Estimativa de emissão de metano na formação do reservatório da hidrelétrica Serra do Facão no estado de Goiás

Estimate of methane emission from the filling of hydroelectric dam of Serra do Facão in Goiás state - Brazil

Simone Pereira Ferreira
Doutora em Sensoriamento Remoto/UFRGS
Professora do Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense
Campus Bagé
simonepferreira@yahoo.com.br

Rita de Cássia Marques Alves
Doutora em Meteorologia/USP
Professora Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
rita.cma@terra.com.br

Flavio Varone
Mestre em Meteorologia/UFPEL
Pesquisador da Fundação estadual de Pesquisa Agropecuária - RS
fvarone@gmail.com

Resumo
O objetivo deste trabalho é estimar as emissões de metano durante o enchimento do reservatório da hidrelétrica Serra do Facão utilizando imagens Landsat TM. A metodologia desenvolvida neste trabalho compreende as etapas das correções geométricas e radiométricas, recorte e processamento das imagens. Para realizar a estimativa foi necessário calcular índices de vegetação e identificar características como biomassa, índice de área foliar, atividade fotossintética, produtividade. Os resultados obtidos neste trabalho são do metano estimado durante o enchimento do lago da represa da usina hidrelétrica Serra do Facão. Os valores estimados de metano variaram entre 2,38 e 64,08 kg/km2/dia e estão de acordo com os dados publicados no Relatório de Referência do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) e com outros trabalhos desenvolvidos em reservatórios tropicais. A metodologia aqui descrita pode servir para mitigar os efeitos resultantes do enchimento de grandes reservatórios. Com a técnica pode-se identificar regiões prioritárias para a supressão da vegetação que ficará submersa.

Palavras–chave: Sensoriamento remoto, Landsat, Cerrado, Índices de vegetação

Abstract
The aim of this study is to estimate methane emissions during the filling of the reservoir of the Serra do Facão hydroelectric plant using Landsat TM images. The methodology developed in this work comprises the steps of radiometric and geometric corrections, cropping and image processing. To estimate methane emissions, we had to calculate vegetation indices, identify features like biomass, leaf area index, photosynthetic activity, productivity. The results obtained in this work are the estimated methane during the filling of the Lake of the dam of Serra do Facão hydroelectric power plant. The estimated values of methane varied between 2.38 and 64.08 kg/km2/day and are according to the data published in the report of Ministry of science and technology (MCT) and with other projects developed in tropical reservoirs. The methodology described here can serve to mitigate the

effects of filling of large reservoirs. With the technique can identify priority regions for the removal of vegetation that will be submerged.

Keywords: Remote sensing, Landsat, Cerrado, Vegetation index.

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 74,6% da energia elétrica gerada no Brasil provém de fontes renováveis. A maior participação é da hidroeletricidade, que representa 59,8% da geração, é uma fonte de baixo custo e com tecnologia nacional (EPE, 2015). O Brasil é um dos países que menos emite gases de efeito estufa na produção de energia elétrica. Em 2010, enquanto a China emitiu 766 kgCO_2/kWh, os Estados Unidos 522 kgCO_2/kWh e a União Europeia 404 kgCO_2/kWh, no Brasil esse indicador foi de apenas 70 kgCO_2/kWh, no ano de 2012 subiu para 82 kgCO_2/kWh (EPE, 2015).

A geração de energia a partir de usinas hidrelétricas foi considerada por muito tempo uma forma de produção limpa e renovável. No final do século passado alguns estudos demonstraram que os reservatórios poderiam ser emissores potenciais gases de efeito estufa (GEEs), como: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (RUDD et al., 1993; LOUIS et al., 2000).

De acordo com Rosa et al. (2004) se o estoque inicial da biomassa for conhecido e o ciclo do carbono bem compreendido, o fluxo dos gases pode ser calculado com bases teóricas. Nesse estudo levaram em consideração a latitude, o clima, a vegetação e a densidade de biomassa alagada de uma represa. Outros trabalhos (RAHMAN et al., 2001; BAPTISTA, 2003; CERQUEIRA; FRANCA-ROCHA, 2007; JUNGES et al., 2007) demonstram a possibilidade da utilização dos índices espectrais de vegetação para estimar a biomassa, o estoque e o sequestro de carbono. Alguns métodos para estimar emissões de CO_2, CH_4 e N_2O são baseados na cobertura e uso do solo feita por imagens de satélite e modelos biogeoquímicos (COUNCIL, 2010).

O enchimento dos reservatórios está associado a ocorrência de altas taxas de atividade bacteriana e produção de GEEs (GALY-LACAUX et al., 1999). Grande parte da biomassa inundada é decomposta nos primeiros dez anos (ROLAND et al., 2009), e os níveis baixos de oxigênio nas camadas profundas próximas ao sedimento favorecem a geração de metano (UTSUMI et al., 1998a; LIMA, 2005). A decomposição da biomassa inundada representa a principal fonte de emissão de gases nos primeiros anos de operação de uma usina (GALY-LACAUX et al., 1999; ABRIL et al., 2005; TREMBLAY et al., 2005). A atividade bacteriana decompõe a fração orgânica do carbono, convertendo-a para formas inorgânicas e dissolvidas, como CO_2 e CH_4. O aumento do nível da água faz com que sejam alagadas áreas que antes estavam emersas, e com isso, ocorre a liberação de nutrientes e a formação de CO_2 e CH_4.

O método de cálculo mais utilizado para estimar as emissões de gases de efeito estufa em reservatórios é a extrapolação. "Uma vez que não é possível ter medidas diretas para mais do que alguns poucos dos reservatórios existentes (...)" (FEARNSIDE, 2008, p. 101). As extrapolações também presumem uma emissão constante em toda a área (FEARNSIDE, 2008), não representando a heterogeneidade espacial, tanto no mesmo reservatório quanto de um para outro, e a variação temporal dos fluxos (SANTOS et al., 2008). As coletas de dados in situ consomem muito tempo e possuem custos relativamente altos e frequentemente falham ao delimitar regiões heterogêneas (KHORRAM et al., 1991). As emissões variam temporalmente e podem ser influenciadas por vários fatores: temperatura da superfície, regime de ventos, exposição ao sol, parâmetros, físicos, químicos e biológicos da água, profundidade, tipo de vegetação, idade do alagamento, temperatura da água e intensidade da correnteza.

O sensoriamento remoto pode ser utilizado para o monitoramento de ambientes aquáticos e mudanças na superfície terrestre, pois possibilita uma visão do todo quando utilizado em grandes áreas. O objetivo deste trabalho é estimar as emissões de metano durante o enchimento do reservatório da hidrelétrica Serra do Facão utilizando imagens Landsat TM. A não remoção prévia da vegetação nas áreas inundadas é uma fonte desencadeadora dos processos de eutrofização desses ambientes devido a degradação da matéria orgânica. A metodologia aqui descrita pode servir para mitigar os efeitos resultantes do enchimento de grandes reservatórios. Com a técnica pode-se identificar regiões prioritárias para a supressão da vegetação que ficará submersa após a inundação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão (latitudes 18°04’ e 17°35’ Sul e longitudes 47°37’ e 47°45’ Oeste) está localizado nos municípios de Catalão, Campo Alegre de Goiás, Cristalina e Davinópolis no estado de Goiás e no município de Paracatu em Minas Gerais e inserido no bioma Cerrado (Figura 1). Foi formado pelo represamento do rio São Marcos (bacia do rio Paraná, sub-bacia do rio Paranaíba). Possui forma dendrítica ocupando uma área de 218,84 km^2, quando atinge a cota máxima a jusante de 756 m ocupa 256 km^2. Dessa área total inundada 155 km^2 correspondem a calha natural do rio. Sua extensão em linha reta é de 60 km. O lago possui profundidade média de 24 m, o volume de água é de 5,28 bilhões m^3 e a potência estimada é de 210 megawatts. As obras da represa foram iniciadas em fevereiro de 2007. O enchimento iniciou em novembro de 2009, em agosto de 2010 atingiu o nível mínimo e em maio de 2011 atingiu o nível máximo 756 metros (cota referente ao nível do mar) (http://www.sefac.com.br/).

