

Estudos integrados em ecossistema. Estação Ecológica de Jataí

Organizado por:

José Eduardo dos Santos, José Salatiel Rodrigues Pires, Luiz Eduardo Moschini.

São Carlos : EdUFSCar, 2006. 4 volume.

ISBN: 85-7600-083-0

Palavras Chave: 1. Ecossistema. 2. Estação Ecológica de Jataí (SP). I. Título.

Formação de metano e de dióxido de carbono da decomposição de *Egeria najas* Planchon

Bitar, A. L.¹, Bianchini Jr., I.² & Cunha-Santino, M. B.²

Abstract – The formation of methane and carbon dioxide during the decomposition of *Egeria najas* Planchon – This study aimed at describing the formation of CO₂ and CH₄ during an anaerobic degradation of an aquatic macrophyte, *Egeria najas* Planchon. Samples of this plant and lagoon water were collected in the Óleo Lake (Jataí Ecological Station, Luiz Antônio, SP) and used in two types of experiment in the laboratory. In the first type, the kinetics of carbon decay was investigated through the quantification of the remaining fractions, while the second type of experiment focused on the CH₄ and CO₂ formation. For each experiment, decomposition chambers were set up by the addition of *Egeria najas* fragments and lagoon water samples in the proportion of 8 g (DW) L⁻¹. The chromatographic method was used to determine CO₂ and CH₄ concentrations. In the first stage of mineralization, at 17.7°C and 20.3°C, the amounts of mass loss were 26.04% and 25.53%, respectively; this stage presented a decay coefficient of 1.5 day⁻¹. At 22.4°C and 27.0°C, the amounts of mass loss were 64.9% and 67.2%, respectively, showing decay coefficients of 0.14 day⁻¹ (22.4°C) and 0.17 day⁻¹ (27.0°C). The production of CO₂ prevailed mainly at 17.7°C and 20.3°C. The methane production was favored at 22.4°C and 27.0°C and occurred practically during the whole period of the experiments. From these results we infer that, in the Óleo Lake, the conversion of labile fractions of the detritus of *Egeria najas* was favored at high temperatures, with relatively low mineralization coefficients. We suggest that, depending on the availability of dissolved oxygen and on the temperature, the Óleo Lake microbiota can change the yields of carbon gases.

Keywords: anaerobic degradation; *Egeria najas*; temperature; methane and carbon dioxide.

Resumo – Este estudo visou descrever a formação de CO₂ e CH₄ durante a degradação anaeróbia da macrófita aquática *Egeria najas* Planchon. Amostras dessa planta e de água para os experimentos foram coletadas na Lagoa do Óleo (Estação Ecológica de Jataí, Luiz Antônio, SP). Foram realizados em laboratório dois experimentos: o primeiro visou descrever as cinéticas de decaimento do carbono, por meio das quantificações das frações remanescentes, enquanto o segundo enfocou a formação de CH₄ e CO₂. Para cada experimento, prepararam-se câmaras de decomposição, adicionando fragmentos de *Egeria najas* e amostras de água da lagoa na proporção de 8,0 g (PS) L⁻¹. Para a determinação da formação dos gases CO₂ e

1 Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais.

2 Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Hidrobiologia.

CH₄, utilizou-se o método cromatográfico. Os resultados mostraram que, na primeira fase da mineralização, nas temperaturas de 17,7°C e 20,3°C, as perdas de massa foram de 26,04% e 25,53%, respectivamente, com coeficiente de decaimento de 1,5 dia⁻¹. Nas temperaturas de 22,4°C e 27,0°C, as quantidades de perda de massa foram de 64,9% e 67,2%, respectivamente; os coeficientes de decaimentos foram 0,14 dia⁻¹ em 22,4°C e 0,17 dia⁻¹ em 27,0°C. A produção de CO₂ predominou, principalmente, nas temperaturas de 17,7°C e 20,3°C. As produções de metano foram favorecidas a 22,4°C e 27,0°C e ocorreram praticamente em todo o período experimental. Os resultados permitiram inferir que na Lagoa do Óleo as conversões das frações lábeis dos detritos de *Egeria najas* são favorecidas sob temperaturas elevadas, e seus coeficientes de mineralização são relativamente baixos. Dependendo das concentrações de oxigênio dissolvido e da temperatura, sugere-se que os microorganismos da Lagoa do Óleo possam produzir esses gases.

Palavras-chave: *degradação anaeróbia; Egeria najas; temperatura; metano e dióxido de carbono.*

Introdução

Reservatórios artificiais, planícies de inundação, brejos e pântanos podem ser considerados fontes ou sumidouros de carbono orgânico, pois apresentam taxas elevadas de produção e de decomposição; nesses sistemas aquáticos, quantidades consideráveis de metano e de dióxido de carbono podem ser liberadas para a atmosfera (CRILL et al., 1988).

O principal produto da decomposição é o dióxido de carbono, que é produzido tanto na decomposição aeróbia quanto na anaeróbia. O metano também é produto final da decomposição, mas só é gerado em condições anaeróbias. No geral, a produção desses gases é determinada pela temperatura, pela presença de oxigênio e pela composição química da matéria orgânica (BUBIER & MOORE, 1994). Na decomposição anaeróbia, as formações de gases com carbono seguem, no geral, duas vias metabólicas: a primeira produz basicamente CO₂, e a segunda, denominada metanogênese, gera CH₄ e CO₂.

O metano é o produto final da ação de bactérias fermentativas. As vias metabólicas utilizadas na formação do metano incluem, entre as fontes de carbono, o CO₂, o ácido fórmico, o metanol, o grupo metil do acetato, o átomo de carbono β da serina e a metilcobalamina. Nos ambientes aquáticos, a temperatura, a salinidade, o potencial redox, o pH e a quantidade de matéria orgânica têm sido citados como os principais fatores que influenciam os processos metanogênicos (FEY & CONRAD, 2000).

A decomposição das macrófitas aquáticas pode se constituir como um importante mecanismo de ciclagem de carbono, a partir da liberação de CO₂ e CH₄, e, dependendo da intensidade do processo, pode contribuir para o incremento do efeito estufa (CICERONE & OREMLAND, 1988), sendo as macrófitas importantes agentes envolvidos com a produção, o transporte e a emissão de gases para a atmosfera. O objetivo deste estudo foi determinar a formação de CO₂ e CH₄, durante a mineralização anaeróbia da macrófita submersa *Egeria najas* Planchon.

