foi estimada via programa, segundo aproximação proposta por WUNDERLICH (1968). Para tanto, admitiu-se que a porcentagem de cobertura de nuvens, nessa região é de 22%.

A série temporal de temperatura da água foi estimada

a partir de levantamento limnológico, realizado em 1988, e medidas provenientes da estação do DNAEE, situada no município de Marcelino Ramos.

O coeficiente de extinção da luz foi estimado a partir de levantamento da profundidade do disco de Secchi, do reservatório de Itaipú (ANDRADE et al., 1988). O gradiente térmico estabelecido para a ocorrência de estratificação foi de $0,36^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

O levantamento das variáveis morfométricas do futuro reservatório (relações cota x área e cota x comprimento) foi realizado com base em medidas planimétricas e curvimétricas, na escala cartográfica 1:20.000.

4. Resultados e Discussão

O reservatório da UHE a ser implantado na bacia do rio Uruguai ($27^{\circ}16'S$ e $52^{\circ}23'W$), apresentará uma configuração alongada e será constituído pelo principal formador, o rio Uruguai, e dois afluentes significativos, os rios do Peixe e Jacutinga, com extensões aproximadas de 141, 18 e 28 km respectivamente, sendo o comprimento do corpo central equivalente ao estimado para o rio Uruguai (Figura 1).

A largura média do reservatório no corpo central é estimada em torno de 903 m. No braço do rio do Peixe a largura prevista é da ordem de 267 m e do rio Jacutinga de 368 m. O reservatório apresentará, portanto, uma configuração semelhante a dos rios. A área e o volume desse reservatório, na cota 370 m (n.a. max. nor-

mal) serão de 141,2 km² e 5,1 x E9 m³ respectivamente, determinando-se uma profundidade média de 36,1 e máxima de 105 m. A vazão média anual é da ordem de 988 m³/s e o tempo médio de residência hidráulica é de 2 meses.

Os totais anuais médios de precipitação da bacia do rio Uruguai variam entre 1400 e 2400 mm. Não existe definição de sazonalidade pluviométrica nessa região. As diferenças entre os totais de chuva do trimestre mais chuvoso (agosto, setembro e outubro) são apenas ligeiramente superiores às do trimestre mais seco que pode variar de março a janeiro. O regime hidrológico da bacia do rio Uruguai está diretamente ligado às características pluviométricas, tendo-se o trimestre agosto/setembro/outubro como o mais chuvoso e praticamente, igual em toda bacia. Já o trimestre menos chuvoso, não ocorre no mesmo período, em toda bacia. Na Serra Geral ele ocorre no período de novembro a janeiro e no vale do rio Uruguai, no período de março a maio (CNEC, 1988).

Quanto a variabilidade anual da vazões na bacia, observa-se que as mesmas apresentam comportamento relativamente homogêneo tendo, em média, pequena variação da sazonal das vazões mensais, com valores de máximas e mínimas mensais oscilando em torno de 60 a 160% da vazão média anual (Tabela I). O mesmo já não acontece com relação à variabilidade interanual que, dependendo do ano hidrológico, período úmido ou seco, as vazões mensais podem apresentar desvios de até 800%, em torno da média do mês.

Com relação às variações térmicas do rio Uruguai, observa-se que a temperatura média mensal da água, no decorrer do

ano, apresenta pequenas oscilações em torno do valor médio anual de $18,6^{\circ}\text{C}$, com valores médios de temperaturas máximas e mínimas variando em torno de 124 a 76% em janeiro e julho, respectivamente, isso equivale, em termos médios, a uma amplitude térmica anual de 9°C . A máxima absoluta registrada na estação Itá foi de 27°C , em dezembro de 1985, enquanto a mínima absoluta foi de $9,5^{\circ}\text{C}$, ocorrida em julho de 1982. (Tabela I).

Tomando-se como referência as variações térmicas sazonais que ocorrem em Itá verifica-se que a temperatura média do ar apresenta pouca variação durante o ano. A amplitude térmica anual é da ordem de 10°C . A temperatura média do mês mais frio (julho) é de $14,8^{\circ}\text{C}$, enquanto que a do mês mais quente (janeiro) é de $24,8^{\circ}\text{C}$.

