UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Meteorologia
Graduação em Meteorologia

Trabalho de Conclusão de Curso

Impacto de alterações climáticas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul

Sandro dos Santos Pereira

Pelotas, 2014

Sandro Dos Santos Pereira

Impacto de alterações climáticas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientadora: Prof[a]. Dr[a]. Luciana Barros Pinto

Pelotas, 2014

Dados de catalogação na fonte:
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

P496i Pereira, Sandro dos Santos
Impacto de alterações climáticas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul / Sandro dos Santos Pereira. – 59f. ; il. – Trabalho de conclusão de curso (Meteorologia). Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Meteorologia. Pelotas, 2014. – Orientadora Luciana Barros Pinto.

1.Climatologia. 2.Mudanças climatológicas. 3.Vegetação. 4.Estresse térmico. 5.Fluxos. I.Pinto, Luciana Barros. II.Título.

CDD: 551.6098165

SANDRO DOS SANTOS PEREIRA

Impacto de alterações climáticas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 21 de maio de 2014.

Banca Examinadora:

Prof[a]. Dra. Luciana Barros Pinto (Orientadora). Doutora em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - MG.

Prof[a]. Dra. Cláudia Rejane Jacondino de Campos. Doutora em Física da Atmosfera pela Universite de Toulouse III – França.

Prof[a]. Dra. Graciela Redies Fischer. Doutora em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - MG.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela sua infinita misericórdia me permitir viver, aprender e realizar este trabalho.

Agradeço profundamente aos meus pais, que mesmo à distância estavam sempre presentes incentivando e apoiando durante todas as etapas desta empreitada.

Agradeço também à minha namorada, Ani Camila pelo carinho e assistência em minhas dificuldades.

Meu sincero agradecimento à minha orientadora, pela paciência e aos ricos ensinamentos transmitidos.

Sou grato à tutora da Universidade Federal de Viçosa (UFV) Lívia Cristina Pinto Dias, mesmo sem obrigação, ajudou mostrando-se sempre predisposta em continuar auxiliando.

Agradeço à banca, pelas sugestões e sabedoria compartilhada.

Assim, sou grato a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão de mais esta etapa na minha vida.

Resumo

PEREIRA, Sandro. **Impacto de alterações climáticas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul.** 2014. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

No Brasil há seis biomas terrestres com grande diversidade biológica. No contexto das mudanças climáticas informações sobre o comportamento dos biomas são necessárias, pois prestam serviços ambientais imprescindíveis à humanidade. Prever os impactos que essas mudanças podem desencadear possibilita a criação de estratégias de mitigação de danos a esses serviços. O presente estudo analisou os impactos causados pelo aumento da temperatura média mensal em três cenários (1,5°C; 2,5°C; 4°C) nos fluxos de carbono, água e energia, respectivamente representados por Indice de Área Foliar (IAF) e Produtividade Primária Líquida (PPL); evapotranspiração e quantidade de água no solo; calor latente e calor sensível na Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã, inserida no bioma Pampa. Para tal, foram utilizadas as saídas do modelo integrado IBIS (*Integrad Biosphere Simutator*) e selecionado o período de 2008 a 2010 como cenário atual de controle e os anos de 2028 a 2030 como cenário alterado. O comportamento da maioria das variáveis aqui estudadas esta coerente com esperado pela literatura, assim é projetada a diminuição de produção vegetal na APA do Ibirapuitã, podendo ocorrer déficit hídrico no verão, caso o aumento de temperatura não seja acompanhado pela intensificação da precipitação, trazendo riscos para o ecossistema**.**

Palavras-chave: Vegetação, estresse térmico, fluxos.

Abstract

PEREIRA, Sandro. **Impact of climate change on the Pampa biome of Rio Grande do Sul.** 2014. 60p. Final Examination (Graduation) – Faculty of Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

In Brazil there are six terrestrial biomes with high biodiversity. In the context of climate change information about the behavior of biomes are needed because providing essential ecosystem services to humanity. Predict the impact that these changes may trigger enables the creation of strategies to mitigate damage to such services. The present study analyzed the impacts caused by the increase of the average monthly temperature in three scenarios (1.5 ° C, 2.5 ° C, 4 ° C) fluxes of carbon, water and energy, respectively represented by Leaf Area Index (LAI) and Net Primary Productivity (NPP); amount of evapotranspiration and soil water; latent and sensible heat in the Environmental Protection Area (APA) Ibirapuitã, inserted in the Pampa biome. To this end, the outputs of the integrated model IBIS (Integrad Biosphere Simutator) and selected the period 2008-2010 as the current control scenario and the years 2028-2030 as amended scenario were used. The behavior of most of the variables studied here expected this consistent with the literature, so it is projected to decrease in crop production on APA Ibirapuitã, water deficit may occur in the summer if the temperature increase is not accompanied by increased precipitation, bringing risks to the ecosystem.