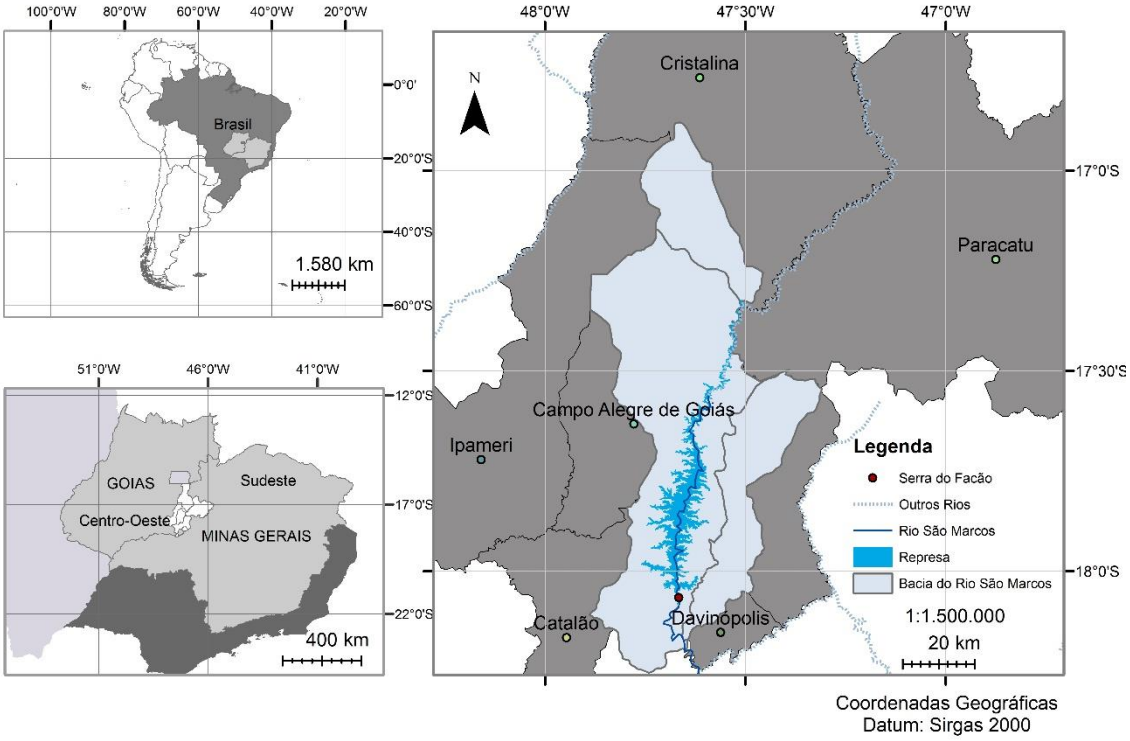

Figura 1 – Localização do reservatório da Hidrelétrica Serra do Facão

A represa situa-se no cerrado, o segundo maior bioma brasileiro. O bioma é estruturado em cinco tipos principais: cerradão, cerrado stricto sensu (formação savânica), campo cerrado, campo sujo, e campo limpo (GOODLAND, 1971). A paisagem da região estudada é formada por fragmentos remanescentes de cerrado stricto sensu onde o estrato lenhoso adquire gradativamente maior importância na paisagem, assim como no campo sujo; campo limpo que é representado por um estrato herbáceo/subarbustivo sem árvores e arbustos; mata ciliar e pastagens (SEFAC, 2012).

2.2. Climatologia da região

Peel et al. (2007) concluíram que o clima predominante na região Centro-Oeste é o clima tropical com estação seca no inverno (Aw), e apresenta duas estações bem definidas: uma estação chuvosa (outubro-março) e outra seca (abril-setembro). Devido a sua localização geográfica, a região se caracteriza pela atuação de sistemas meteorológicos tropicais e sistemas de latitudes médias, e apresenta eventos de chuva intensa, especialmente nos meses de verão. Durante a primavera e no verão, a atuação da massa equatorial continental, quente e úmida, provoca chuva abundante; no inverno, ocorrem eventos com temperaturas mais baixas e estiagens, associados ao ingresso da massa de ar polar atlântica, mais seca e fria; nos meses de verão, a massa de ar tropical atlântica também

atua e colabora para o aumento de umidade e, consequentemente, intensifica os episódios de chuva. Na Tabela 1 é apresentada a caracterização climática do município de Catalão (GO) com as médias mensais de chuva, temperaturas máxima e mínima, evaporação, déficit ou excedente hídrico, insolação e umidade relativa do ar (SILVA, 2006).

Tabela 1 - Caracterização climática do município de Catalão (GO)

Índice	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Chuva (mm)	242,7	195,2	139,8	33,3	7,5	8,1	7,5	26,5	74,1	165,1	235,2	273,9
Temperatura máxima (ºC)	27,9	28,9	27,7	26,9	25,4	25,3	24,5	26,6	25,4	30,3	28,1	28,8
Temperatura mínima (ºC)	19,1	19,1	18,9	17,8	15,6	14,3	13,9	15,6	17,8	18,5	18,8	18,9
Evaporação (mm)	73,5	70,1	78,7	85,3	102,1	110,8	140,4	178,1	177,1	132,9	94,3	71,1
Déficit e/ou excedente hídrico (mm)	131	101	37	-13	-37	-37	-42	-45	-14	0	97	166
Insolação (horas)	174,7	171,1	200	222,4	246,6	247,5	265,1	262	196	193	181,4	154,3

Fonte: Silva 2006

2.3. Dados de satélites

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas imagens Landsat TM (8 bits) devido à sua resolução espacial (30 m), bandas no visível, infravermelho próximo e termal e pela disponibilidade das imagens no período de interesse. Na Tabela 2 são descritos os parâmetros utilizados no processamento das imagens TM.

A área de estudo (Figura 1) fica localizada na órbita/ponto 221/72 (WRS-2) do Landsat. As imagens foram corrigidas geometricamente, tendo como base a cena de 11/4/2014 (Landsat 8 – OLI) com 24 pontos de controle e erro médio quadrático (RMS) menor que 1 pixel, reprojetadas para coordenadas geográficas e *datum* Sirgas 2000 (*European Petroleum Survey Group* (EPSG) 4674) e definido um buffer de 1000 m no entorno do reservatório. O recorte foi feito com auxílio do software Envi, versão 5.0.

Todos os cálculos (radiância, reflectância no topo da atmosfera e de superfície, os índices de vegetação, emissividade, temperatura de superfície, produtividade primária, estimativa de emissão de metano) realizados a partir das imagens foram feitos em programas desenvolvidos na linguagem de programação Python.

Na Tabela 3 são apresentadas as datas, sensor e origem das imagens utilizadas. Os produtos no nível 1G e 2 possuem calibração radiométrica e geométrica empregando parâmetros do satélite

para modelar e corrigir as distorções. No nível L1T (*Level 1 Terrain*) é utilizado modelo digital de elevação para correção do terreno.

Tabela 2 - Parâmetros do Landsat TM

banda (µm)			**ganho**	**bias**	**ESUN**	**resolução**
número	largura	centro	(W/m^2.sr. µm)/ND	$W/(m^2$.sr. µm)	$W/(m^2$. µm)	m
1-azul	0,452-0,518	0,485	0,765827	-2,29	1983	30
2-verde	0,528-0,609	0,569	1,448189	-4,29	1796	30
3-vermelho	0,626-0,693	0,660	1,043976	-2,21	1536	30
4-IVP	0,776-0,904	0,840	0,876024	-2,39	1031	30
5-IVM	1,567-1,784	1,676	0,120354	-0,49	220,0	30
6-IVT	10,45-12,42	11,435	0,055376	1,18	N/A	120
7-IVM	2,097-2,349	2,223	0,065551	-0,22	83,44	30

Fonte: Chander et al. 2009.
Legenda: IVP – infravermelho próximo; IVM -infravermelho médio; IVT – infravermelho termal

Tabela 3 – Dados sobre as cenas utilizadas

Data	**Fonte**	**Sensor**	**Nível de processamento**
13/9/2009	USGS	TM	1G
04/02/2010	USGS	TM	1G
16/4/2010	INPE	TM	2
19/4/2011	INPE	TM	2
11/4/2014	USGS	OLI	L1T

Fonte: os autores.
Legenda: Inpe: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; USGS: Serviço Geológico dos Estados Unidos; TM: Thematic Mapper; OLI: Operational Land Imager (Landsat 8)

2.4. Metodologia

A metodologia compreende as etapas das correções geométricas e radiométricas, recorte e processamento (Figura 2). As imagens da banda 6 (infravermelho termal) do TM foram reamostradas para 30 m de resolução espacial. Em parte da metodologia é necessário calcular índices de vegetação para identificar características da vegetação como biomassa, índice de área foliar (IAF), atividade fotossintética, produtividade (SOUZA et al., 2009).