Materiais e Métodos

Descrição do local de coleta

A Lagoa do Óleo pertence ao conjunto de lagoas marginais da planície de inundação do Rio Mogi-Guaçu. Essa lagoa possui área reduzida (17.400 m²), profundidade relativamente baixa ($Z_{\text{máx}}$ ca. 5,5 m) e profundidade de desaparecimento do disco de Secchi variando entre 0,3 m e 2,3 m (CUNHA-SANTINO, 2003). As águas dessa lagoa apresentam-se normalmente entre ácidas a levemente alcalinas (pH: 3,91 a 7,78). A condutividade elétrica é relativamente baixa se comparada com outras lagoas (7 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 59 $\mu\text{S cm}^{-1}$). As concentrações de oxigênio dissolvido variam; normalmente oscilam entre 0,86 mg L⁻¹ e 10,81 mg L⁻¹, na superfície, e entre 0 e 10,02 mg L⁻¹, no fundo (GUNTZEL et al., 2000). Segundo Ballester & Santos (2001), a precipitação e a temperatura média na área de estudo são 1.550 mm e 21,7°C, respectivamente. Os períodos climáticos são definidos na estação das chuvas, com temperaturas elevadas (média: 28°C; novembro a abril) e estação seca, com temperaturas mais baixas (média: 21°C; maio a outubro).

Coleta de material e experimentos de decomposição

Exemplares adultos de *Egeria najas* Planchon e amostras de água foram coletados na Lagoa do Óleo, localizada na Estação Ecológica de Jataí, noroeste do Estado de São Paulo, Brasil (21°33' a 21°37'S e 47°45' a 47°51'W). No laboratório, os exemplares de *Egeria najas* foram lavados em água corrente, para a retirada dos detritos aderidos. Em seguida, foram secos em estufa (ca. 60°C), até peso constante, e depois foram triturados. Antes da utilização, as amostras de água foram filtradas em lã de vidro para a retirada das partículas grosseiras.

Para a realização do experimento de perda de massa, foram preparadas 44 câmaras, para avaliar as concentrações das formas orgânicas e inorgânicas do carbono e certificar a ocorrência das condições anaeróbias. Essas câmaras foram preparadas com fragmentos vegetais e água na proporção de 8,0 g (PS) L⁻¹. Para minimizar a difusão de oxigênio nas incubações, durante a preparação do experimento, foi borbulhado nitrogênio nas câmaras (ca. 20 min). Usando esses procedimentos, a anaerobiose foi estabelecida desde os primeiros momentos. Sem considerar o processo de injeção de nitrogênio, com base na avaliação das taxas de consumo de oxigênio da degradação de macrófitas aquáticas, estimou-se que os processos de anaerobiose ocorreriam no máximo após 30 minutos (BITAR & BIANCHINI JR., 2002).

O experimento teve duração de 4 meses, e as câmaras foram incubadas no escuro sob diferentes temperaturas (17,7°C \pm 1,2°C; 20,3°C \pm 1,1°C; 22,4°C \pm 1,3°C e 27,0°C \pm 1,3°C). Nos dias 0, 2, 5, 9, 14, 22, 29, 39, 61, 83 e 120, uma câmara de cada temperatura foi fracionada. O fracionamento das câmaras consistiu na separação da matéria orgânica particulada (MOP) da dissolvida (MOD). Após as aberturas das câmaras e antes da separação das frações, os valores de pH foram determinados. A separação ocorreu por filtração em rede de náilon (0,4 mm) e, em seguida, por centrifugação (978,25 g; 1 h). O material particulado foi seco (ca. 60°C) até peso constante, e sua massa foi determinada por gravimetria. Posteriormente, amostras de MOP foram utilizadas para as determinações dos teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio, por meio de combustão e cromatografia com detector de condutividade térmica (CHNS Analyser Carlo Erba, Modelo EA 1110). Amostras do sobrenadante foram utilizadas para as determinações das frações dissolvidas de carbono (carbono orgânico dissolvido, COD,

carbono total dissolvido, CTD, carbono inorgânico dissolvido, CID), que foram realizadas por combustão e quantificados usando infravermelho (TOC-5000A, Shimadzu).

Para a realização do experimento de quantificação de CH₄ e CO₂, foram preparadas câmaras de decomposição, com *headspaces* de 100,0 ml, nas quais os gases produzidos foram estocados. Para cada temperatura de incubação no escuro (17,7°C; 20,3°C; 22,4°C; e 27,0°C) foram montadas duas câmaras contendo 8,0 g L⁻¹ (PS) de fragmentos de plantas e amostras de água da lagoa. Periodicamente, durante 120 dias, foram realizadas por cromatografia as determinações de CO₂ e CH₄ (cromatógrafo CG, modelo 370 com detector de condutividade térmica/50°C, coluna Porapak N, gás de arraste H₂ com fluxo de 20 ml min⁻¹). Os gases produzidos foram retirados usando septos, em seringa de 1 ml e, em seguida, foram injetados no cromatógrafo. Após as determinações, as pressões internas dos frascos foram equilibradas com a pressão atmosférica, por injeção de nitrogênio gasoso.

Considerando as câmaras de decomposição como sistemas fechados (CUNHA-SANTINO & BIANCHINI JR., 2002), as determinações de carbono orgânico consumido para o primeiro experimento foram estimadas por diferença, com base na Equação 1:

$$COT = COP + COD + COC \quad (1)$$

em que:

COT = carbono orgânico total (quantidade de carbono adicionada nos frascos no início do experimento);

COP = carbono orgânico particulado remanescente;

COD = carbono orgânico dissolvido;

COC = carbono orgânico consumido (mineralizado).