Keywords: vegetation, Thermal Stress, fluws.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa da distribuição nacional dos biomas. 16
Fonte: SILVA, 2010
Figura 2 - Imagem típica do Bioma Amazônia.....17
Fonte: WWF, 2014
Figura 3 - Imagem típica do Bioma Cerrado.....18
Fonte: WWF, 2014
Figura 4 - Imagem típica do Bioma Mata Atlântica.....19
Fonte: WWF, 2014
Figura 5 - Imagem típica do Bioma Caatinga. 19
Fonte: WIKIPEDIA, 2014
Figura 6 - Imagem típica do Bioma Pantanal. 20
Fonte: WWF, 2014
Figura 7 - Imagem típica do Bioma Pampa. 20
Fonte: PILLAR; VELÉZ, 2010
Figura 8 - Subgrupos de formação vegetal. 21
Fonte: VELOSO et al., 1991 (Adaptado)
Figura 9 - Ocorrência das formações vegetais na Campanha Gaúcha.....22
Fonte: VELOSO et al., 1991 (Adaptado)
Figura 10 - Esquema representativo dos principais cenários futuros de emissão de GEE, utilizados pelo IPCC (2007). 26
Fonte: DDC, 2014 (Adaptado)
Figura 11 - Esquema ilustrativo da evapotranspiração. 29
Fonte: SCW, 2014
Figura 12 - Balanço médio global de energia e radiação. 30
Fonte: DIMGMAN, 1994 (Adaptado)

Figura 13 - Localização da APA do Ibirapuitã. 33
Figura 14 - Representação da estrutura do IBIS. 34
Fonte: KUCHARIK et al., 2000 (Adaptado)
Figura 15 - Cenários isolados de aumento de temperatura média mensal (a) e reduções na precipitação anual (b) simulados no período de 40 anos.....35
Fonte: NOGUEIRA, 2011
Figura 16 - Cenários isolados de aumento de temperatura média mensal simulada no período de 40 anos. Simulações: a) controle, b) aumente de 1,5°C, c) aumento de 2,5ºC, d) aumento de 4ºC. 36
Figura 17 - Mapa do Estado do Rio Grande do Sul (laranja), onde a área demarcada em preto corresponde à localização dos pixels referentes à APA do Ibirapuitã.....37
Figura 18 - Taxa mensal média de PPL (NPP, kg.m-2.mês-1) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3. 39
Figura 19- Anomalia mensal de PPL (NPP, kg.m-2.mês-1), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).....40
Figura 20- Média mensal do IAF (LAI, $m^2.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.....41
Figura 21 - Anomalia mensal do IAF (LAI, $m^2.m^{-2}$), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO). 41
Figura 22 - Média mensal de evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3. 42
Figura 23 - Anomalia mensal de evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO). 43
Figura 24 - Média mensal da umidade no solo (fração) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3. 44
Figura 25 - Anomalia mensal da umidade no solo, entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO). 44
Figura 26 - Média mensal do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3. 45
Figura 27 - Anomalia mensal do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).....46
Figura 28 - Média mensal do fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3. 47

Figura 29 - Anomalia mensal do fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) dos cenários, entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).....47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Área de cada bioma e proporção em relação ao território nacional 17
Fonte: FLORESTAL, 2013.
Tabela 2 - Áreas de Proteção Ambiental no Estado do Rio Grande do Sul 25
Fonte: PRESERVAÇÃO, 2014
Tabela 3 - Principais cenários de emissão de GEE. 27
Fonte: IPCC, 2000.

Sumário

1 Introdução 14
2 Revisão de literatura 16
2.1 Biomas 16
2.2 Biomas Terrestres Brasileiros 17
2.2.1 Amazônia 17
2.2.2 Cerrado 18
2.2.3 Mata Atlântica 18
2.2.5 Pantanal 19
2.2.6 Pampa 20
2.3 Serviços Ambientais 24
2.5 Mudança Climática 25
2.5.1 Simulação de Cenários Futuros 26
2.5.2 Possíveis Impactos das Mudanças Climáticas no Ecossistema ... 27
2.6 Técnicas utilizadas no estudo de interação biosfera-atmosfera 30
3 Metodologia 32
3.1 Região de estudo 32
3.1.1 Área de proteção ambiental do Ibirapuitã 32
3.2 Descrição dos dados 33
3.2.1 Modelo IBIS 33
3.2.2 Cenários de simulação 35
3.3 Descrição do método 36
4 Resultados e Discussão 38
4.1 Fluxo de Carbono 38
4.1.1 Produção primaria líquida 38
4.1.2 Índice de área foliar 40
4.2 Fluxo de água 42

4.2.1 Evapotranspiração 42
4.2.2 Umidade no solo 43
4.3 Fluxo de energia 45
4.3.1 Fluxo de calor latente 45
4.3.2 Fluxo de calor sensível 46
5 Conclusão 48
Referências 49
Anexos 55

Lista de abreviaturas e siglas

APA - Áreas de Proteção Ambiental

GEE - Gases de Efeito Estufa

IAF - Índice de Área Foliar

IBIS - *Integrad Biosphere Simutator*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAI - *L*eaf Area Index

NPP - Net Primary Productivity

PPB - Produtividade Primária Bruta

PPL - Produtividade Primária Líquida

Introdução

O Brasil é um país conhecido por sua grande biodiversidade, uma das maiores do mundo, dividida, oficialmente, em seis diferentes biomas terrestres, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa. Mas uma das lacunas em relação ao funcionamento destes biomas surge frente a possíveis mudanças no clima, bem como, de estratégias de mitigação de seus impactos (FLORESTAL, 2013; TEIXEIRA, 2005; TRENTIN, 2011).

A fim de preservar áreas representativas de ecossistemas naturais e assegurar a manutenção dos serviços ambientais foram criadas as Unidades de Conservação, dentre elas esta as Áreas de Proteção Ambiental (APA). No estado do Rio Grande do Sul existem quatro APAs, três são representativas do bioma Pampa; a maior delas é a APA do Ibirabuitã, localizada na região sudoeste do Estado (SILVA, 2010; FLORESTAL, 2013; BRASIL, 2014; PRESERVAÇÃO, 2014).