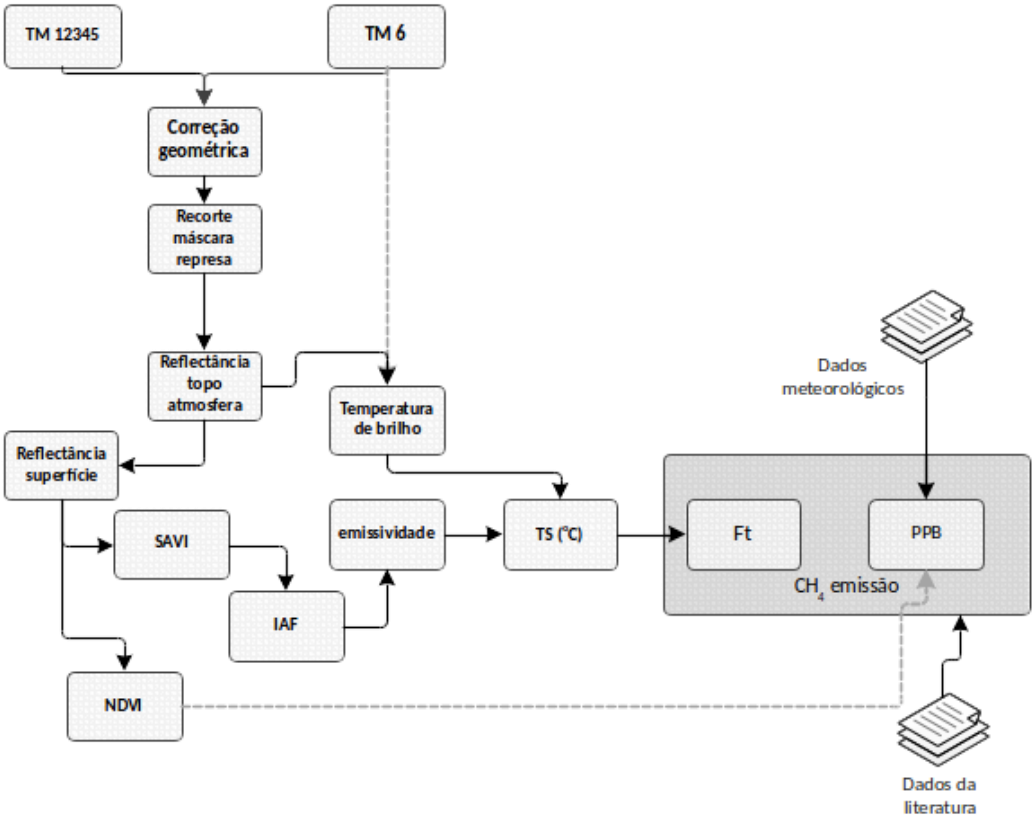

Figura 2- Fluxograma da metodologia para estimativa de emissão de metano no reservatório hidrelétrico da Serra do Facão.
Fonte: os autores. **Legenda**: SAVI: Soil Ajusted Vegetation Index; IAF: Índice de área foliar; NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; TS: temperatura de superfície; Ft: fator de temperatura; PPB: produtividade primária bruta.

2.5. Conversão para radiância

A radiância representa a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medidas pelo satélite (BASTIAANSSEN et al., 2000). A Conversão do número digital (ND) para radiância espectral L_λ (W/(m2.sr.µm)) pode ser feita utilizando a equação 1, onde os valores de ganho e bias são as constantes de calibração do sensor descritos na Tabela 2.

$$L_\lambda = ND * ganho + bias \qquad (1)$$

Em que:

L_λ é a radiância em um determinado comprimento de onda (λ);

ND é o número digital;

A determinação da radiância é um passo fundamental na conversão de dados de imagens de sensores orbitais em medidas de reflectância (SILVA, 2013). Assim, pode-se remover o efeito do

cosseno dos diferentes ângulos zenitais solares dos horários diferentes de aquisição das imagens e compensar os valores da irradiância solar exoatmosférica.

2.6. Conversão para reflectância

A reflectância possibilita o melhor monitoramento do comportamento de uma determinada cobertura, uma vez que mudanças na sua resposta espectral estariam relacionadas somente às mudanças nas propriedades estruturais e/ou espectrais da cobertura e não às mudanças no ângulo de iluminação solar ou variações dos sensores (NETO et al., 2008)

A reflectância é a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente expressa pelos fatores de reflectância (ρ). Os valores de radiância obtidos pela equação 1 são do sensor, não representam exclusivamente o brilho do objeto observado, possuem interferência da atmosfera (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). A reflectância calculada a partir desses valores é a reflectância aparente (Equação 2) descrita em Chander et al. (2009).

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos(\theta_{SZ})} \qquad (2)$$

Em que:

ρ_λ é a reflectância aparente ou de topo da atmosfera (adimensional);

L_λ é a radiância bidirecional aparente (W/(m^2.sr.μm));

d é a distância Sol-Terra em unidades astronômicas;

ESUN é a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera (W/(m^2.μm)) , conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**;

θ_{SZ} é o ângulo zenital solar, θ_{SZ}= 90-θ_{SE};

θ_{SE} é o ângulo de elevação solar.

Os valores da irradiância solar exoatmosférica (ESUN), irradiância que chega ao topo da atmosfera, é de suma importância para calcular a que chega na superfície, é expressa em W/(m2.µm) e na sua forma espectral se refere a energia que chega a uma determinada região do espectro eletromagnético.

Para transformar os valores reflectância aparente em fatores de reflectância de superfície deve-se eliminar os efeitos provocados pela atmosfera. A correção atmosférica é importante para retirar o efeito de atenuação atmosférica, devido à dispersão e absorção pelos gases e partículas que a compõem. Como descrito em Moran et al. (1992) a reflectância de superfície (ρ) pode ser calculada como na Equação 3

$$\rho = \frac{\pi*(L_\lambda - L_p)*d^2}{\tau_v*((ESUN_\lambda*\cos(\theta_{SZ})*\tau_z)+E_{down})} \quad (3)$$

Em que:

ρ é a reflectância de superfície;

L_λ é a radiância bidirecional aparente (W/(m^2.sr.μm));

L_p é radiância ascendente;

d é a distância Sol-Terra em unidades astronômicas;

θ_{SZ} é o ângulo zenital solar, θ_{SZ}= 90-θ_{SE};

τ_v é a transmitância da atmosfera no ângulo de visada;

τ_z é a transmitância da atmosfera no ângulo da iluminação;

E_{down} é a radiância difusa descendente.

O método *Dark Object Subtraction* (DOS) parte do pressuposto que a radiância de um pixel negro recebida pelo satélite é proveniente do espalhamento atmosférico (L_p). Essa presunção leva em consideração que poucos pontos na superfície da terra são realmente negros, por isso, é calculado um por cento (1%). A radiância ascendente do pixel negro é definida na Equação 4 (MORAN et al. 1992; CHAVEZ 1996).

$$L_p = L_{min} - L_{DO1\%} \quad (4)$$

Em que:

L_{min} é a radiância correspondente ao ND em que o número de pixels com esse valor é menor ou igual a 0,01% de todos os pixels da imagem (SOBRINO et al. 2004);

$L_{DO1\%}$ é a radiância do pixel negro.

A radiância do pixel negro $L_{DO1\%}$, no TM é calculada a partir da banda 1(SOBRINO et al. 2004), equação 5:

$$L_{DO1\%} = 0{,}01 * \frac{ESUN_\lambda*\cos(\theta_{SZ})*\tau_z}{\pi*d^2} \quad (5)$$

Existem muitas técnicas do método DOS (DOS1, DOS2, DOS3, DOS4) que são baseados em variações dos valores τ_v, τ_z e E_{down}, a mais simples e utilizada nesse trabalho é (MORAN ET AL. 1992; CHAVEZ 1996): τ_v = 1; τ_z = 1; E_{down} = 0

A reflectância é o passo inicial para a determinação de outros índices, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e o IAF (Índice de

Área Foliar). O NDVI é um indicador sensível da quantidade e condições da vegetação. Já o SAVI é similar ao NDVI, nele são incluídas constantes no numerador e denominador da fórmula do NDVI com a intenção de minimizar as influências do brilho do solo. O IAF é um indicador da biomassa (BRANDÃO et al., 2007; MOREIRA, 2000).

2.7. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) pode ser utilizado para estimar o sequestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese. Esse método determina o vigor da vegetação pela diferença normalizada entre o pico de reflectância no infravermelho próximo e a feição de absorção da luz na região do vermelho, utilizada na fotossíntese. Produz resultados em uma escala linear que varia entre 1 e -1, quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal, o 0 representa a ausência de vegetação (ROUSE et al. 1973; BAPTISTA 2003), equação 6.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \qquad (6)$$

Em que:

ρ_{NIR} é a reflectância no infravermelho próximo;

ρ_{RED}é a reflectância no vermelho.