A insolação para Marcelino Ramos (período de 1981 a 1986) varia entre 6,0 e 8,0 horas/dia, no período de verão e entre 4,0 e 6,0 horas/dia, nas estações de outono e inverno (CNEC, 1988). A radiação global média anual foi estimada em $407\text{ cal/cm}^2/\text{dia}$, tendo uma distribuição mensal marcada por valores acima de $400\text{ cal/cm}^2/\text{dia}$, na primavera-verão e por valores em torno de 200 a $300\text{ cal/cm}^2/\text{dia}$ no período de outono-inverno.

A análise da umidade relativa média do ar para a localidade de Itá (período 1982 a 1986) mostra que, os valores médios mensais estão compreendidos entre 74 e 87%, em dezembro e julho respectivamente, sendo que os meses de outono e inverno apresentam valores mais elevados, entre 85 e 87%, enquanto que o trimestre da primavera apresenta os mais baixos valores, entre 74 e 77% (Tabela I).

Em virtude de sua localização subtropical, com clima controlado, principalmente, por sistemas tropicais atlânticos e polares, as direções de vento predominantes são de sudeste a noroeste. Dados registrados nas estações meteorológicas de Campos Novos (1969 a 1985) e Chapecó (1973 a 1986) mostram que a primeira direção predominante é de nordeste e a segunda, de sudeste (CNEC, 1988). De acordo com os dados de velocidade do vento, registrados em Marcelino Ramos (período 1981 a 1986), as velocidades médias mensais variam entre 1,2 e 2,3 m/s. No verão, as intensidades mensais variam entre 2 e 3 m/s e nos meses de abril a junho situam-se em torno de 1 m/s.

Considerando as características climáticas predominantes observa-se que as variáveis apresentam um padrão sazonal típico de clima subtropical de planalto, controlado por sistemas polares e tropicais (CNEC, 1988). Nota-se também que, embora sem apresentar acentuadas amplitudes nas variações anuais, as variáveis climáticas apresentam um padrão sazonal médio definido.

Na utilização desses parâmetros hidroclimáticos, como dados de entrada para o modelo, observa-se que esse conjunto de variáveis favorecerá a manutenção da temperatura da água na faixa de 15 a 26°C e período de circulação e estratificação, evidentes em escala anual (Fig. 2). Essas características permitem classificar o futuro reservatório como um sistema holomítico subtropical, ou monomítico quente, segundo critérios estabelecidos por HUTCHINSON (1957) e COLE (1977).

A partir da simulação realizada, pode-se prever que o epilimnio tenderá apresentar certa estabilidade a partir do mês de

novembro. Verifica-se também que essa estabilização deverá se acentuar no decorrer dos meses, até maio. Supõe-se que essa intensificação de estabilidade, traduzida pelo aumento da camada epilimnética, seja resultante da conjunção das seguintes características desse período: baixas vazões, altos valores de insolação e radiação solar e elevadas temperaturas da água e do ar. Tais condições, por sua vez, devem suplantam as forças desestabilizadoras, tais como as altas velocidades do vento e as baixas umidades relativas.

Outro fator relevante que acentua a tendência de estratificação é a conformação alongada que o reservatório de Itá deverá apresentar, a qual minimiza a ação do vento, principalmente quando este ocorre predominantemente na direção transversal ao eixo.

Com base nos processos de difusão de gases tem-se verificado que os lagos muito profundos necessitam longos períodos para o completo equilíbrio de saturação, entre o oxigênio atmosférico e o dissolvido, que pode, ou não, ser concluído durante o período de circulação.

Em lagos eutróficos, a concentração de oxigênio dissolvido pode ser deplecionada em apenas algumas semanas, após a formação da estratificação de verão, de modo que o hipolimnion permanece anaeróbio durante grande parte do período de estabilidade térmica. O consumo de oxigênio é mais intenso na interface sedimento-água, região onde acumula-se matéria orgânica detrital e que apresenta grande atividade bacteriana. A região de interface torna-se rapidamente anaeróbia e a depleção de oxigênio dissolvido é usualmente observada nos estratos mais profundos do hipolimnion, reduzindo

do marcadamente a eficiência global dos processos de decomposição da matéria orgânica (WETZEL, 1983).