Para as descrições das cinéticas dos processos, admitiu-se que os detritos apresentassem composições químicas heterogêneas (BIANCHINI JR., 1997). Assim, supôs-se que os processos de mineralização ocorreram por meio de três rotas (Figura 1). Na primeira rota (IN₁), as oxidações desenvolveram-se rapidamente e em paralelo com a dissolução das frações solúveis. A segunda rota de mineralização (IN₂) coube às oxidações dos compostos orgânicos dissolvidos (COD). A terceira rota (IN₃) referiu-se às oxidações dos compostos orgânicos particulados refratários (COPR). Para as representações desses eventos, foram utilizadas as seguintes equações (BIANCHINI JR., 1997):

$$IN_1 = COPLS \frac{k_1}{k_T} \left(1 - e^{-k_T t} \right) \quad (2)$$

em que:

IN₁ = primeira rota de mineralização;

COPLS = carbono orgânico particulado lábil e/ou solúvel;

k_T = coeficiente global de decaimento da COPLS;

k₁ = coeficiente de mineralização da COPL;

e = base logarítmica;

t = tempo (dia).

$$IN_2 = COPLS \frac{k_2}{k_T} \left(1 + \frac{1}{k_T - k_3} \left(k_3 e^{-k_T t} - k_T e^{-k_3 t} \right) \right) \quad (3)$$

em que:

IN_2 = segunda rota de mineralização;

k_2 = coeficiente de dissolução;

k_3 = coeficiente de mineralização do COD.

$$IN_3 = COPR \left(1 - e^{-k_4 t} \right) \quad (4)$$

em que:

IN_3 = terceira rota de mineralização;

COPR = carbono orgânico particulado refratário;

k_4 = coeficiente de mineralização do COPR.

De posse das variações temporais dos detritos particulados, determinaram-se os valores de COPLS, COPR, k_1 e k_4 . Por meio das variações temporais das concentrações de COD, foram estimados os valores máximos de COD (IN_2) e k_3 . Por diferença (COPLS - IN_2), os valores de IN_1 foram estimados. Os coeficientes k_1 e k_2 foram determinados a partir das estimativas dos valores entre IN_1 e IN_2 . Os ajustes foram realizados, pelas regressões não-lineares (algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt), por Press et al. (1993). Na Equação 5, os processos globais de mineralização anaeróbios foram estimados.

$$COC = \sum_{i=1}^3 IN_i \quad (5)$$

em que:

COC = carbono orgânico consumido.

Tendo em vista discutir, em particular, a formação de metano, utilizou-se um segundo modelo, no qual só a sua formação foi considerada. Diferentemente do primeiro conjunto de equações (1 a 5), esse modelo admite que a quantidade de enzimas (ou microorganismos) altera-se com o tempo (Equação 6). As concentrações de metano foram ajustadas ao modelo da curva logística, a partir de regressões não-lineares (algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt).

$$CH_4 = \frac{\left(K_{CH_4} \right) Máx.}{1 + e^{-(a - k_m t)}} \quad (6)$$

em que:

K_{CH_4} = quantidade máxima de formação de metano (%);

k_m = coeficiente de formação de CH_4 (dia^{-1});

a = constante de integração.

Resultados

Os teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio da MOP são apresentados na Tabela 1. Nota-se que, durante a decomposição, os teores desses elementos decresceram principalmente nos

primeiros dias. Dependendo da temperatura de incubação, os valores de pH variaram entre 6,2 e 7,2 durante os experimentos (Tabela 1).

Tabela 1 Valores de pH, carbono, nitrogênio e hidrogênio da MOP de *E. najas* em diferentes temperaturas.

Tempo (dia)	17,7°C				20,3°C			
	pH	C (mg)	N (mg)	H (mg)	pH	C (mg)	N (mg)	H (mg)
0	6,6	1089,2	94,2	138,2	6,6	1089,2	94,2	138,2
2	6,4	839,2	53,4	53,2	7,1	820,6	5,0	121,6
5	6,9	-	-	-	7,0	-	-	-
9	7,2	923,2	55,5	63,6	7,2	952,3	69,5	132,9
14	7,0	-	-	-	6,9	-	-	-
22	6,8	-	-	-	6,8	-	-	-
29	6,6	851,1	60,9	132,2	6,8	876,3	103,5	118,3
39	6,4	-	-	-	6,5	-	-	-
61	6,3	675,2	88,6	79,4	6,3	626,4	57,6	85,4
83	6,3	-	-	-	6,5	-	-	-
120	6,2	489,7	65,3	61,8	7,0	580,3	88,4	56,7
Tempo (dia)	22,4°C				27,0°C			
	pH	C (mg)	N (mg)	H (mg)	pH	C (mg)	N (mg)	H (mg)
0	6,5	1089,2	94,2	138,2	6,4	1089,2	94,2	138,2
2	6,4	1108,3	85,7	129,4	6,2	1053,2	82,9	137,2
5	6,2	-	-	-	6,3	-	-	-
9	6,2	720,4	62,3	97,5	6,2	670,7	63,5	82,7
14	6,2	-	-	-	6,5	-	-	-
22	6,3	-	-	-	6,7	-	-	-
29	6,3	432,9	53,5	58,1	6,8	430,8	66,2	52,3
39	6,4	-	-	-	6,6	-	-	-
61	6,7	407,9	58,2	53,1	6,7	334,7	49,1	39,6
83	6,8	-	-	-	6,6	-	-	-
120	7	361,1	45,3	41,2	6,5	461,0	56,3	54,4

Na Tabela 2, apresentam-se os parâmetros obtidos dos ajustes dos resultados experimentais ao modelo cinético proposto (Figura 1; Equações 1 a 5). Por meio desses ajustes, quantificaram-se os teores das diferentes frações e o destino dos diferentes produtos. Com o aumento da temperatura, a participação do COPLS tendeu a aumentar. Para as incubações a 17,7°C, 20,3°C, 22,4°C e 27,0°C, tais frações foram de 26,04%, 25,53%, 64,95 e 67,22%, respectivamente. Os valores dos coeficientes globais de decaimento (k_T) do COPLS incrementaram-se nas

temperaturas mais baixas. As perdas de massa do COPLS apresentaram tempos de meia-vida que variaram 11 horas (17,7°C e 20,3°C) a 4,9 dias (22,4°C).