2.8. Soil Ajusted Vegetation Index (SAVI)

O SAVI foi proposto por Huete (1988), possui a propriedade de minimizar os efeitos do solo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator L no numerador e denominador da equação do NDVI (equação 6). O fator L varia com a característica da reflectância do solo (calor e brilho) e vai variar dependendo da densidade da vegetação que se deseja analisar. Para vegetação muito baixa, é sugerido utilizar o fator L=1,0, para vegetação intermediaria L=0,5, para altas densidades L=0,25. Neste trabalho foi utilizado L= 0,5, equação 7.

$$SAVI = \frac{(1+L)*(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{L*(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \qquad (7)$$

2.9. Índice de área foliar (IAF)

A relação entre a área foliar de toda vegetação e a unidade de área de solo ocupada por essa vegetação é denominada de índice de área foliar (IAF). Como a fotossíntese depende da área foliar, a produtividade de uma cultura será tanto maior quanto mais próximo for do IAF máximo potencial de cada cultura. Nesse índice, os valores de biomassa verde se encontram em torno de dois ou três, por meio do IAF é possível calcular vários parâmetros como produtividade primária e produtividade primária líquida (TUKER, 1979; TUCKER; SELLERS, 1986). Segundo Allen et al. (2002) pode ser calculado pela equação 8.

$$IAF = \frac{\ln(\frac{0,69-SAVI}{0,59})}{0,91} \qquad (8)$$

2.10. Temperatura de brilho

A temperatura de brilho correspondente a radiância registrada pelo sensor do satélite, é calculada pela inversão da função de Planck. O cálculo é feito convertendo o ND para radiância no topo da atmosfera (Equação 1). A Equação 9 mostra como converter a radiância em Temperatura de brilho (TB):

$$TB = \frac{K2}{\ln(\frac{k1}{L_\lambda}+1)} \qquad (9)$$

Em que:

K1 e K2 são as constantes de calibração para a banda termal.

2.11. Emissividade

Qualquer objeto que não seja um verdadeiro corpo negro tem emissividade entre zero e um. Quando IAF > 3, ε = 0, 98. A Equação 10 é utilizada para valores de NDVI > 0, o que indica solo ou vegetação, caso contrário, água ou neve, considera-se ε = 0, 985. De acordo com Kramber et al. (2002), a emissividade (ε) de cada pixel na banda termal foi obtida em função do Índice de área foliar segundo a equação 10:

$$\varepsilon = 0,97 + 0,0033 * IAF \qquad (10)$$

2.12. Temperatura de Superfície

A temperatura da superfície (TS) da terra é um dos parâmetros chave na física da superfície da terra, resulta da interação da atmosfera com a superfície. A estimativa da temperatura de um corpo é feita utilizando as Leis de Kirchhoff e da Radiação de Planck. O sensoriamento remoto termal parte do pressuposto que todo corpo emite radiação e sua intensidade depende da temperatura da superfície, quanto maior a temperatura, maior a energia radiante (Lei de Stefan-Boltzmann).

A temperatura da superfície da água é estimada por sensores que detectam a radiação termal nos comprimentos de onda 3-5 e 8-14 mm emitida pela camada milimétrica da superfície da água (0,1 mm) (ALCÂNTARA et al., 2011). De acordo com Dinh et al. (2007), a emissividade pode ser utilizada para corrigir a temperatura de superfície (TS) conforme a equação 11.

$$TS = \frac{TB}{1+\left(\lambda+\frac{TB}{C_2}\right)*\ln(\varepsilon)} \qquad (11)$$

Em que:

TS é a temperatura em Kelvin;

λ = comprimento de onda da TB;

C_2 = h*c/σ (1, 4387752x10^{-2}mK) segunda constante de radiação;

h = 6, 626068x10^{-34} Js constante de Planck;

c = 2, 99792x10^{8}m/s velocidade da luz;

TB = temperatura de brilho;

A temperatura em Kelvin é convertida para Celsius (°C) conforme a equação 12 e validada com a temperatura do ar da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município de Catalão (GO).

$$TS = TS - 273 \qquad (12)$$

2.13. Produtividade Primária Líquida (PPL)

Nos últimos anos foram desenvolvidas pesquisas que combinam modelos ecológicos e sensoriamento remoto para investigar o impacto das atividades humanas no ciclo do carbono. Esses estudos resultaram em vários modelos que podem ser classificados em estatísticos, baseados em processos e no uso eficiente da luz (LUE) (RUIMY et al. 1994; XU et al. 2011,). O balanço de carbono consiste em vários processos que descrevem a troca de dióxido de carbono entre o ecossistema terrestre e a atmosfera. A produtividade primária bruta (PPB) é o total de carbono assimilado pela

vegetação, porém uma fração dele é perdida para a atmosfera pela respiração autotrófica (Ra). A produtividade primária líquida (PPL) é o balanço entre a PPB e a Ra (Equação 13) (RUNNING et al. 2004; IBRAHIM et al. 2006).

$$PPL = PPB - Ra \qquad (13)$$

Em que:

PPL é a produtividade primária líquida;

PPB produtividade primária bruta;

Ra respiração autotrófica.

Conforme Furumi et al. (2002) a Ra é dependente da temperatura do ar e da PPB como demonstrado na equação 14.

$$Ra = PPB * [(7, 825 + 1, 145 * T)/100] \qquad (14)$$

Em que:

T é a temperatura do ar (◦C).

Alguns estudos baseados em imagens de satélite utilizam a eficiência do uso da luz (LUE) para estimar a PPB (XIAO et al., 2004; BRANDÃO et al., 2007).

$$PPB = LUE * (FAPAR * PAR) \qquad (14)$$

Sendo que:

LUE = eficiência do uso da luz ($gCMJ^{-1}PAR$);

PAR = radiação fotossinteticamente ativa em um período de tempo; (MJm^{-2})

FAPAR = fração da PAR absorvida pelo dossel da vegetação.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é restrita a faixa 0,4 - 0,7 µm do espectro eletromagnético. É parte da fotossíntese, e seu valor deve ser aproximadamente 0,48 da radiação solar incidente (PRASAD et al., 2002; SIMS et al., 2005). FAPAR é a fração da PAR absorvida pelo dossel da vegetação. O uso eficiente da luz (LUE) na PPB é calculado pela relação empírica com dados meteorológicos (Equação 16). LUE é um valor que representa o potencial ótimo da vegetação para converter PAR em PPB (NICHOL et al., 2000).

$$LUE = 0, 8932 + (0, 0163 * Tm) + (0, 0015 * P_{anual}) - (0, 0022 * GDD) \qquad (15)$$

Em que:

Tm = temperatura média (◦C);

P_{anual} = total de chuva anual (mm);

GDD = graus-dia de desenvolvimento

GDD é derivada da diferença entre a temperatura média e a mínima. FAPAR pode ser estimado a partir do NDVI como descrito na Equação 17 (COOPS et al., 1998).

$$FAPAR = NDVI * 1,67 - 0,08 \qquad (17)$$

2.14. Fator de temperatura

O Fator de temperatura (Ft) é utilizado na estimativa da emissão do metano, é derivado da equação 18 proposta por Liu (1996).

$$Ft = \frac{F(TS)}{\overline{F(TS)}} \qquad (16)$$

Em que:

F(TS) é obtido a partir da equação 19:

$\overline{F(TS)}$ é a média de $F(TS)$;

$$F(TS) = \frac{e^{0,334*(TS-23)}}{1+e^{0,334*(TS-23)}} \qquad (17)$$

Em que:

TS é a temperatura em graus Celsius.

2.15. Fator de produtividade

O fator de produtividade pode ser calculado conforme a equação 20, proposta por Sheppard (1982). Nessa equação é utilizada a PPL (floresta tropical) porque assume-se que a produção de metano em uma floresta tropical é praticamente inalterada durante o ano, pois, tanto a temperatura quanto a chuva são relativamente constantes.

$$P = \frac{PPL}{PPL(floresta\ tropical)} \qquad (18)$$

Em que:

PPL é a produtividade primária líquida;

PPL(floresta tropical) é a constante de produtividade primária líquida de uma floresta

2.16. Estimativa de emissão de metano

A produção de metano em áreas alagadas depende da umidade do solo, tipo de vegetação, profundidade (altura da camada d'água) e a temperatura. A equação 21 foi adaptada dos trabalhos de Liu (1996), Agarwal e Garg (2007) e Akumu et al. (2010). O metano estimado é proveniente da vegetação submersa, não são calculadas outras fontes.

$$E_{CH4} = met_{obs} * Ft * P \qquad (19)$$

Em que:

E_{CH4} é a estimativa de emissão de metano;

Ft é o fator de temperatura;

met_{obs} é o valor de metano observado para um ambiente (classe) similar;

P é o fator de produtividade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Abril et al. (2005), os fluxos de CO2 e CH_4 tendem a ser altos logo após o enchimento do reservatório e diminuem com o tempo. Os principais processos responsáveis pela alta emissão de gases em reservatórios novos é a decomposição microbiológica da matéria orgânica inundada, que é composta por solo, serrapilheira, troncos e folhas. Há um período inicial de rápida decomposição da porção lábil do carbono, como as folhas das árvores, onde o fluxo de gases para a atmosfera é elevado. Quando a maior parcela da matéria orgânica lábil é completamente decomposta, segue-se um período de lenta decomposição da matéria orgânica refratária, como os galhos das árvores, que contém lignina que é de lenta degradação na água (LOUIS et al., 2000).