Com base na simulação efetuada, verifica-se ainda que os processos de mistura deverão ser favorecidos a partir do final de maio, até o final de outubro, pois é o período que apresenta o aumento das vazões, a diminuição das temperaturas do ar e da água afluyente, baixos valores de radiação solar, aliados ao aumento da velocidade do vento e da umidade relativa. Esses fatores provocam uma queda de temperatura da água do epilímnio, tornando-a mais densa, com uma concentração maior de oxigênio e menor de gás carbônico, que será introduzida no hipolímnio e vice-versa. Como consequência promove-se a oxidação das substâncias redutoras acumuladas na camada inferior, durante o período de estratificação. O nível de oxidação a ser exercido dependerá, basicamente, da carga de oxigênio dissolvido e da quantidade de substâncias reduzidas presentes, resultantes da degradação da vegetação e da lixiviação do sedimento.

A análise da variação dos perfis térmicos mostra um intenso desenvolvimento da espessura do metalímnio, estimada em 55% da profundidade do reservatório, no mês de janeiro (Figura 3). No decorrer dos meses, a espessura dessa camada deverá decrescer, até que se inicie os processos de mistura (junho).

Com base nessa análise verifica-se ainda que o hipolímnio tenderá ser formado a partir da primavera, com altura máxima de 101 m, em novembro e dezembro. Em janeiro, com o desenvolvimento do metalímnio, a altura da camada hipolimnética deverá decrescer, cerca de 43%. Nos meses subsequentes, devido ao rebaixamento do

epilímnio, tenderá continuar diminuindo, até seu completo desaparecimento, com o início dos processos de mistura.

Com relação às variações térmicas do reservatório de Itá observa-se que a temperatura média mensal, no decorrer do ano, apresentará pequenas oscilações, em torno do valor médio anual de 18,9 °C. Os valores médios de temperaturas máximas e mínimas variam em torno de 118 a 80%, em janeiro e agosto respectivamente, que equivale, em termos médios, a uma amplitude anual de 7,1 °C.

As águas serão descarregadas através da usina, para jusante dependem diretamente do comportamento hidrotérmico da coluna d'água do reservatório.

Uma vez que a espessura da camada de água defluente depende do gradiente de densidade, isto é, a espessura da camada de retirada decresce enquanto aumenta o gradiente vertical da densidade (KOH, 1964; DUCAN et al., 1962) através dos resultados apresentados na Figura 4, constata-se que, em termos médios, a espessura da camada d'água a ser utilizada na geração de energia deverá apresentar grande variação mensal e anual. Entretanto, sazonalmente observa-se tendência acentuada de aumento da espessura, de junho a setembro. A partir de setembro até janeiro, a altura da camada de água a ser turbinada tenderá decrescer continuamente. Em fevereiro, deverá aumentar e novamente tenderá diminuir até junho.

Do ponto de vista ambiental, essa variação de espessura da camada d'água turbinada se constitui num fator de grande relevância, pois transfere para jusante características específicas de qualidade de água, de uma dada camada do reservatório (por exemplo: temperatura e oxigênio dissolvido).

Na comparação das variações de altura de estratos(epilímnio, metalímnio e hipolímnio) e da camada de água defluente,preve-se que nos meses de instabilidade térmica (junho a outubro) parece existir tendência de captação pouco seletiva, devido ao desenvolvimento crescente dos processos de homogeneização física da coluna d'água.

Considerando que a altura da tomada d'água do reservatório se encontrará na cota 328 m (a 42 m de profundidade), estima-se que na etapa inicial da estratificação (novembro/dezembro), a água a ser turbinada deverá ser proveniente, preferencialmente, do hipolímnio. Em janeiro, deverá ser, quase que exclusivamente, da região metalimnética. No período de fevereiro a abril, o epilímnio é que tenderá a prover a maior quantidade de água para as turbinas, seguido do metalímnio.

Com base nessas tendências verifica-se que, no que se refere à alteração de qualidade da água para jusante, o período mais crítico deverá se concentrar nos meses de novembro e dezembro. Por outro lado, a partir do mes de janeiro é provável que haja uma melhora crescente na qualidade das águas turbinadas, até o mês de maio, a partir do qual espera-se uma condição intermediária, em função da ressuspensão das águas do hipolímnio, que deverá perdurar até o final de outubro.