As quantidades de COD incrementaram-se em função da temperatura: de 16,48% (17,7°C) a 31,62% (27,0°C); essa mesma tendência ocorreu com o COPL (variação de 9,94% a 17,7°C a 37,50% a 27,0°C). Os valores de k_3 também apresentaram incrementos em função da temperatura (17,7°C: 0,0013 dia⁻¹; 20,3°C: 0,0025 dia⁻¹; 22,4°C: 0,0059 dia⁻¹; e 27,0°C: 0,0123 dia⁻¹; Tabela 2).

Tabela 2 Parâmetros do modelo cinético de mineralização anaeróbia de *Egeria najas*.

Temperatura	17,7°C		20,3°C		22,4°C		27,0°C	
Parâmetro	erro		erro		erro		erro	
COPLS (%)	26,04	7,23	25,53	6,93	64,95	4,08	67,22	4,46
COPR (%)	73,55	3,32	74,18	3,20	32,006	3,42	30,88	3,43
K_T (dia ⁻¹)	1,5 (+)	-	1,5 (+)	-	0,14	0,02	0,17	0,02
k_4 (dia ⁻¹)	0,0058	0,0010	0,0060	0,0012	0,0004	0,0015	0,0003	0,0016
r^2	0,89		0,90		0,98		0,98	
COD (%)	16,48	2,30	18,02	3,15	20,53	5,91	31,62	4,40
k_3 (dia ⁻¹)	0,0013	0,0024	0,0025	0,0038	0,0059	0,0068	0,0123	0,0456
r^2	0,56*	-	0,41*	-	0,15*	-	0,67*	-
COPL (%)	9,94	-	7,8	-	47,46	-	37,5	-

(*) Valores calculados; (+) valores atribuídos. COPLS = $IN_1 + IN_2$; COD = IN_2 ; e COPL = IN_1 .

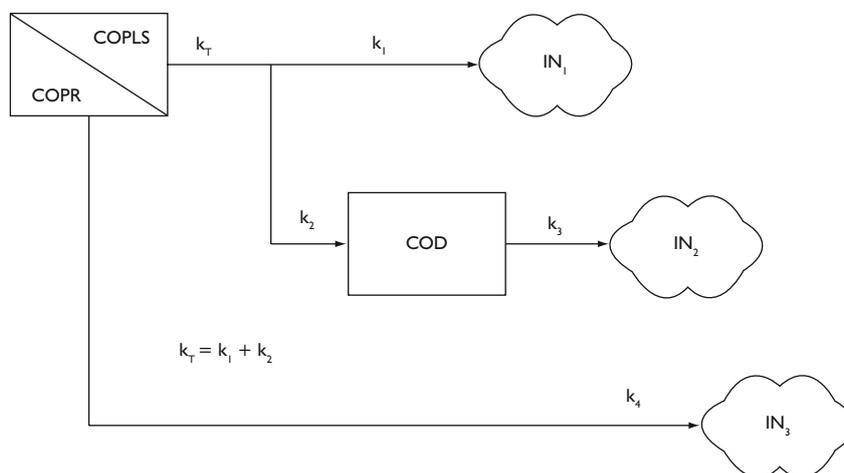


Figura 1 Modelo proposto para a mineralização anaeróbia, em que: COPLS = carbono orgânico particulado lábil e solúvel; COPR = carbono orgânico particulado refratário; COD = carbono orgânico dissolvido; (COPL) k_T = coeficiente global de decaimento da COPLS ($k_1 + k_2$); k_1 = coeficiente de mineralização da COPL; k_2 = coeficiente de solubilização; k_3 = coeficiente de mineralização do COD; k_4 = coeficiente de mineralização do COPR.

A participação das frações refratárias dos detritos particulados e seus coeficientes de mineralização diminuiu com o aumento da temperatura de incubação, principalmente a partir de 22,4°C. As porcentagens de COPR e seus coeficientes de mineralização (k_4) foram: 73,56% e 0,0058 dia⁻¹ (17,7°C); 74,17% e 0,0060 dia⁻¹ (20,3°C); na incubação, a 22,4°C, o COPR foi 32,0% e $k_4 = 0,0004$ dia⁻¹; na temperatura de 27,0°C, os valores de COPR e k_4 foram 30,88% e 0,0003 dia⁻¹, respectivamente. Os tempos de meia-vida ($t_{1/2}$) das reações de oxidação das formas refratárias (COPR) variaram entre 3,8 meses (20,3°C) e 6,2 anos (27,0°C).

Os valores do carbono orgânico consumido, apresentados na Figura 2, foram obtidos da Equação 1; os ajustes foram estimados a partir das simulações efetuadas pela Equação 5, parametrizada com os valores apresentados na Tabela 2. Os confrontos entre os resultados calculados e os obtidos experimentalmente indicaram que foram próximos (r^2 : 0,81 a 0,92).

O destino do carbono orgânico consumido na mineralização de *E. najas* é apresentado na Figura 3. Os valores de CID, CO₂ e CH₄ foram apresentados em função da composição do carbono mineralizado acumulado total (COC, Figura 2).