Estimar emissões de Gases de Efeito Estufa em reservatórios hidrelétricos tem sido um desafio para a comunidade científica, no sentido de produzir conhecimento com uma abordagem quantitativa justa para avaliação e proposição de alternativas para a mitigação de seus potenciais impactos. As contribuições da literatura sugerem que as emissões de CO2 e CH_4 variam (IHA, 2010):

- entre reservatórios (características da bacia de drenagem, morfologia, clima etc.);
- dentro do reservatório (ao longo de gradientes longitudinais entre os afluentes e a barragem);
- ao longo do tempo (com a idade do reservatório, sazonalidade e condições de operação).

Claramente, os trabalhos já publicados têm dado ênfase no sentido de garantir instrumentos para que as estimativas das emissões incorporem essas variabilidades.

Espera-se que após o enchimento do reservatório da UHE Serra do Facão haja um aumento nas emissões de CH_4 e CO_2 pela decomposição da biomassa inundada (pré-existente) e da biomassa gerada (organismos, microalgas). Os resultados gerados por este trabalho são do metano (CH_4) estimado no enchimento do lago da represa no período entre setembro de 2009 até abril de 2011.

Inicialmente foi estimado o metano no período de setembro/2009 a fevereiro/2010, que apresentou uma grande variabilidade ao longo do reservatório. De forma geral, os valores mais elevados foram registrados nas regiões distantes da calha do rio São Marcos (Figura 1). O valor mínimo calculado foi 17,22 Kg/Km^2/dia, o máximo 50,00 Kg/Km^2/dia e a média 28,67 Kg/Km^2/dia em uma área total de 53,29 Km^2.

Posteriormente foram calculadas as estimativas de emissão de metano para o mês de abril/2010, quando o reservatório atingiu seu nível mínimo (Figura 2). A estimativa foi feita em duas etapas, pois houve um aumento significativo do verdor da vegetação no período setembro/2009-abril/2010, então a vegetação alagada no período fevereiro/2010 até abril/2010 não continha a mesma quantidade de biomassa que em setembro/2009 (Figura 3). O aumento da biomassa, provavelmente, se deu devido ao período chuvoso e o aumento da temperatura que pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 4. O valor mínimo calculado no período fevereiro/2010 até abril/2010 foi 11,41 Kg/Km^2/dia, o máximo 54,44 Kg/Km^2/dia e a média 22,89 Kg/Km^2/dia em uma área total 32,47 Km^2.

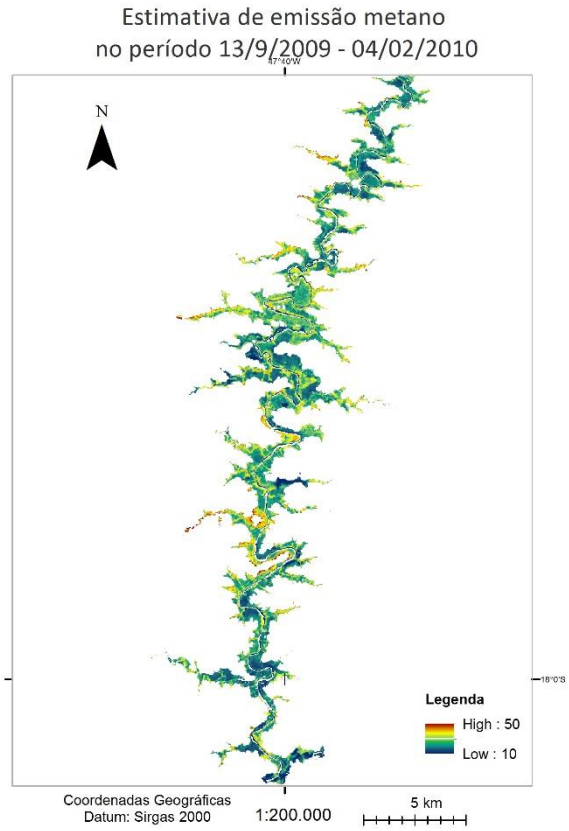

Figura 1 – Estimativa de área com emissão de metano no período set/2009 a fev/2010, reservatório da hidrelétrica Serra do Facão

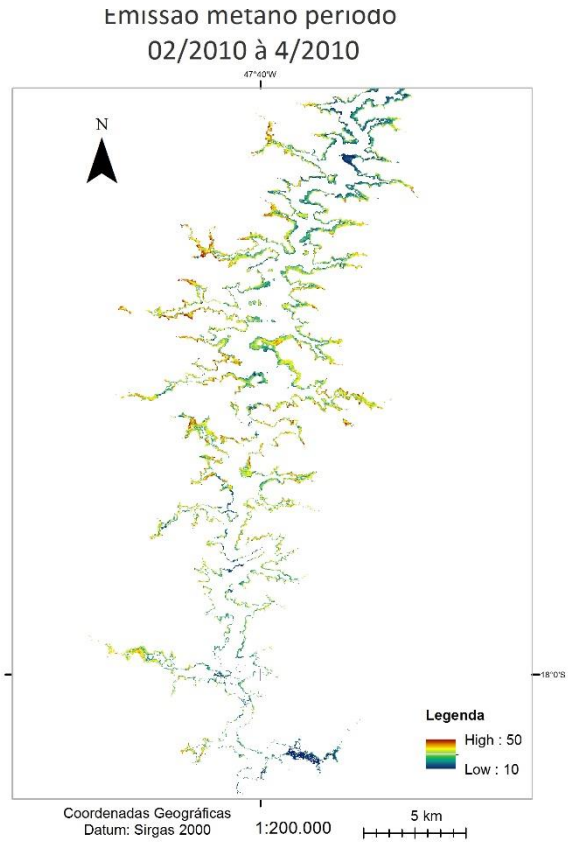

Figura 2 – Estimativa de área com emissão de metano no período fev/2010 a abr/2010, reservatório da hidrelétrica Serra do Facão

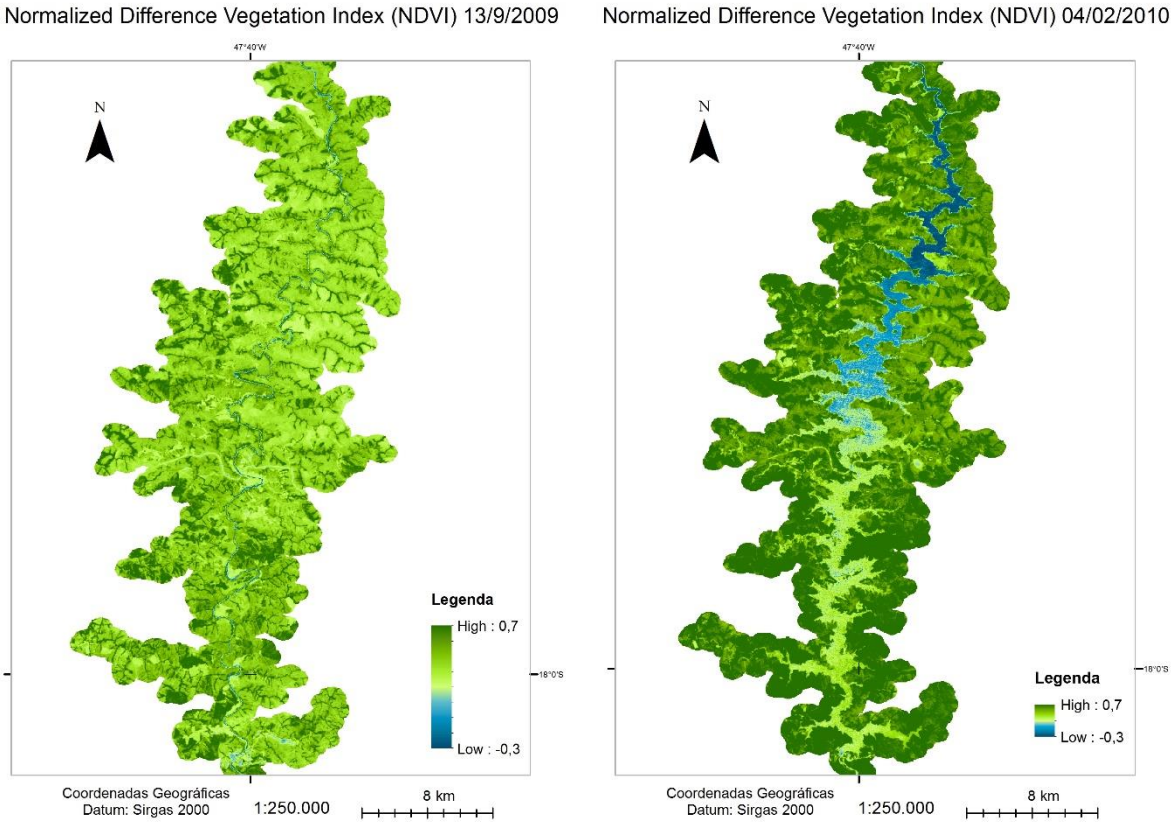

Figura 3 – NDVI da área de estudo em set/2009 e em fev/2010, reservatório da hidrelétrica Serra do Facão