Assim, propõe-se que, nos meses de novembro e dezembro, seja prevista uma operação de descarga que contemple o escape de água superficial, via vertedouro, nos moldes da operação proposta por HINO et al. (1988), para o reservatório de Tucuruí, no sentido de atenuar os possíveis déficits de oxigênio dissolvido, assim co-

mo diminuir as concentrações dos nutrientes da água turbinada. Essa proposição aplica-se, principalmente, para o período de pós enchimento, quando essas características são bem acentuadas, sendo necessários novos estudos, para a fase de estabilidade.

Na comparação dos valores médios mensais de temperatura da água afluyente e defluente, nota-se que o reservatório da UHE Itá tenderá a se comportar como um "sistema tampão", atenuando para jusante, as oscilações atualmente observadas, no rio Uruguai. Esse processo deverá implicar no aumento da temperatura das águas de jusante, nos meses de fevereiro a julho e na diminuição, no período de agosto a janeiro. No que se refere exclusivamente à temperatura, é provável que não haja alterações significativas nas comunidades de jusante, em relação às atuais, uma vez que as diferenças são menores que as oscilações atualmente constatadas (Figura 5).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a ELETROSUL (Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.) pela oportunidade de realização desse trabalho e as facilidades concedidas.

6. Referências Bibliográficas

- ANDRADE, L.F.; BRUNKOW, R.F.; XAVIER, C.F. e DOMINGUES, L.L. 1988. Fitoplâncton e características físico-químicas do reservatório de Itaipu, Paraná, BR. *Limnologia e Manejo de Represas*. Ed. J. G. Tundisi, Vol.I (tomo I: 205-268).
- CNEC 1988. Caracterização hidroclimatológica e avaliação preliminar de impactos na área da UHE Itá. Relatório Técnico IR2-RT-REL-CN20, São Paulo, SP.
- COLE, G.A. 1979. *Textbook of Limnology*. 2 ed. 426 pp. The C.V. Mosby Co., New York.
- DUCAN, W.; HALERMAN, D.R.F. e HELDER, R.A. 1962. Internal density currents created by withdrawal from a stratified reservoir. Tennessee Valley Authority, Norris, Tennessee.
- HINO, K.; IMBROSI, D.; FERREIRA, V.M. e WAENY, J.C.C., Jr. 1988. In fluência da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí nos teores de oxigênio dissolvido a jusante, rio Tocantins (PA). *Livro de Resumos do 2º Congresso Brasileiro de Limnologia*. UFMT. Cuiabá.
- HUBER, W.C. e HARLERMAN, D.R.F. 1968. Laboratory and analytical studies of the thermal stratification of reservoirs. *Hydrody. Lab. MIT Report 112*.
- HUTCHINSON, G.E. 1957. *A Treatise of Limnology, Vol.I Geography, Physics and Chemistry*. 1015 pp. Willey and Sons. New York.

- KOH, R.C.Y. 1964. Viscous stratified flow towards a line sink. W. M. Keck Lab. Report, KH-R-6, California Inst. of Tech.
- MARKOFSKY, M. e HARLERMAN, D.R.F. 1971. A predictive model for thermal stratification and water quality in reservoirs. *Hydrody.* Lab. MIT Report, 134.
- OCTAVIO, K.A.H.; JIRKA, G.H. e HARLERMAN, D.R.F. 1977. Vertical heat transport mechanisms in lakes and reservoirs. *Hydrody.* Lab. MIT Report, 227.
- RYAN, P.J. e HARLERMAN, D.R.F. 1971. Prediction of the annual cycle of temperature changes in a stratified lake or reservoirs: mathematical model and user's manual. *Hydrody.* Lab. MIT Report, 137.
- WETZEL, R.G. 1983. *Limnology*. 2^a ed. 858 p. Saunders. New York.
- WUNDERLICH, W.O. 1968. Heated mass transfer between a water surface and the atmosphere. Internal Memorandum T.V.A. Engineering Lab., Norris, Tennessee.