Ao se falar em manutenção dos ecossistemas naturais, remete-se o pensamento aos impactos que possíveis mudanças no padrão climático global causariam aos serviços ecossistêmicos fornecidos por esses sistemas. Um dos pontos bastante discutidos é o impacto que a variação na concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE) causaria na temperatura global, e de como essas variações refletiriam dentro da vegetação global (TONELLO, 2007; NOGUEIRA, 2011; AMBRIZZI, 2013).

No sentido de obter um melhor entendimento sobre esses tipos de impactos, o *Intergovernmental Panel on Climate Change*.(IPCC) têm realizado simulações de clima futuro através de cenários de emissão de GEE e aerossóis definidos com base nas forçantes controladoras, tais como, demografia, desenvolvimento socioeconômico e tecnológico e suas interações (IPCC, 2007). No entanto, o impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas ainda é pouco conhecido, mas

há um consenso de que existe interferência no padrão espaço-temporal do fluxo de carbono entre a vegetação e a atmosfera, assim como no balanço de água e energia destes sistemas (SCHIMEL, 1995; FOLEY et al. ,1996; PIELKE et al., 1998; TONELLO, 2007; NOGUEIRA, 2011; ICMBIO, 2014)

Várias técnicas têm sido utilizadas para inferir essa relação entre o clima e a vegetação, embora, a maioria dos estudos se concentra em biomas como Amazônia e Cerrado. Dentre essas técnicas, a modelagem de sistemas ambientais, tem sido bastante discutida na literatura. Dentre esses modelos, o IBIS (*Integrad Biosphere Simutator)* tem sido utilizado com frequência por possuir plataformas integradas para simular a dinâmica da biosfera através de módulos interligados, os quais permitem simular processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo distintas (KUCHARIK et al., 2000).

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a sensibilidade dos fluxos de carbono, água e energia entre a vegetação e a atmosfera, no bioma Pampa. Isso será feito pela análise do comportamento padrão do bioma Pampa na região de estudo, com ênfase nos fluxos de carbono, água e energia, e perante aos cenários de alteração de temperatura, para com isso caracterizar as alterações no padrão da vegetação perante as mudanças climáticas.

Revisão de literatura

2.1 Biomas

No território brasileiro são caracterizados seis tipos de biomas terrestres: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa (Fig. 1). Eles dão ao país o diferencial de ter uma das maiores biodiversidades do mundo. A tab. 1 apresenta a área de cobertura de cada um desses biomas, assim como a proporção que ocupam do território brasileiro. A seguir, serão descritos, resumidamente, esses biomas.

Figura 1 - Mapa da distribuição nacional dos biomas.
Fonte: SILVA, 2010.

Tabela 1 **-** Área de cada bioma e proporção em relação ao território nacional

Biomas Terrestres	**Área Aproximada (km²)**	**Área/Total Brasil**
Amazônia	41969,43	49,29%
Cerrado	20364,48	23,92%
Mata Atlântica	11101,82	13,04%
Caatinga	8444,53	9,92%
Pampa	1769,46	2,07%
Pantanal	1503,55	1,176%
Área Total Brasil	85148,77	

Fonte: FLORESTAL, 2013.

2.2 Biomas Terrestres Brasileiros

2.2.1 Amazônia

O bioma Amazônia contém a maior biodiversidade, além de ter um terço das florestas tropicais do mundo; ocupa toda a região norte do Brasil (Fig. 2). Suas características são função do clima da região, que é quente e úmido com chuvas bem distribuídas durante o ano e rios com fluxo intenso, constituindo a bacia amazônica, a qual escoa 20% do volume de água doce do mundo. A vegetação é constituída de florestas de árvores altas, matas de várzeas e igapó (FERREIRA et al., 2005; IPAM, 2014; MMA, 2014).

Figura 2 - Imagem típica do Bioma Amazônia.
Fonte: WWF, 2014.

2.2.2 Cerrado

O Cerrado abrange todo o Brasil central e é o segundo maior bioma do país. Possui clima tropical quente subúmido, com uma estação seca e uma chuvosa bem definidas (Fig. 3). Há predomínio de formações de savana, planaltos e chapadas. Apresentando também, região mata ciliar e mata ribeirinha. (MMA, 2014, IBRAM, 2014; SANO et al., 2008).

Figura 3 - Imagem típica do Bioma Cerrado
Fonte: WWF, 2014.

2.2.3 Mata Atlântica

A Mata Atlântica é constituída por cadeias de montanhas, vales, planaltos e planícies de toda a faixa continental atlântica leste brasileira, também há ocorrência sobre o planalto meridional até o Rio Grande do Sul (Fig. 4). Ocupa totalmente o Espírito Santo, o Rio de Janeiro e Santa Catarina, 98% do Paraná e áreas de mais 11 Unidades da Federação. Seu principal tipo de vegetação é a floresta ombrófila densa, normalmente composta por árvores altas e relacionada a um clima quente e úmido (MMA, 2014; WWF, 2014).

Figura 4 - Imagem típica do Bioma Mata Atlântica.
Fonte: WWF, 2014.

2.2.4 Caatinga

O bioma Caatinga está presente no interior do nordeste brasileiro, desde a Bahia até o Maranhão. O clima semiárido, predominante na região, resulta numa vegetação de savana estépica, espinhosa e decidual (Fig. 5). Esse bioma está sujeito a dois períodos secos anuais: um de longo período de estiagem, seguido de chuvas intermitentes, e um de seca curta, seguido de chuvas torrenciais. Esta região é cortada por dois grandes rios caudalosos e perenes, o Parnaíba e o São Francisco, além de outros rios menores temporários (LEAL et al., 2003; MMA, 2014).

Figura 5 - Imagem típica do Bioma Caatinga.
Fonte: WIKIPEDIA, 2014.