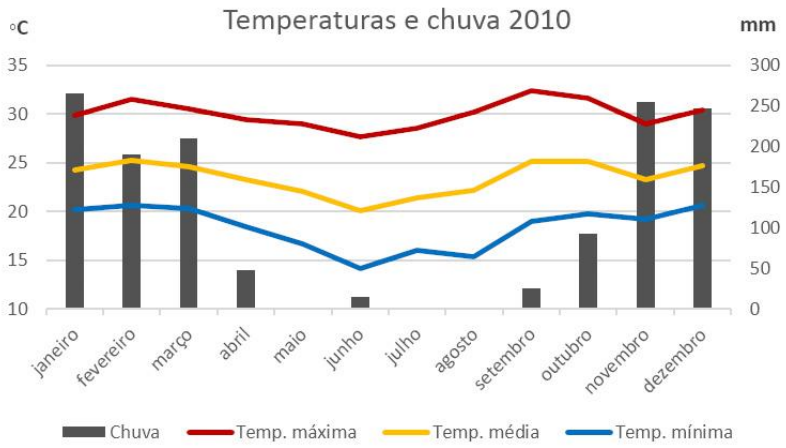

Figura 4 – Temperatura média e total de chuva acumulado mensal (2010), estação do INMET em Catalão (GO)

Em abril/2011 o reservatório atingiu seu nível máximo, a estimativa é do período abril/2010 - abril/2011 (Figura 5), quando a usina já se encontrava em operação. O valor mínimo calculado foi 2,38 Kg/Km^2/dia, o máximo 64,08 Kg/Km^2/dia e a média 36,95 Kg/Km^2/dia em uma área total 84,15 Km^2. A estação chuvosa nesse período (Figura 6) corroborou para o aumento das áreas com possibilidade de emissão de metano devido à expansão da área alagada.

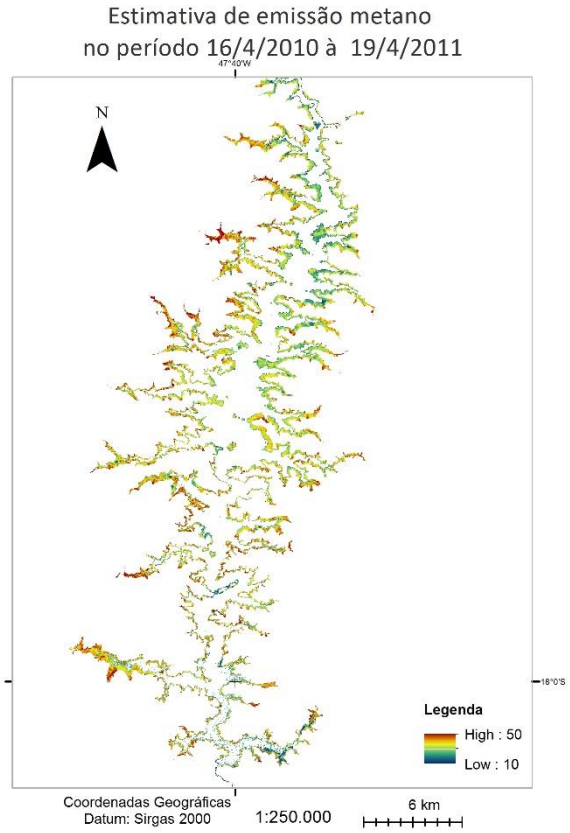

Figura 5 – Estimativa de área com emissão de metano no período abr/201 a abr/2011, reservatório da hidrelétrica Serra do Facão

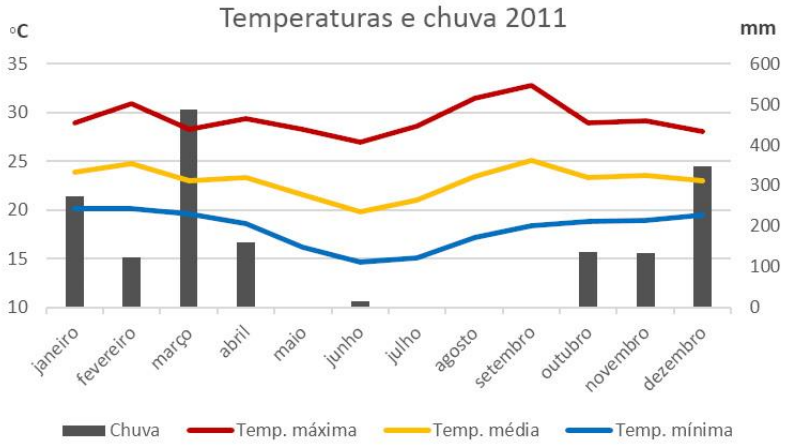

Figura 6 – Temperatura média e total de chuva acumulado mensal (2011), estação do INMET em Catalão (GO)

Os fluxos dos GEEs não são homogeneamente distribuídos ao longo do reservatório. Em ambientes heterogêneos a emissão de CH_4 sofre uma grande variação, seja na escala de metros ou em horas (BARTLETT; HARRISS, 1993). Esse fenômeno pode ser percebido nos mapas com as estimativas. Os maiores valores estimados para emissão de metano na área alagada foram identificados nos pontos onde a vegetação fotossinteticamente ativa apresentava valores mais elevados. Conclusão similar à de TEODURU et al. (2011), que identificaram um padrão heterogêneo de emissão relacionado à vegetação inundada em um reservatório canadense. A região próxima à

barragem apresentou valores menores, provavelmente por ser onde estava instalado o canteiro de obras.

O período entre setembro de 2009 e abril de 2011 contemplou a etapa de enchimento do reservatório, onde as estimativas de emissão de CH_4 foram referentes à vegetação inundada. Entre abril de 2010 e abril de 2011 aumentou a média de emissão, essas constatações podem ser vistas na Figura 7 em que as áreas que tendem ao laranja-avermelhado são maiores, isso pode ter ocorrido devido a regeneração natural da vegetação nas regiões mais afastadas da calha do rio.

O reservatório alcançou seu nível máximo em abril/2011, que apresentou o maior nível pluviométrico em relação aos mesmos meses anteriores. A média calculada de 36,95 Kg/Km^2/dia foi a maior estimativa de emissão de metano no período estudado. Os valores estimados de metano (Figura 7) se encontram dentro das faixas publicadas no Relatório de Referência do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)(ROSA et al., 2006) para reservatórios no cerrado (Figura 8).