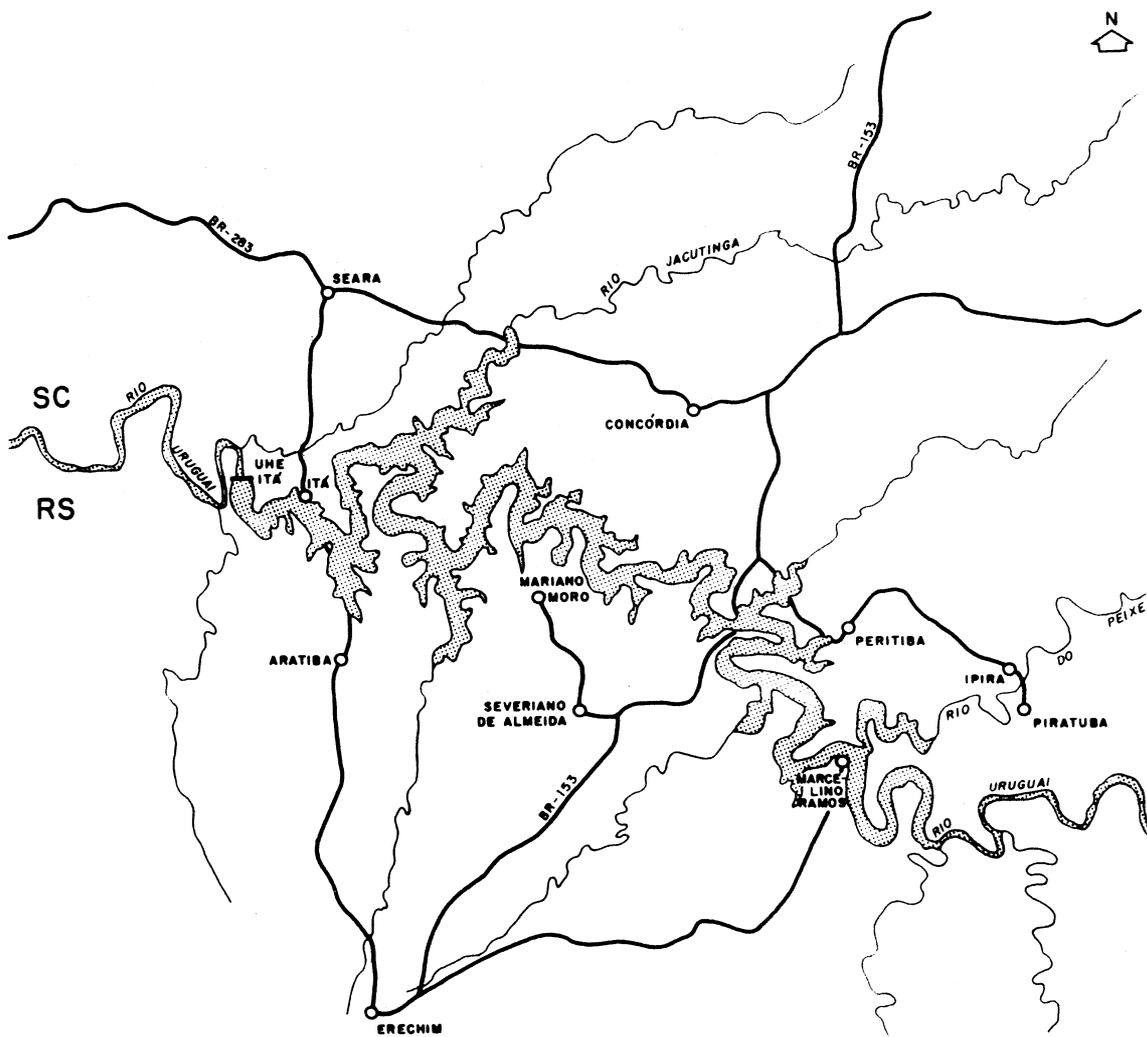


FIGURA 1
 ÁREA DE ESTUDO DOS RESULTADOS SIMULADOS