2.2.5 Pantanal

O Pantanal cobre 25% do Mato Grosso do Sul e 7% do Mato Grosso, seus limites coincidem com os da Planície do Pantanal, mais conhecida como Pantanal

mato-grossense. Este bioma esta praticamente todo no Brasil, apenas uma pequena porção se estende pelo Paraguai e pela Bolívia. Devido ao solo pouco permeável, o Pantanal é caracterizado por inundações de longa duração, as quais ocorrem anualmente na planície, com cheias de outubro a abril, e seca no restante do ano. A vegetação predominante é a de savana com uma variedade de ambientes dominados pela água que sustenta uma fauna diversa de peixes de pequeno e de grande porte, aves e mamíferos (Fig. 6) (MMA, 2014; PANTANAL, 2013).

Figura 6 - Imagem típica do Bioma Pantanal.
Fonte: WWF, 2014.

2.2.6 Pampa

O Pampa do Brasil esta presente somente no Rio Grande do Sul, sendo que ocupa o total de 63% do território gaúcho, o restante se estende pelo Uruguai e pela Argentina. Adaptado ao clima mais frio, com temperaturas eventuais abaixo de zero, A vegetação predominante é de ervas e arbustos com algumas formações florestais do tipo ombrófila densa e estacional decidual (Fig. 7) (SILVA, 2010; MMA, 2014; WWF, 2014).

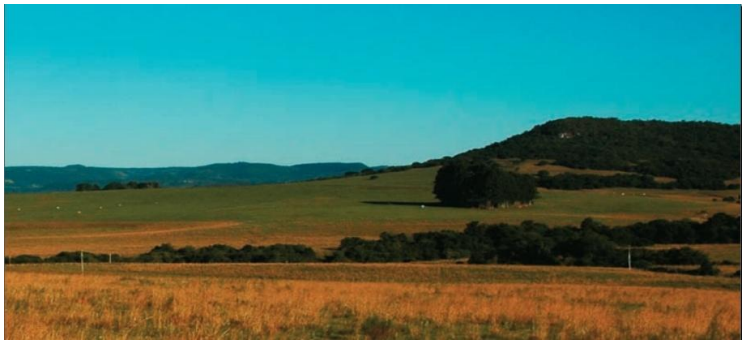

Figura 7 - Imagem típica do Bioma Pampa.
Fonte: PILLAR; VELÉZ, 2010.

O Pampa é o mais novo dos biomas, isso porque, só foi reconhecido oficialmente no ano de 2004 e, infelizmente, é um dos mais degradados do país (SILVA, 2010). As informações a respeito do impacto das mudanças climáticas sobre o seu funcionamento ainda são poucas, pois grandes partes dos estudos estão relacionados aos biomas Amazônia e Cerrado (SHUKIA et al., 1990; SIQUEIRA; PETERSON, 2003; NOGUEIRA, 2011). Por ser o objeto de estudo deste trabalho, a seguir será apresentada uma melhor descrição desse bioma.

2.2.6.1 Características da Vegetação do Bioma Pampa

A classificação universal da vegetação proposta por Veloso et al. (1991), para agrupar as formações vegetais brasileiras, informa que o Pampa se encaixa em três definições: Estepe, Campos Gerais e Campanha Gaúcha. Além disso, a vegetação também pode ser subdividida em outros três grupos: arborizada, parque e gramíneo-lenhosa (Fig. 8 e 9). A flora predominante é a gramínea lenhosa, sendo a florística da campanha gaúcha semelhante ao planalto meridional, principalmente pela intensa atuação do pastoreio juntamente com o uso do fogo. No entanto, se diferencia do planalto meridional pela não ocorrência da espécie *Araucaria angustifolia* (VELOSO et al., 1991).

Figura 8 - Subgrupos de formação vegetal.
Fonte: VELOSO et al., 1991 (Adaptado).

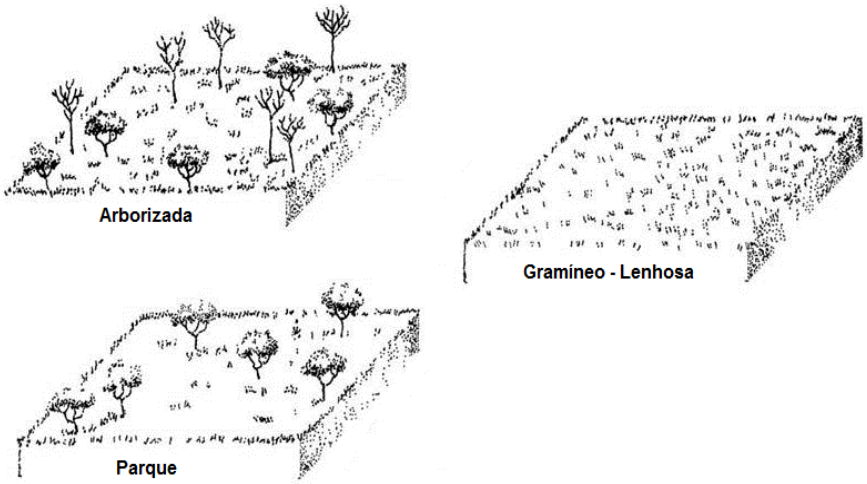

Figura 9 - Ocorrência das formações vegetais na Campanha Gaúcha.
Fonte: VELOSO et al., 1991 (Adaptado).