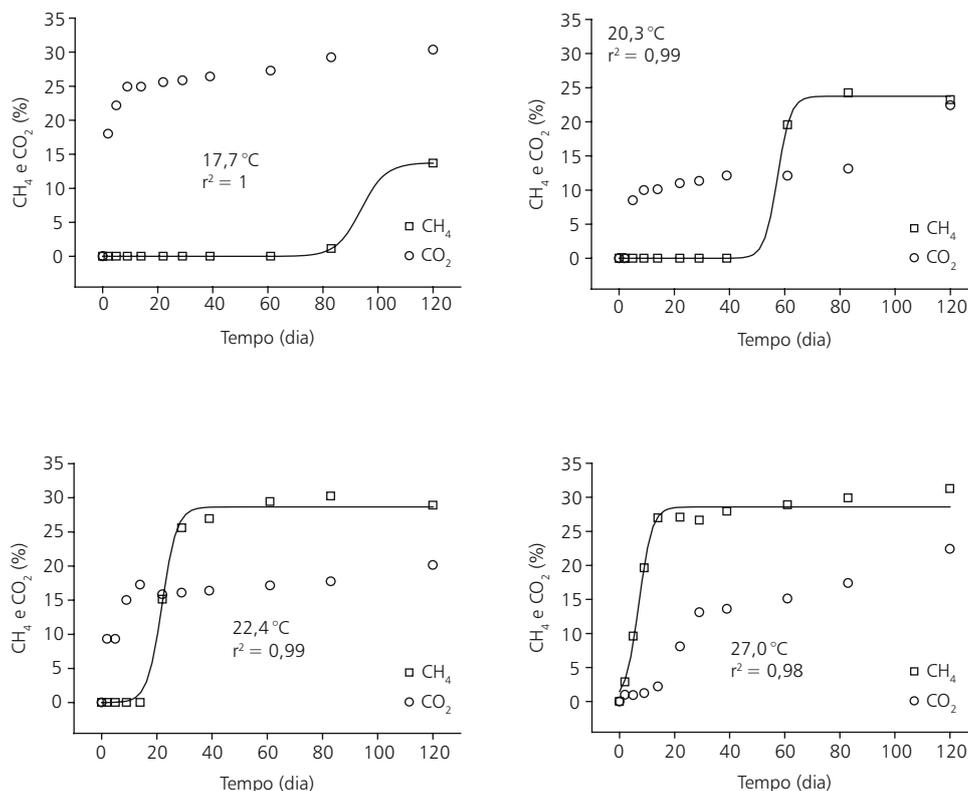


Figura 2 Cinéticas da mineralização de *Egeria najas* em diferentes temperaturas.

As formas dissolvidas de carbono inorgânico (CID) mostraram-se sempre presentes; seus valores variaram entre 5% e 40% do COC. Apenas na incubação a 20,3°C o CID representou 100% no início do experimento. O dióxido de carbono (Figura 3), como produto final da mineralização, predominou nas incubações nas menores temperaturas; a 17,7°C, os valores corresponderam a até 90% do carbono mineralizado. O CO₂ também foi elevado durante todo

o experimento a 20,3°C, variando de 76% a 30%, entre o 5º e o 83º dia. A 22,4°C, o CO₂ predominou no início do experimento até o 14º dia. Na temperatura de 27,0°C, as contribuições do CO₂, como produto final, foram baixas. Nesse caso, a produção de metano foi o principal destino da mineralização, durante o período considerado.

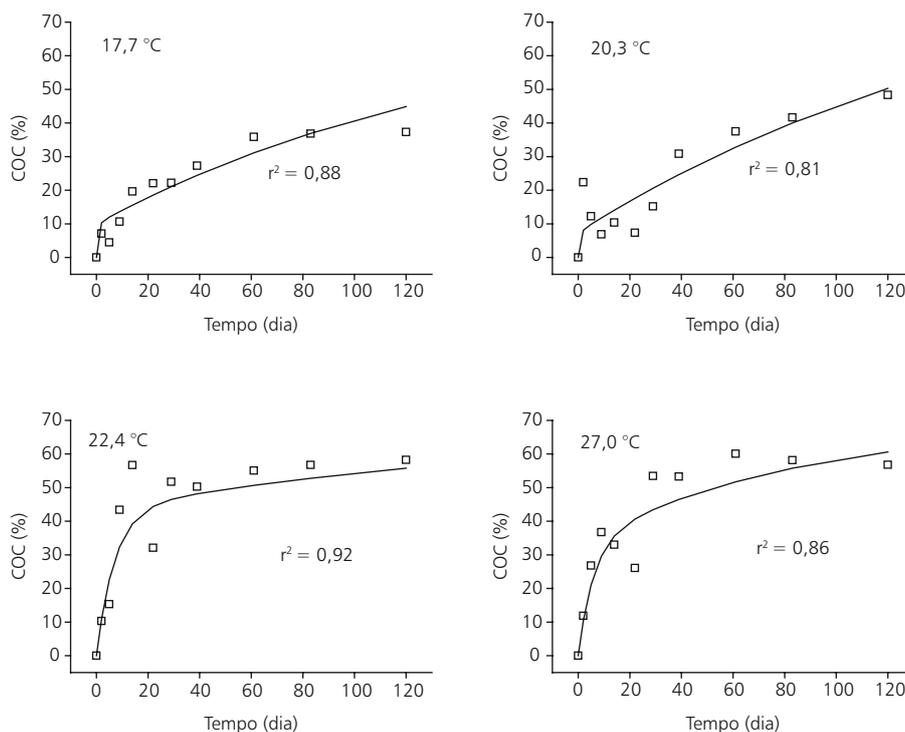


Figura 3 Mineralização de *Egeria najas*: destinos do carbono orgânico consumido em função do tempo e da temperatura.

A utilização da curva logística para a descrição da cinética de metanogênese (Figura 4) gerou elevados coeficientes de determinação ($r^2 > 0,98$). Os maiores rendimentos de metano foram verificados nas temperaturas mais elevadas, com valores chegando a 28,59% (27,0°C) dos produtos gerados na mineralização de *Egeria najas*.

Nessa condição, o coeficiente de formação de CH₄ também foi mais elevado ($k_m = 0,418$ dia⁻¹). Na temperatura de 17,7°C, a conversão para metano foi de 13,72%, e o coeficiente de formação foi 0,229 dia⁻¹; nas temperaturas de 20,3°C e 22,4°C, os coeficientes de conversão (rendimentos) foram de 23,75% e 28,66%, respectivamente. Os coeficientes de formação para as temperaturas de incubação de 20,3°C e 22,4°C foram de 0,448 e 0,377 dia⁻¹, respectivamente (Figura 5).

O tempo necessário para iniciar a produção de CH₄ na mineralização de *E. najas* foi inversamente proporcional à temperatura (Figura 5). A 17,7°C, o metano foi quantificado a partir do 74º dia; à temperatura de 20,3°C, teve início após o 48º dia e nas temperaturas de 22,4°C e 27,0°C; as produções iniciaram-se no 11º e no 2º dia, respectivamente.