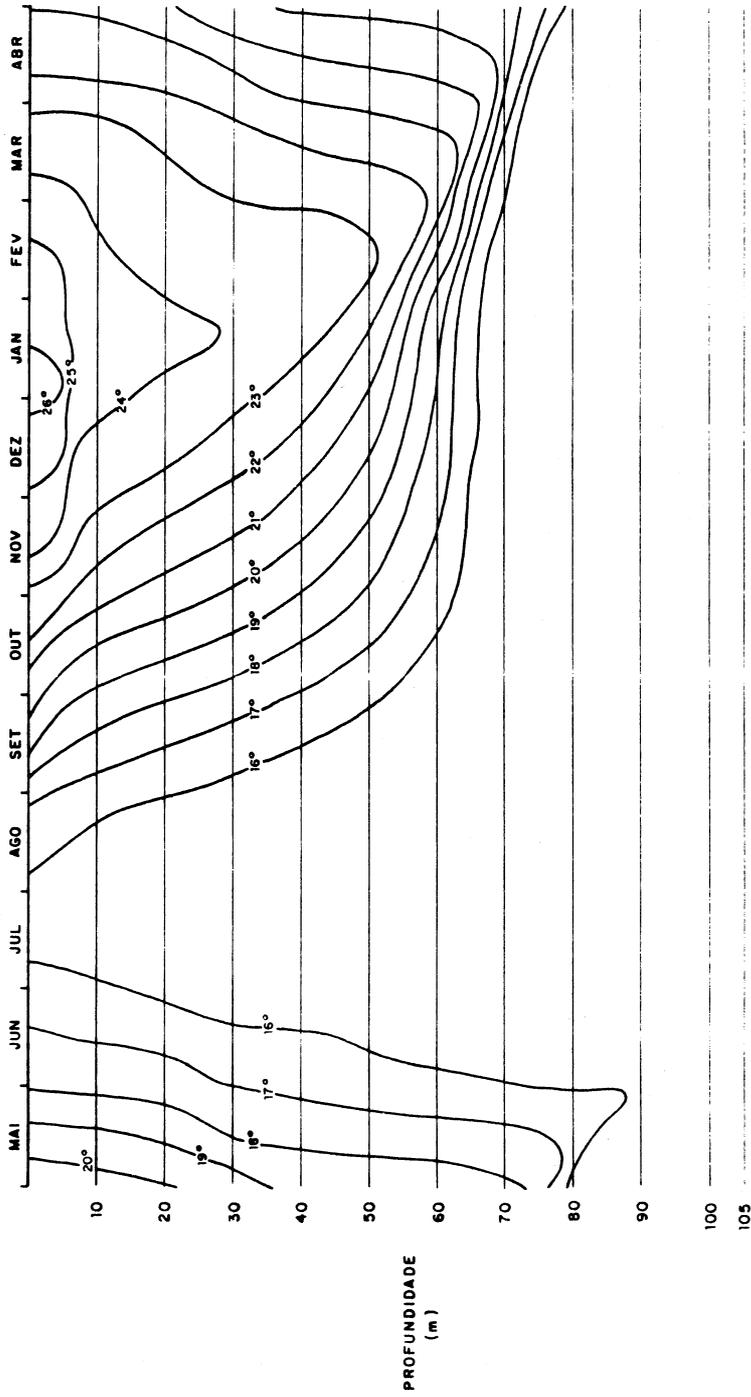


FIGURA 2
 DIAGRAMA PROFUNDIDADE - TEMPO DAS ISOTERMAS (°C)