a) Estepe Arborizada

Subgrupo caracterizado pelo domínio de solos rasos litólicos, com afloramentos rochosos e medianamente profundos. As principais espécies arbóreas são: fanerófitas de menor estatura (micro e nano), pau-ferro, espinilho, aroeira-salsa, bugueiro, taleiro, branquilho, coronilha. Essas árvores aparecem de forma dispersa nos afloramentos rochosos e, também, ligadas às matas-de-galeria. As gramíneas e arbustos presentes podem ser divididos entre as espécies originais (macega, capim-canilha, capim barba-de-bode) e espécies invasoras (grama-forquilha, grama-tapete, vassouras, alecrim, caraguatá, chirca). Estas últimas ocorrem principalmente em função do uso do terreno pela agropecuária e a pela consequente degradação do solo (VELOSO et al., 1991).

b) Estepe Parque

Também chamado de campo sujo, este subgrupo caracteriza-se pela presença de espécies arbóreas bastante dispersas (sendo que as principais são o bugueiro, a aroeira-salsa e o pau-ferro). Esta fisionomia pode estar ligada à ação antrópica com a intenção de aumentar os campos para pastejo. No estrato gramíneo/arbustivo as espécies principais são as mesmas da formação estepe arborizada, mas com outras espécies, como a grama-forquilha, a grama-jesuíta e o

capim-flechinha, similar as estepes uruguaias e argentinas, que possuem estas últimas espécies como elementos nativos (VELOSO et al., 1991).

c) Estepe Gramíneo-lenhosa

Chamada também de campo limpo, esta formação tem como característica a coloração acinzentada nos períodos de inverno. Apresenta um estrato herbáceo com espécies adaptadas em ambientes relativamente secos, além da compactação superficial do solo, pela ação das queimadas e do pisoteamento do gado. Há, também, a ocorrência das matas-de-galeria, de baixo porte (VELOSO et al., 1991).

d) Fenologia

A fenologia é baseada nas observações de períodos de desenvolvimento da planta, como a germinação das sementes, a emergência das gemas, o desenvolvimento das folhas, a floração, a frutificação, o período de crescimento. Trentin (2011), utilizando sensoriamento remoto, constatou que a vegetação campestre possui comportamento sazonal bem definido, com período de crescimento nos meses quente do ano, ou seja, durante a primavera e verão. Também foi observado, que a resposta da vegetação à variação de temperatura ocorre com 30 dias de defasagem (TRENTIN, 2011).

e) Relevo e Clima

O relevo da região varia de plano a ondulado. O clima é dividido em dois, segundo a classificação de Köppen, o Cfa (clima temperado úmido com verão quente) e o Cfb (Clima temperado úmido com verão ameno). O regime de precipitação é bem distribuído ao longo do ano, tendo em média 1.500 mm anuais, sendo agosto o mês com menores índices e o de maiores, outubro. A umidade relativa média do ar é de 75%, em todos os meses. A temperatura média anual é de 18,6°C, variando entre 13,1°C em julho e 24°C em janeiro. A mínima absoluta registrada foi de -4,1°C e a máxima absoluta, 40,1°C (NIMER, 1989; BAKERS, 2012).

f) Estoque de Carbono no Solo

A estimativa de que existam estoques de carbono no solo do Rio Grande do Sul, a uma profundidade de 30 cm, foi levantada em um inventário que incluiu amostras de solo da década de 1960 a 1980. O total de estoque de carbono no solo na área, que compreende o bioma Pampa, foi de 1.0745,9 Tg (Tg = 10^{12}) com densidade de 6,8 kg C/m² (TONELLO, 2007; TORNQUIST et al., 2009; PILLAR et al., 2012).

2.3 Serviços Ambientais

As relações existentes nos biomas são importantes uma vez que prestam serviços ambientais à humanidade. Entre os benefícios, podemos citar: a regulação e manutenção da composição química da atmosfera; aproveitamento da energia solar e produção da biomassa; manutenção da diversidade biológica; armazenamento e reciclagem de nutrientes (ciclos biogeoquímicos); regulação do ciclo da água; manutenção da qualidade da água; prevenção e controle da erosão do solo e consequente deposição de sedimentos; atenuação de desastres naturais, e, por fim, a manutenção da beleza cênica (CORELL et al., 2002; TONELLO, 2007; SILVA, 2010).

No decorrer do tempo, alguns serviços ambientais foram comprometidos causando desequilíbrio nos ecossistemas em função da destruição de muitas áreas naturais, animais e plantas, os quais foram extintos ou correm riscos de serem, seja pela ação natural ou antrópica. Em decorrência destes fatores, é imprescindível que tais áreas sejam preservadas (PILLAR et al., 2009; ICMBIO, 2014)

2.4 Áreas de Proteção Ambiental

As Áreas de proteção ambiental (APAs) estão inseridas no grupo das unidades de conservação de uso sustentável, em geral possui uma área extensa, com certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a

sustentabilidade do uso dos recursos naturais. Há 271 APAs distribuídas pelo Brasil, quatro no estado do Rio Grande do Sul, três delas são representativas do bioma Pampa: APA do Ibirapuitã, APA Delta do Jacuí e APA Banhado Grande (Tab. 2) (ICMBIO, 2014; PRESERVAÇÃO, 2014; BRASIL, 2014; MMA, 2014).

Tabela 2 - Áreas de Proteção Ambiental no Estado do Rio Grande do Sul

Bioma	**Estância**	**APAs**	**Área (Ha)**	**Localização**
Pampa	Federal	APA do Ibirapuitã	316.882,75	Alegrete, Rosário do Sul, Sant'Ana do Livramento e Quaraí.
	Estadual	APA Delta do Jacuí	22.826,39	Porto Alegre, Canoas, Eldorado do Sul, Nova Santa Rita, Triunfo e Charqueadas.
	Estadual	APA Banhado Grande	136.935,00	Glorinha, Gravataí, Viamão e Santo Antônia da Patrulha.

Fonte: PRESERVAÇÃO, 2014.