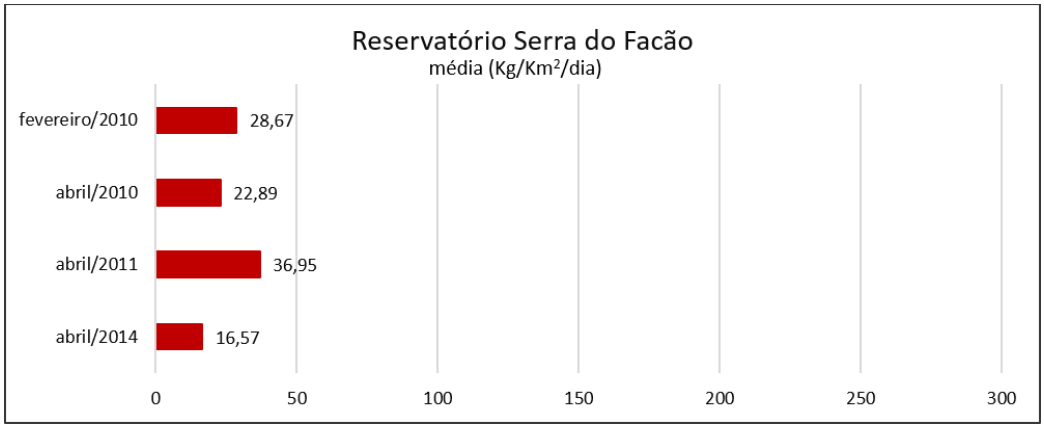

Figura 7 – Estimativa média de emissão diária de metano durante a fase de enchimento do reservatório Serra do Facão

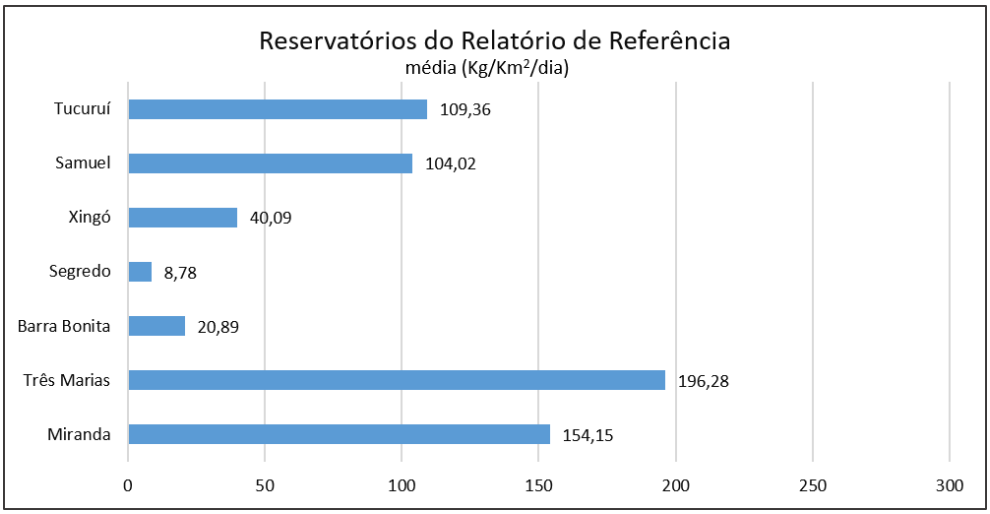

Figura 8 – Média da estimativa de emissão diária de metano nos reservatórios do relatório de referência do MCT.
Fonte: ROSA et al. (2006).

Os resultados apresentados anteriormente e as médias compiladas na **Figura 7** são provenientes de um método diferente dos utilizados na literatura consultada. A metodologia desses trabalhos comumente utiliza medidas in situ, em algumas campanhas e em poucos pontos, se comparado com a metodologia descrita neste trabalho.

Cada reservatório possui características próprias como localização geográfica, formato, tamanho, profundidade, idade, ocupação antrópica. Esses fatores tornam as comparações meramente ilustrativas. Comumente há grande emissão de gases nos primeiros anos de funcionamento de uma usina, a qual diminui com o passar do tempo, pois a matéria orgânica em decomposição decai ao longo dos anos.

A alta variabilidade da emissão de metano pode ser verificada na **Figura 9**, onde em um mesmo reservatório (Curua-Uná, Tucuruí e Miranda), em publicações em anos diferentes foram encontrados resultados com grande amplitude.

O que se espera é que as hidrelétricas construídas em áreas tropicais, como a Amazônica, sejam as que mais emitam gases de efeito estufa, devido às temperaturas mais elevadas e a vegetação abundante. Na **Figura 8** os valores mais elevados são de reservatórios localizados no Cerrado. Esses dados servem para a comprovar a alta variabilidade da emissão de metano.

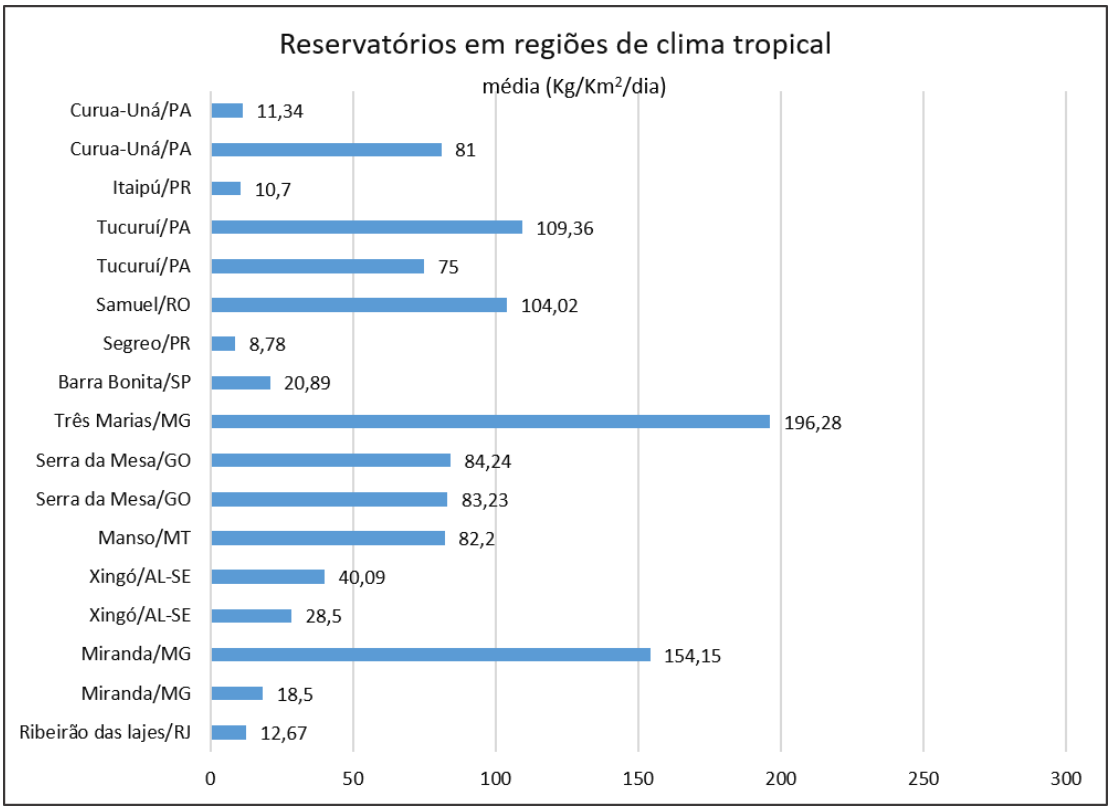

Figura 9 – Média da estimativa de emissão diária de metano em reservatórios tropicais. Fonte: Santos (2006).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia desenvolvida nesse trabalho pode ser utilizada na estimativa das emissões de metano, para extrapolar as medições ou simulações em reservatórios a serem construídos. Esse método é extremamente dependente da temperatura da superfície da água e da biomassa alagada.

O metano estimado é proveniente somente da vegetação submersa, outras fontes não foram consideradas. Dessa forma os responsáveis pela supressão da vegetação em áreas futuramente alagada podem utilizar essa metodologia para prever quais são as áreas prioritárias no desflorestamento.

A temperatura combinada com alta produtividade primária líquida foram os fatores que influenciaram na estimativa de emissão de metano nas áreas que estavam sendo alagadas. Os resultados obtidos neste trabalho, mostraram similaridade com resultados obtidos por outros pesquisadores, mesmo com métodos diferentes de obtenção dos dados. Os resultados aqui descritos corroboram para demonstrar que há alta variabilidade espacial e temporal na emissão de metano.

AGRADECIMENTOS
Agradeço a CAPES pela bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

ABRIL, G.; GUÉRIN, F.; RICHARD, S.; DELMAS, R.; GALY-LACAUX, C.; GOSSE, P.; TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; DOS SANTOS, M.; MATVIENKO, B. **Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (petit-saut,french guiana)**. Global Biogeochemical Cycle, v. 19, 2005.

AGARWAL, R.; GARG, J. K. **Knowledge based classifier for wetland features extraction using modis data: A case study on gujarat**. In: Sengupta, M.; Dalwani, R. (Ed.). Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake conference. Jaipur, India: [s.n.], 2007.

AKUMU, C. E.; PATHIRANA, S.; BABAN, S.; BUCHER, D. Modeling methane emission from wetlands in north-eastern new south wales, australia using landsat etm+. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1378–1399, 2010.

ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L.; LORENZETTI, J. A.; NOVO, E. M. L. DE M., Tecnologia espacial para o monitoramento da temperatura e fluxos de calor na superfície da água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (go). In: Alcântara, E. H.; Novo, E. M. L. de M.; Stech, J. L. (Ed.). **Novas tecnologias para o monitoramento e estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos**. [S.l.]: Parêntese. p. 15–80, 2011.