 RESULTADOS SIMULADOS

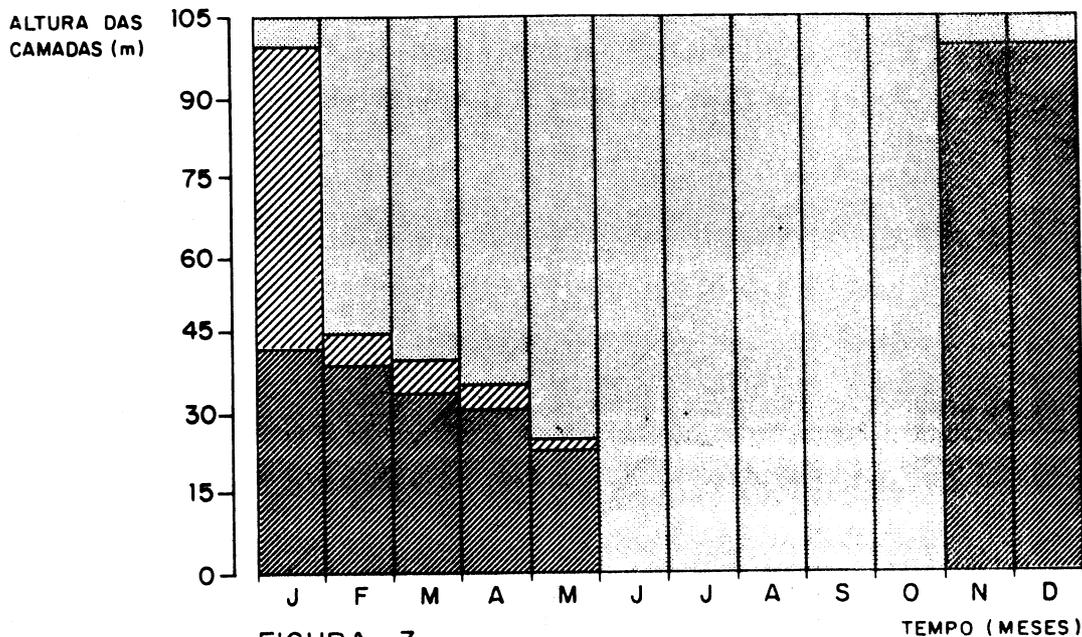
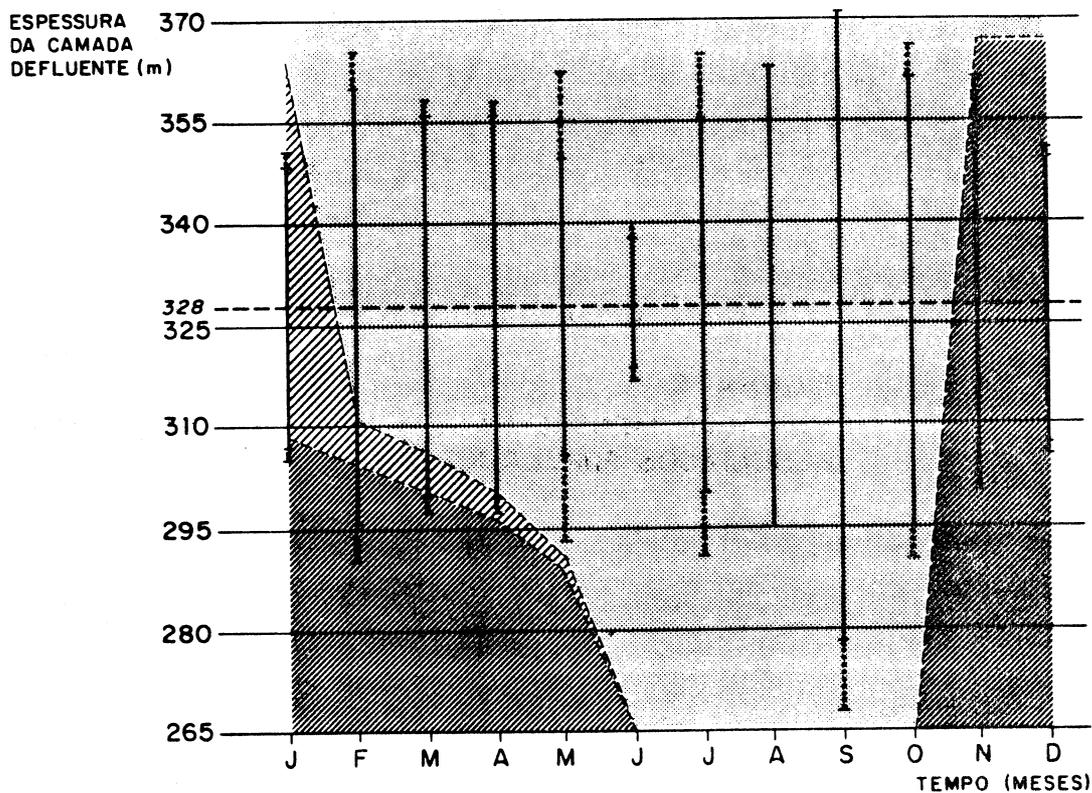