2.5 Mudança Climática

O efeito estufa natural terrestre pode ser intensificado causando a elevação da temperatura pelo aumento da concentração de GEE, tais como, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor de água (H_2O). Essa intensificação é conhecida como aquecimento global. Este tem sido motivo de preocupação, pois suas consequências são: mudanças no clima; modificações nos padrões de chuvas, distribuição e frequência de extremos climáticos, derretimento das calotas polares, aumento do nível do mar, alteração da cobertura vegetal natural e impacto nos ecossistemas (NOBRE, 2001; IPCC, 2007).

Estudos realizados projetam um aumento médio global das temperaturas entre 1,8 e 4,0 ºC até 2100 (IPCC, 2007). O aumento pode ser ainda maior (6,4ºC) se a população e a economia continuarem crescendo rapidamente e se for mantido o consumo intenso dos combustíveis fósseis (IPCC, 2007).

Ambrizzi et al. (2013) aponta aquecimento da região Sul entre 1960-2002, identificando tendências positivas na temperatura máxima e mínima em níveis anual e sazonal. Sendo que a amplitude térmica apresenta tendências negativas fortes neste período, sugerindo que as tendências na temperatura mínima são mais intensas que as máximas (AMBRIZZI, 2013).

2.5.1 Simulação de Cenários Futuros

Na tentativa de buscar um entendimento sobre o papel das alterações climáticas, o IPCC tem simulado o clima futuro através de diferentes cenários de emissões de GEE, definidos com base nas forçantes controladoras, tais como, demografia, desenvolvimento socioeconômico, tecnológico e suas interações. Há quatro cenários principais: A1, A2, B1 e B2 que combinam dois conjuntos de tendências divergentes, um que varia entre fortes valores econômicos a forte valores ambientais e outro, entre crescente globalização a crescente regionalização (Fig. 10) (Tab. 3) (IPCC, 2000; IPCC 2007).

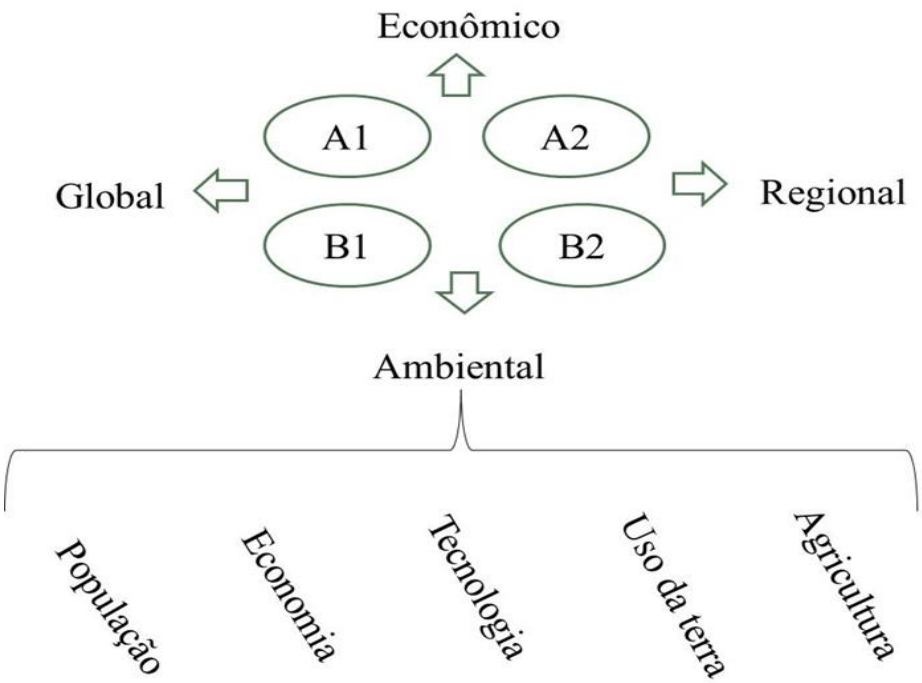

Figura 10 - Esquema representativo dos principais cenários futuros de emissão de GEE, utilizados pelo IPCC (2007).

Fonte: DDC, 2014 (Adaptado).

Tabela 3 - Principais cenários de emissão de GEE.

Cenário	Descrição
A1	Crescimento mundial econômico muito rápido, a população global atingindo um pico em meados do século 21 e declina em seguida. Há rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes.
A2	Heterogeneidade mundial, com aumento contínuo da população e o crescimento econômico orientado para a região que é mais fragmentada e mais lento do que em outros cenários.
B1	Mundo convergente com a mesma população global do A1, mas com mudanças rápidas nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informação, com reduções da intensidade material com introdução de tecnologias limpas e eficientes em termos de recursos.
B2	A ênfase mundial está em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, com população continuamente crescente inferior a A2 e com desenvolvimento econômico intermediário.

Fonte: IPCC, 2000.

2.5.2 Possíveis Impactos das Mudanças Climáticas no Ecossistema

Alguns estudos vêm mostrando que em cenários futuros o aquecimento e mudanças nos padrões de chuva representam uma ameaça para a biodiversidade regional e nacional. A mudança de clima pode afetar sensivelmente a composição e funções dos ecossistemas, afetando os fluxos de energia e matérias entre as diferentes espécies o que mudaria a distribuição geográfica de ecossistemas e animais. (MALCOLM; PITELKA, 2000).

O impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas ainda é pouco compreendido, no entanto, há o reconhecimento de que essa mudança modifique os padrões espaços-temporais do fluxo de carbono entre a vegetação e a atmosfera. Uma maneira de compreender o impacto é através dos fluxos de carbono, água e energia entre a vegetação e a atmosfera e os demais processos de *feedbacks* entre a biosfera e atmosfera. (MOUILLOT et al., 2002; WALTHER et al., 2002; CARDOSO et al., 2003; TURNER et al., 2003; ROOT et al., 2003; NEPSTAD et al., 2004).

Abaixo são caracterizados alguns dos principais fluxos estudados:

a. Fluxo de Carbono na vegetação

Nos biomas, a principal troca de carbono entre a terra e a atmosfera resulta da fotossíntese e da respiração, na qual o dióxido de carbono e a água são quimicamente convertidos em glicose e oxigênio com o auxílio da luz solar (E) (Eq. 1).

$$6CO_2 + 6H_2O + E = C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

O carbono pode ficar retido na biomassa ou ser liberado para a atmosfera, como caso seja queimado. As baixas temperaturas contribuem para o acúmulo de grandes quantidades de carbono no solo do Pampa, portanto, um aumento nas temperaturas, como previsto, levaria a um aumento nas taxas de decomposição, aumentando as emissões de CO_2 para a atmosfera. Porém, ainda não é possível prever se esse aumento nas emissões seria compensado por um aumento na produtividade primária líquida do sistema (AMBRIZZI et al., 2013).

b. Produção Primária Líquida

O comportamento do ecossistema pode ser avaliado pela Produtividade Primária Bruta (PPB ou GPP, do inglês Gross Primary Production), que corresponde ao total de matéria orgânica produzida pela vegetação durante um período numa determinada área. Descontando desse total, a quantidade de matéria orgânica consumida na respiração autotrófica (R), tem a Produtividade Primária Líquida (PPL ou NPP, do inglês Net Primary Production), que pode ser equacionado como:

$$PPL=PPB - R \qquad \text{(Eq. 2)}$$

c. Índice de Área Foliar

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) (WATSON, 1947). Através do IAF é possível modela o crescimento da vegetação dentro de um intervalo de tempo e identificar características fenológicas, O IAF aumenta em resposta a produção vegetal (GALVANI et al., 2000).

Mudanças interanuais na temperatura e precipitação podem influenciar diretamente o status da fenologia, como o período de crescimento e a taxa de acumulação de biomassa (LEE, 2012; ANDERSON et al., 2005)

d. Fluxo de Água

Os fluxos de água entre superfície e atmosfera permitem um entendimento importante do metabolismo fotossintético. Isso ocorre porque a transpiração das folhas é influenciada pela regulação dos estômatos.

A variabilidade no regime hídrico pode acarretar alterações nas taxas de crescimento arbóreo, uma vez que a precipitação é a maior fonte de umidade do solo e, consequentemente, a principal fonte de água para a vegetação. A deficiência de água no solo leva à diminuição gradual da fotossíntese pela maior resistência à fixação do carbono por causa do fechamento dos estômatos (VETTER; BOTOSSO, 1989; CLARK et al., 2004).

A evapotranspiração é definida como sendo o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e da vegetação úmida e por transpiração das plantas (Fig. 11). Constitui uma variável importante para avaliar as condições hídricas de uma determinada região, bem como, a vegetação nela existente (LEIVAS et al., 2006).

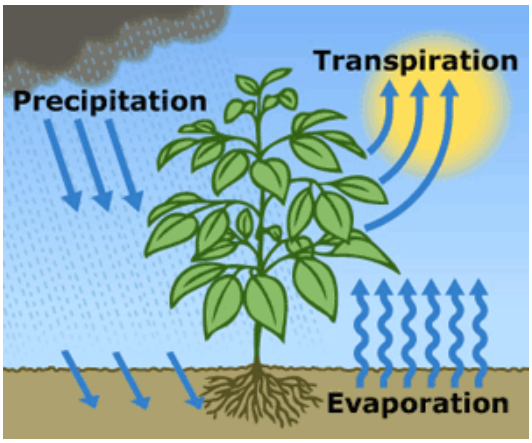

Figura 11 - Esquema ilustrativo da evapotranspiração.
Fonte: SCW, 2014.

e. Fluxo de Energia

A energia solar é absorvida pela terra e convertida em radiação de onda longa, provocando o aquecimento da superfície e do ar subjacente, gerando o fluxo de calor sensível (ar quente) e latente (vaporização) entre a superfície e a atmosfera (Fig. 12).

O fluxo de calor sensível é provocado pela convecção. A superfície aquecida aquece o ar atmosférico em contato direto fazendo-o ascender, gerando um fluxo de energia. Recebe esse nome pelo fato de estar relacionado com a temperatura do ar, que pode ser “sentida” (HORNBERGER et al., 1998).

O calor latente não está relacionado com a temperatura, portanto não pode ser “sentida”, mas sim, ao calor latente de vaporização. O fluxo de calor latente está associado ao fluxo de água da superfície para camadas mais altas da atmosfera. Ou seja, evapotranspiração (DINGMAN, 1994).