ALLEN, R. G., TREZZA, R., TASUMI M. **Surface energy balance algorithms for land**. Advance training and users manual, version 1.0, pp.98, 2002

BAPTISTA, G. M. D. M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. In: Epiphanio, J. C. N.; Fonseca, L. M. G. (Ed.). **Anais...** São José dos Campos: INPE. p. 1037–1044, 2003.

BARTLETT, K. B.; HARRISS, R. C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. **Chemosphere**, v. 26, p. 261 – 320, 1993.

BASTIAANSSEN, W. Sebal-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin, turkey. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 229, n. 1, p. 87–100, 2000.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. D. Uso do ndvi para determinação da biomassa na chapada do araripe. In: Epiphanio, J. C. N.; Galvão, L. S.; Fonseca, L. M. G. (Ed.). **Anais...** [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). p. 75–81, 2007.

CERQUEIRA, D. B. D.; FRANCA-ROCHA, W. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de co2 no bioma caatinga: estudo de caso em Rio de Contas - BA. In: Epiphanio, J. C. N.; Galvão, L. S.; Fonseca, L. M. G. (Ed.). **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). p. 2413–2419, 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat mss, tm, etm+, and eo-1 {ALI} sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893 – 903, 2009.

CHAVEZ, P. S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, [Falls Church, Va.] American Society of Photogrammetry., v. 62, n. 9, p. 1025–1035, 1996.

COOPS, N. C.; WARING, R. H.; LANDSBERG, J. J. Assessing forest productivity in australia and new zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 104, n. 1-3, p. 113–127, 1998.

COUNCIL, C. on Methods for E. G. G. E. N. R. **Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements**. The National Academies Press, 2010

DINH, H. T. M.; VAN, T. T. ET AL. Surface emissivity in determining land surface temperature. **International Journal of Geoinformatics**, v. 3, n. 4, 2007.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2015 - Ano base 2014: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2015.

FEARNSIDE, P. M. Hidrelétricas como fábricas de metano: O papel dos reservatórios em Áreas de floresta tropical na emissão de gases de efeito estufa. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 1, p. 100–115, 2008.

FURUMI, S.; MURAMATSU, K.; ONO, A.; FUJIWARA, N. Development of estimation model for net primary production by vegetation. **Advances in Space Research**, v. 30, n. 11, p. 2517 – 2522, 2002.

GALY-LACAUX, C.; DELMAS, R.; KOUADIO, J.; RICHARD, S.; GOSSE, P. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 13(2), p. 503–517, 1999.

GOODLAND, R. A. physiognomic analysis of the cerrado vegetation of central brazil. **Journal of Ecology**, v. 321, p. 769–771, 1971

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295 – 309, 1988.

IBRAHIM, A.; OKUDA, T.; FAIDI, M. ET AL. An analysis of spatial and temporal variation of net primary productivity over peninsular Malaysia using satellite data. **The Eco-Frontier Fellowship Fiscal Year 2006**, National Institute for Environmental Studies, Japan, p. 133– 146, 2006.

IHA. **GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs**. [S.l.], 2010.

JUNGES, A. H.; ALVES, G.; FONTANA, D. C. Estudo indicativo do comportamento do ndvi e evi em lavouras de cereais de inverno da região norte do estado do rio grande do sul, através de imagens MODIS. In: Epiphanio, J. C. N.; Galvão, L. S.; Fonseca L. M. G. (Ed.). **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). p. 241–248, 2007

KHORRAM, S.; CHESHIRE, H.; GERACI, A.; ROSA, G. L. Water quality mapping of augusta bay, italy from landsat tm data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, p. 803–808, 1991.

KRAMBER, W.; MORSE, A.; ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. **Surface Energy Balance Algorithms for Land**. [S.l.], 2002.

LIU, Y. **Modeling the Emissions of Nitrous Oxide (N_2O) and Methane (CH_4) from the Terrestrial Biosphere to the atmosphere**. Tese (Report 10) — Massachusetts Institute of Technology. Joint Program on the Science and Policy of Global Change, August, 1996.

LOUIS, V. L. S.; KELLY, C. A.; DUCHEMIN, E.; RUDD, J. W. M.; ROSENBERG, D. M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. **BioScience**, v. 50, p. 766–775, 2000.

MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; TEILLET, P. M. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 169–184, 1992.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2000. 181p. Dissertação (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000

NETO, R. T. de B; FILHO , M. B. B. B; LOPES, H. L; PACHECO, A. da P. Determinação de valores físicos de imagens TM/Landsat- 5 utilizando a linguagem legal para obter índices de vegetação. **Anais...** Recife, 2008

NICHOL, C. J.; HUEMMRICH, K. F.; BLACK, T.; JARVIS, P. G.;WALTHALL, C. L.; GRACE, J.; HALL, F. G. Remote sensing of photosynthetic-light-use efficiency of boreal forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, n. 23, p. 131 – 142, 2000.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppengeiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633– 1644, 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese. 2007.

PRASAD, V.; KANT, Y.; BADARINATH, K. Estimation of potential ghg emissions from net primary productivity of forests? a satellite based approach. **Advances in Space Research**, v. 29, n. 11, p. 1793 – 1798, , 2002.

RAHMAN, A.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyspectral indices from aviris imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. 24, p. 579–591, 2001.

ROSA, L. P.; SANTOS, M. A. D.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E. O. D.; SIKAR, E. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. **Climatic Change**, Springer, v. 66, n. 1, p. 9–21, 2004.

ROSA, L. P.; SIKAR, B. M.; SANTOS, M. A. DOS; SIKAR, E. M. emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros. Brasília. 2006.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In: **Third ERTS Symposium**. [S.l.]: NASA. v. 1, p. 309–317, , 1973.

RUDD, J. M.; HARRIS, R.; KELLY, C. A.; HECKY, R. E. Are hydroelectric reservoirs signifcant sources of greenhouse gases? **Ambio**, v. 22, p. 246–248, 1993.

RUIMY, A.; SAUGIER, B.; DEDIEU, G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union, v. 99, n. D3, p. 5263–5283, 1994.

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A. continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **BioScience**, Univ California Press, v. 54, n. 6, p. 547, 2004.

SANTOS, M. A. dos; ROSA, L.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E. dos; ROCHA, C. H.; SIKAR, E.; SILVA, M.; JUNIOR, A. M. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **Oecologia Australis**, v. 12, n. 1, 2008.

SEFAC. O Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatórios Artificiais. 2012

SHEPPARD, J.C.; WESTBERG, H.; HOPPER, J.F. Inventory of global methane sources and their production rates. J. **Geophys. Res**. 87, 1305-1312, 1982.

SILVA, M. A. O da; ANDRADE, A. C, de. Geração de Imagens de Reflectância no Topo da Atmosfera e na Superfície de um Ponto de Vista Geométrico. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2013.

SILVA, S. C. DA; SANTANA, N. M. P DE; PELEGRINI, J. C. **Caracterização Climática do Estado de Goiás** Goiânia, 2006.

SIMS, D.; RAHMAN, A.; CORDOVA, V.; BALDOCCHI, D.; FLANAGAN, L.; GOLDSTEIN, A.; HOLLINGER, D.; MISSON, L.; MONSON, R.; SCHMID, H. Midday values of gross co flux and light use efficiency during satellite overpasses can be used to directly estimate eight-day mean flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 1 – 12, 2005.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from landsat tm 5. **Remote Sensing of environment**, Elsevier, v. 90, n. 4, p. 434–440, 2004.

SOUZA, A. A.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R. Índices de vegetação derivados do sensor hyperion/eo-1 para estimativa de parâmetros biofísicos de fitofisionomias de cerrado. In: simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 14. (SBSR). **Anais...** São José dos Campos: INPE. p. 3095–3102, 2009.

TEODURU, C. R.; PRAIRE, Y. T.; DELGEORGIO, P. A. Spatial heterogeneity of surface co2 fluxes in a newly created eastmain-1 reservoir in northern quebec, canada. **Ecosystems**, v. 14, n. 1, p. 28–46, 2011.

TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; ROEHM, C.; GARNEAU, M. **Greenhouse Gas Emissions Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments**. New York: Springer. 732 p. (Environmental Science and Engineering). 2005.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127 – 150, 1979.

TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. Satellite remote sensing of primary productivity. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, p. 1395–1416, 1986.

XIAO, X.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; GOLTZ, M.; DAVIDSON, E. A.; ZHANG, Q.; MOORE, B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 519–534, 2004.

XU, X.; TAN, Y.; YANG, G.; LI, H.; SU, W. Impacts of china's three gorges dam project on net primary productivity in the reservoir area. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 409, n. 22, p. 4656–62, 2011.

Trabalho enviado em 08/06/2016
Trabalho aceito em 14/09/2016