FIGURA 3
VARIÇÃO MENSAL DAS CAMADAS LÍMNICAS -
RESULTADOS SIMULADOS



EPILÍMNIO
 METALÍMNIO
 HIPOLÍMNIO

FIGURA 4
VARIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DEFLUENTE -
RESULTADOS SIMULADOS

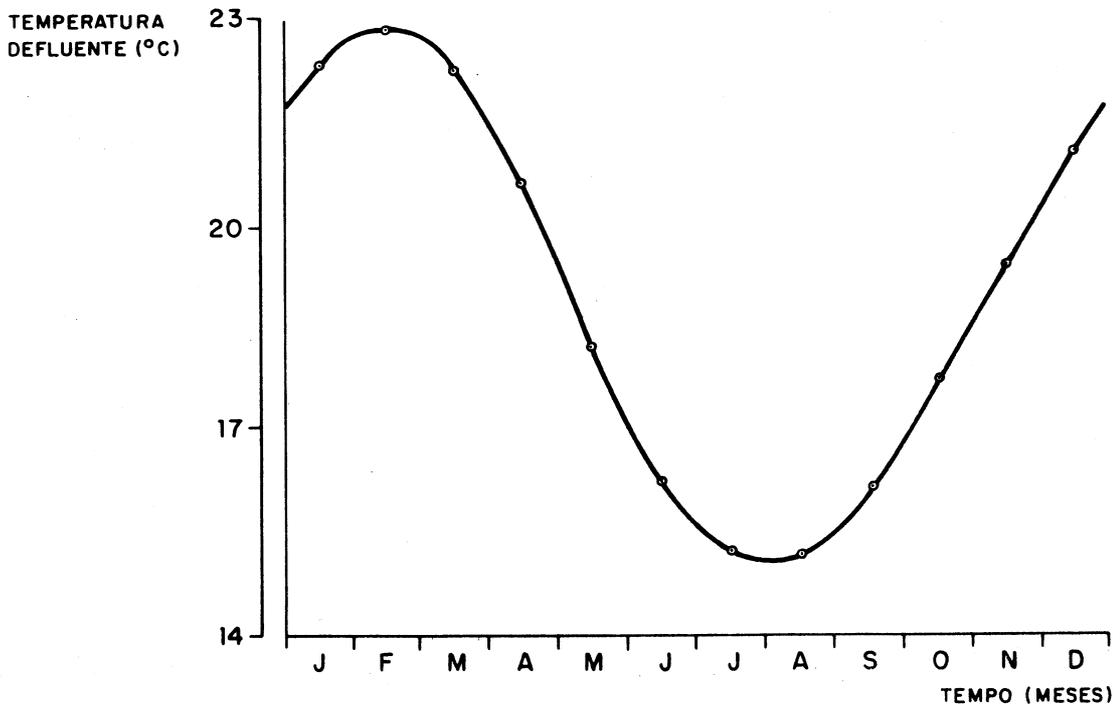


FIGURA 5
VARIÇÃO MENSAL DA TEMPERATURA DEFLUENTE -
RESULTADOS SIMULADOS

TABELA I - VARIÁVEIS HIDROCLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO

VARIÁVEIS MESES	VAZÃO (m ³ / s)	TEMPERATURA (°C)		RADIÇÃO SOLAR (kcal/m ² / dia)	UMIDADE RELATIVA (%)	VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	COBERTURA DE NUVENS (%)
		AR	ÁGUA				
JANEIRO	595.9	24.8	23.1	5620	75.3	1.8	22
FEVEREIRO	734.0	24.1	22.5	5250	77.6	2.0	22
MARÇO	648.4	22.3	20.9	4650	80.7	1.7	22
ABRIL	616.1	19.8	18.6	3450	83.8	1.3	22
MAIO	847.6	17.3	16.3	2690	86.1	1.2	22
JUNHO	1054.0	15.5	14.7	2490	86.9	1.2	22
JULHO	1257.5	14.8	14.1	2580	86.1	1.5	22
AGOSTO	1454.3	15.5	14.7	2990	83.8	2.0	22
SETEMBRO	1580.7	17.3	16.3	3700	80.7	2.2	22
OUTUBRO	1440.9	19.8	18.6	4730	77.6	2.5	22
NOVEMBRO	922.5	22.3	20.9	5120	75.3	2.2	22
DEZEMBRO	710.7	24.1	22.5	5540	74.5	2.3	22