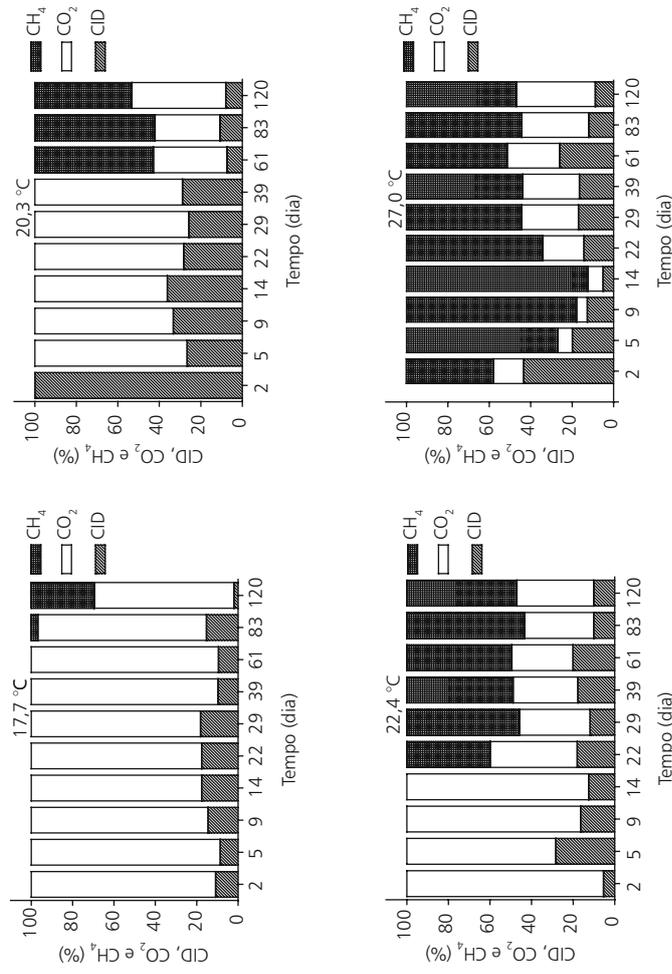


Figura 4 Cinéticas de formação de CH₄ e de CO₂ na degradação de *Egeria najas* em função da temperatura.

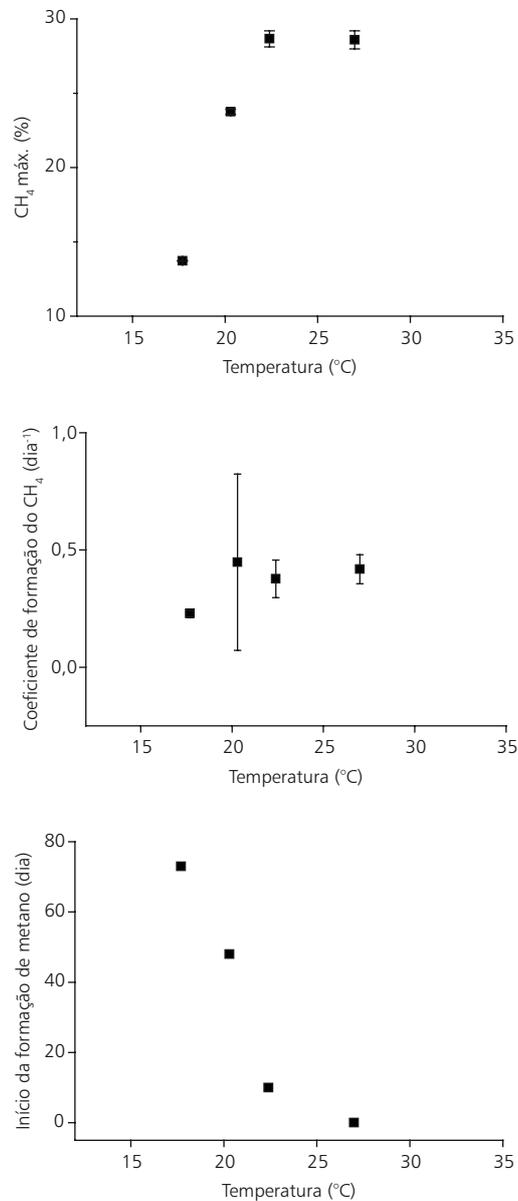


Figura 5 Efeitos da temperatura sobre os parâmetros cinéticos da metanogênese de *Egeria najas*.

Discussão

As perdas de massa envolvidas na decomposição de *Egeria najas* apresentaram duas fases, uma rápida e outra lenta. Provavelmente, nas temperaturas mais elevadas, as maiores perdas de massa ocorreram em decorrência das elevadas taxas das reações químicas e bioquímicas. Estudos de decomposição de macrófitas aquáticas (*Typha* e *Scirpus*), incubadas sob temperaturas de 20°C e 30°C, durante 112 dias, apresentaram perdas de massas durante a fase rápida

de 26% e 30%. Essas diferenças podem ser explicadas pela presença de substratos utilizados em início de decomposição, substratos com maior ou menor presença de material fibroso (WRUBLESKI et al., 1997).

Os teores das frações lábeis/solúveis incrementaram-se com a temperatura, e, conseqüentemente, as proporções dos compostos orgânicos refratários dos detritos decresceram. Pode-se determinar que, a 17,7°C e 20,3°C, o carbono das frações lábeis/solúveis encontrou-se principalmente na forma dissolvida e, a 22,4°C e 27,0°C, o carbono foi predominantemente consumido no processo respiratório. Os aumentos dos valores dos coeficientes de mineralização do COD (k_3) também foram influenciados pelo aumento da temperatura. Os incrementos de temperatura favoreceram a dissolução de compostos, promoveram as variações nos coeficientes de transformação dos detritos e induziram alterações nas estruturas químicas dos detritos. De modo geral, a temperatura favoreceu a ocorrência dos processos de oxidação de curto prazo, a solubilização e a oxidação dos compostos solúveis.

Durante a fase lenta, quando ocorreu o predomínio da decomposição do material mais refratário, os valores baixos dos coeficientes de mineralização do COPR provavelmente estiveram relacionados às estruturas desse material, que é basicamente constituído por compostos de difícil degradação (por exemplo, lignina e celulose). A presença de compostos alelopáticos, resistentes ou tóxicos, também pode ter influenciado negativamente. Nesse contexto, os fenóis provenientes da lignina podem ter inibido o crescimento de microorganismos (GONZÁLEZ et al., 1995).

Neste trabalho, o k_4 foi um dos parâmetros que mais se modificou em função da temperatura. Seus valores mais baixos foram verificados a 22,4°C e 27,0°C. Isso ocorreu, provavelmente, por causa dos intensos processos metabólicos microbianos ocorridos nas fases iniciais. É possível, desse modo, que grande parte dos nutrientes (principalmente formas nitrogenadas) tenha sido expurgada dos frascos na forma gasosa. Portanto, os processos lentos, nas temperaturas elevadas, teriam sido determinados pela escassez de nutrientes, constituindo um fator limitante para os processos de mineralização. Estudos de decomposição de serapilheira mostraram que o nitrogênio na forma de amônia talvez seja o nutriente limitante, uma vez que é uma das principais fontes de nitrogênio utilizada pelos microorganismos e proveniente da degradação (SENEVIRATNE & HOLM, 1998). Em relação a outros estudos, valores mais elevados do coeficiente de perda de massa das frações refratárias foram encontrados na mineralização de *Scirpus cubensis* (0,03 dia⁻¹), *Cabomba piauhyensis* (0,05 dia⁻¹) e *Nymphoides indica* (0,0079 dia⁻¹) (CAMPOS JR., 1998; BIANCHINI, JR. & TOLEDO, 1998).

As quantidades de carbono mineralizadas até o 120º dia foram similares em todas as temperaturas (40% a 55%), enquanto as contribuições dos diferentes produtos (CO₂, CH₄ e carbono inorgânico dissolvido) foram distintas. As concentrações do CID mostraram-se, sempre, relativamente baixas, provavelmente por causa do pH, que variou entre 6,2 e 7,2. Nessa faixa de pH, o CID pode se encontrar na forma de HCO₃⁻ (WETZEL, 1983) ou como CO₂ “livre”. Como se promoveu o expurgo ao longo do experimento (borbulhou-se nitrogênio após as determinações dos gases), é possível que parte do HCO₃⁻ tenha sido transformada em CO₂ para estabelecer o equilíbrio do sistema carbonato. Assim, supõe-se que as baixas concentrações de CID reflitam esse processo.

O carbono produzido na forma de CO₂ foi superior a 17,7°C. A 20,3°C, tal predominância ocorreu até que a liberação do metano se iniciasse (48º dia). A 22,4°C, o CO₂ predominou

até o 14º dia, quando a produção do CH₄ foi maior. Na temperatura de 27,0°C, o dióxido de carbono não foi predominante, porém sua produção foi crescente até o final. Sugere-se que as diferenças de respostas das produções desses gases estejam ligadas às fases da degradação da matéria orgânica, em que o CO₂ foi produzido, durante a fase lenta e a rápida. Os resultados corroboram os obtidos por Inubushi et al. (1997), que, estudando a emissão de CH₄ e CO₂ da decomposição da matéria orgânica de macrófitas aquáticas, em diferentes temperaturas, determinaram que a proporção de dióxido de carbono decresceu nas temperaturas elevadas (especialmente a 40°C), em detrimento da produção de metano.

A formação de CH₄ na mineralização de *Egeria najas* provavelmente ocorreu por meio de dois processos; o mais lento foi determinado nas câmaras incubadas a 17,7°C, nas quais os coeficientes de formação de metano foram menores e a conversão desse detrito para metano apresentou-se baixa. Nas temperaturas mais elevadas, os coeficientes de formação e os rendimentos para CH₄ foram maiores. A 22,4°C e 27,0°C, a metanogênese predominou, entre o 5º e o 22º dia (Figura 4). Segundo Kelly & Chynoweth (1981), se a quantidade de matéria orgânica for elevada e ocorrer o aumento de temperatura, pode ocorrer um consumo acelerado da fração lábil dos detritos, sendo o CH₄ um dos produtos finais. Nos experimentos desenvolvidos por Inubushi et al. (1997), verificou-se que as emissões de CH₄ tiveram início no 14º dia a 40°C, ao passo que, nas temperaturas mais baixas, não ocorreram emissões. O processo de produção do metano nesse experimento pode ter sido limitado pelos seguintes fatores: teores de COPLS (nesse caso, regulado pela temperatura) e ocorrência da re-oxidação do metano.

Por causa do processo lento de perda de massa de COPR, verificado a 22,4°C e 27,0°C, supõe-se que tenha havido extinção de nutrientes no início do experimento. Sugere-se que o CH₄ tenha sido proveniente principalmente das frações lábeis/solúveis (COPLS), sendo processado rapidamente.

O hidrogênio, juntamente ao CO₂, pode ser transformado em metano e, neste experimento, o CO₂ decresceu, em função do tempo, podendo vir a ser outro fator limitante na produção de CH₄. Nesse contexto, alguns compostos, produzidos durante o processo de fermentação da matéria orgânica, são limitantes ao crescimento bacteriano, quando presentes em baixas concentrações (por exemplo, ácidos graxos voláteis). As bactérias metanogênicas dependem dos substratos fornecidos pelas bactérias acidogênicas: convertem monômeros hidrolizados em materiais orgânicos mais simples, principalmente ácidos graxos, podendo representar, normalmente, um fator limitante no processo de formação do metano. Nesse estudo, as câmaras incubadas a 27,0°C podem ter selecionado os microorganismos mesófilos (LETTINGA et al., 1996), indicando possivelmente o predomínio destes nas amostras de água da lagoa. Outro fator que pode explicar a diferença de formação do metano nas diferentes temperaturas são os tipos de microorganismos.

Por causa das emissões relativamente baixas de CO₂, nas temperaturas de 22,4°C e 27,0°C, sugere-se que o processo de metanogênese tenha sido favorecido por causa da transformação do CO₂ em CH₄, em que ele atua como aceptor dos átomos de hidrogênio removidos dos compostos orgânicos pelas enzimas.

Admitindo que na Lagoa do Óleo a temperatura varie entre 22,0°C e 28,5°C (GUNTZEL et al., 2000) e que comporte elevada biomassa de *Egeria najas*, infere-se que, nesse ambiente, a exportação de carbono representado pelos fluxos de gases (CO₂ e CH₄), originados da mineralização, seja um processo importante. Nesse contexto, segundo Ballester & Santos (2001),

estudando a dinâmica dos gases biogênicos CO₂, CH₄ e O₂ em duas Lagoas na Estação Ecológica do Jataí (Lagoa do Diogo e do Infernã), em que a Lagoa do Óleo faz parte, determinou-se que tais lagoas são fontes importantes de gases reduzidos (principalmente no verão) para a atmosfera. A autora determinou, ainda, que o carbono na forma de CO₂ é o processo predominante nas lagoas marginais estudadas e que a contribuição da metanogênese nos processos de remineralização e ciclagem do carbono é quantitativamente significativa.

Conclusões

De acordo com as condições experimentais adotadas, os resultados permitem inferir que: 1) as conversões dos detritos de *E. najas* em estruturas lábeis são, na Lagoa do Óleo, favorecidas pelas temperaturas elevadas, e seus coeficientes de mineralização são relativamente baixos se comparados com os verificados nas temperaturas mais baixas; 2) além de promover variações nos coeficientes de transformação dos detritos, a temperatura induz alterações nas estruturas dos detritos. No geral, a temperatura favorece a ocorrência dos processos de perdas de massa de curto prazo: a solubilização e a oxidação dos compostos lábeis/solúveis; 3) as diferenças nas produções desses gases estão ligadas às fases da degradação da *Egeria najas*; entre elas, o metano seria produzido na fase rápida da mineralização, e o CO₂, durante a fase lenta, quando as taxas de mineralizações são mais baixas; e 4) o processo de metanogênese é a etapa predominante do fluxo de carbono na Lagoa do Óleo, se os sedimentos estiverem em anoxia, sugerindo, assim, a grande participação de microorganismos anaeróbios (mesófilos) na formação dos gases CO₂ e CH₄.

Agradecimentos

Agradecimento à FAPESP (Processos 1998/12564-4 e 1998/15011-6) e ao CNPq (Processos 300959/2004-4 e 150169/2004-3).

Referências Bibliográficas

- BALLESTER, M. V. R.; SANTOS, J. E. Biogenic gases (CH₄, CO₂ and O₂) distribution in a riverine wetland system. *Oecologia Brasiliensis*, v. IX, pp. 21-32, 2001.
- BIANCHINI JR., I. The degradation process of organic matter in reservoirs. Hydropower plants and greenhouse gas emissions. In: ROSA, L. P.; SANTOS, M. A. (Orgs.). *Energy planning program*. Rio de Janeiro: COPPE Reported/Ed. Tecnológica, 1997. pp. 6-27.
- BIANCHINI JR., I.; TOLEDO, A. P. P. Estudo da mineralization de *Nymphoides indica*. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA, 7. 1996, São Carlos. *Anais...* São Carlos, PPG-ERN, UFSCar, 1998. pp. 1315-1329.
- BITAR, A. L.; BIANCHINI JR., I. Mineralization assays of some organic resources of aquatic systems. *Brazilian Journal of Biology*, v. 62, pp. 557-564, 2002.
- BUBIER, J. T.; MOORE, T. R. Ecological perspective on methane emissions from northern wetlands. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 9, pp. 460-464, 1994.

CAMPOS JR., J. J. F. *Contribuição ao estudo da decomposição de macrófitas aquáticas da Lagoa do Infernã: processo anaeróbio*. 1998. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CICERONE, R. J.; OREMLAND, R. S. Biochemical aspects at atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles*, v. 4, pp. 299-327, 1988.

CRILL, P. M.; BARTLETT, K. B.; WILSON, J. O.; SEBACHER, D. I.; HARRIS, R. C. Tropospheric methane from an Amazon floodplain lake. *J. Geophys. Res.*, v. 93, pp. 1564-1570, 1988.

CUNHA-SANTINO, M. B. *Atividade enzimática, cinética e modelagem matemática da decomposição de *Utricularia breviscapa* da lagoa do Óleo (Estação Ecológica de Jataí, Luiz Antônio, SP)*. 2003. 140 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JR., I. Humic substance mineralization in a tropical oxbow lake (São Paulo, Brazil). *Hydrobiologia*, v. 468, pp. 33-43, 2002.

FEY, A.; CONRAD, R. Effect of temperature on carbon and electron flow and on the archaeal community in methanogenic rice field soil. *Applied Environmental Microbiology*, v. 6, n. 11, pp. 4790-4797, 2000.

GONZÁLEZ, L.; SOUTO, X. C.; REIGOSA, M. J. Allelopathic effects of *Acacia melanoxylon* R.Br. phyllodes during their decomposition. *Forest Ecology and Management*, v. 77, pp. 53-63, 1995.

GUNTZEL, A. M.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; RIETZLER, A. C. Diversidade do zooplâncton de lagoas marginais do Rio Mogi-Guaçu: I *Rotífera*. In: SANTOS, J. E.; PIRES, J. S. R. (Orgs.). *Estudos integrados em ecossistemas. Estação Ecológica de Jataí*. v. 2. São Carlos: Rima, 2000. pp. 537-557.

INUBUSHI, K.; HORI, K.; MATSUMOTO, S.; WADA, H. Anaerobic decomposition of organic carbon in paddy soil in relation to methane emission to atmosphere. *Water Science and Technology*, v. 36, pp. 523-530, 1997.

KELLY, C. A.; CHYNOWETH, D. P. The contributions of temperature and of the input of organic matter in controlling rates of sediment methanogenesis. *Limnology and Oceanography*, v. 26, pp. 891-897, 1981.

LETTINGA, G.; HULSHOF, L. W.; ZEEMAN, G. *Biological wastewater treatment*. Part I: anaerobic wastewater treatment. Wageningen: Ed. January Agricultural University, 1996. 124 p.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. New York: Cambridge University Press, 1993. 994 p.

SENEVIRATNE, G.; HOLM, L. H. J. CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a wetted tropical upland soil following surface mulch application. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 30, n. 12, pp. 1619-1622, 1998.

WETZEL, R. G. *Limnology*. Philadelphia: Saunders, 1983. 767 p.

WRUBLESKI, D. A.; MURKIN, H. R.; VAN DER VALK, A. G.; NELSON, J. W. Decomposition of emergent macrophyte roots and rhizomes in a northern prairie marsh. *Aquatic Botany*, v. 58, pp. 121-134, 1997.