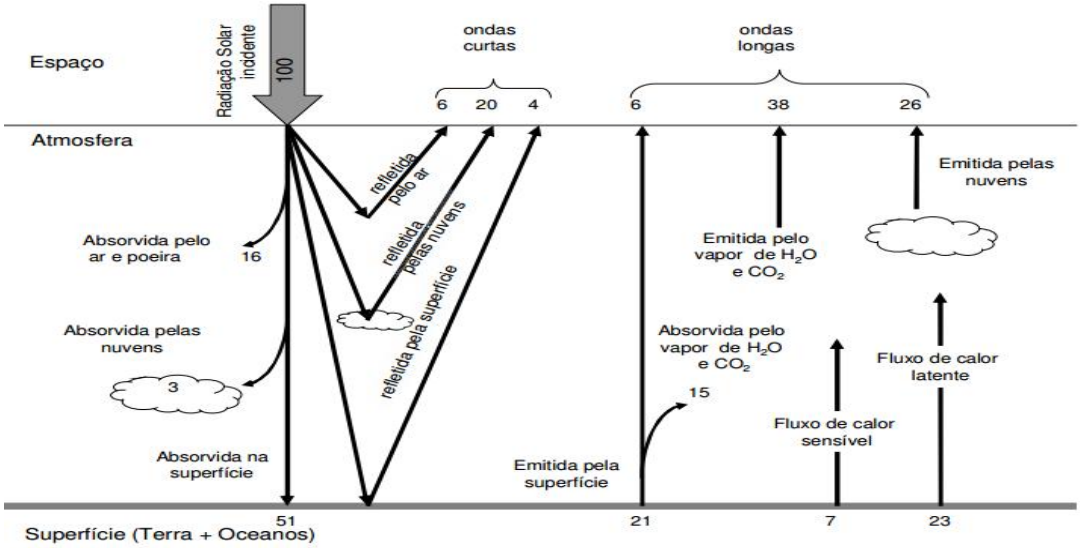

Figura 12 - Balanço médio global de energia e radiação.
Fonte: DIMGMAN, 1994 (Adaptado).

2.6 Técnicas utilizadas no estudo de interação biosfera-atmosfera

Os trabalhos desenvolvidos no nível dos ecossistemas têm sido realizados através de técnicas micrometeorológicas de *eddy covariance*, monitoramento de fluxos verticais (MALHI et al., 1998; ANDREAE et al., 2002; GRACE, 2004), por meio

de dados de parcelas permanentes (PHILLIPS et al., 1988) ou utilizando-se de modelos baseados em processos ou mecanicistas (FEARNSIDE; FERRAZ, 1993; COSTA; FOLEY, 2000; CLARK et al., 2004).

Os modelos de interação entre biosfera e atmosfera são apropriados para investigação de padrões de comportamento do sistema em relação ao ambiente (HULME, 2005), bem como, para melhorar a compreensão do mecanismo de resposta frente a condições de stress ambiental (TRUMBORE, 2006). Estudos utilizando esse tipo de ferramenta, torna-se importante para avaliar o comportamento do bioma Pampa sob influência de possíveis cenários de mudanças climáticas.

Metodologia

3.1 Região de estudo

Para uma representação característica da vegetação do bioma Pampa, o estudo foi realizado sobre APA do Ibirapuitã. Esse tipo de ecossistema é formado por um mosaico de áreas campestres, matas de galeria, areais, banhados (alagadiços), capões de mata nativa, cerros-testemunhos, serras, áreas de recarga e ou de descarga de aqüíferos subterrâneos, matas aluviais, rios e sangas, afloramentos rochosos, entre outras particularidades resultantes da combinação geológica, climática e vegetal presente neste bioma. Deste mosaico resulta a ocorrência de uma diversidade de espécies microbianas, vegetais e animais associados ao Pampa (SILVA, 2010).

3.1.1 Área de proteção ambiental do Ibirapuitã

A APA do Ibirapuitã foi criada no mês de maio do ano de 1992, através do decreto federal nº 529, localizada junto à fronteira internacional entre o Brasil e o Uruguai, a APA do Ibirapuitã tem seu limite na linha de divisa internacional. Abrange os municípios de Alegrete, Rosário do Sul, Quaraí e Sant'Ana do Livramento e a porção superior a Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã no Estado do Rio Grande do Sul (Fig. 13) (BRASIL, 2014).

A APA possui uma área de aproximadamente 318.000,75 hectares, formada por propriedades rurais privadas, escolas municipais rurais, Piquetes de Tradição Gaúcha, pequenos estabelecimentos comerciais, uma propriedade de pesquisa agropecuária (Fundação Maronna) e uma propriedade rural de treinamentos da Brigada Militar (Estância Lolita). Até o momento, é a única unidade de conservação

federal representativa do bioma Pampa (SILVA, 2010), já que as outras duas existentes são Estaduais (ICMBIO, 2014).

Figura 13 - Localização da APA do Ibirapuitã.
Fonte SILVA, 2010.

3.2 Descrição dos dados

Para analisar o comportamento do bioma Pampa frente a diferentes cenários de mudanças climáticas foram utilizadas as saídas do modelo de biosfera global IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*), geradas por Nogueira (2011). As simulações feitas pela autora estão descritas abaixo:

3.2.1 Modelo IBIS

Como descrito em Nogueira (2011), dentre os modelos integrados, o IBIS é bastante conhecido e utilizado. Este modelo possui plataformas integradas para simular a dinâmica da biosfera através de módulos interligados (Fig. 14), cujos processos estão organizados hierarquicamente e operam em diferentes intervalos de integração, o que permite um acoplamento de processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo distintas (KUCHARIK et. al., 2000).

Sua plataforma de superfície terrestre simula as trocas de massa, energia, água, carbono e momentum no sistema solo-vegetação-atmosfera. Assim, este

modelo geralmente é denominado de dinâmico da vegetação global, considerando as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação resposta às condições ambientais (DELIRE et al., 2003; FOLEY et al., 1996).

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos da versão 2.5 do IBIS, o qual é codificado em linguagem FORTRAN 90 e com um *time-step* temporal variando de 60 minutos a 1 ano. Os arquivos *input* e *output* estão na resolução de 0,5° x 0,5° (aproximadamente 50 km), escritos na linguagem NCL (*NCAR Command Language*) sob o formato netCDF em versão 3.3.

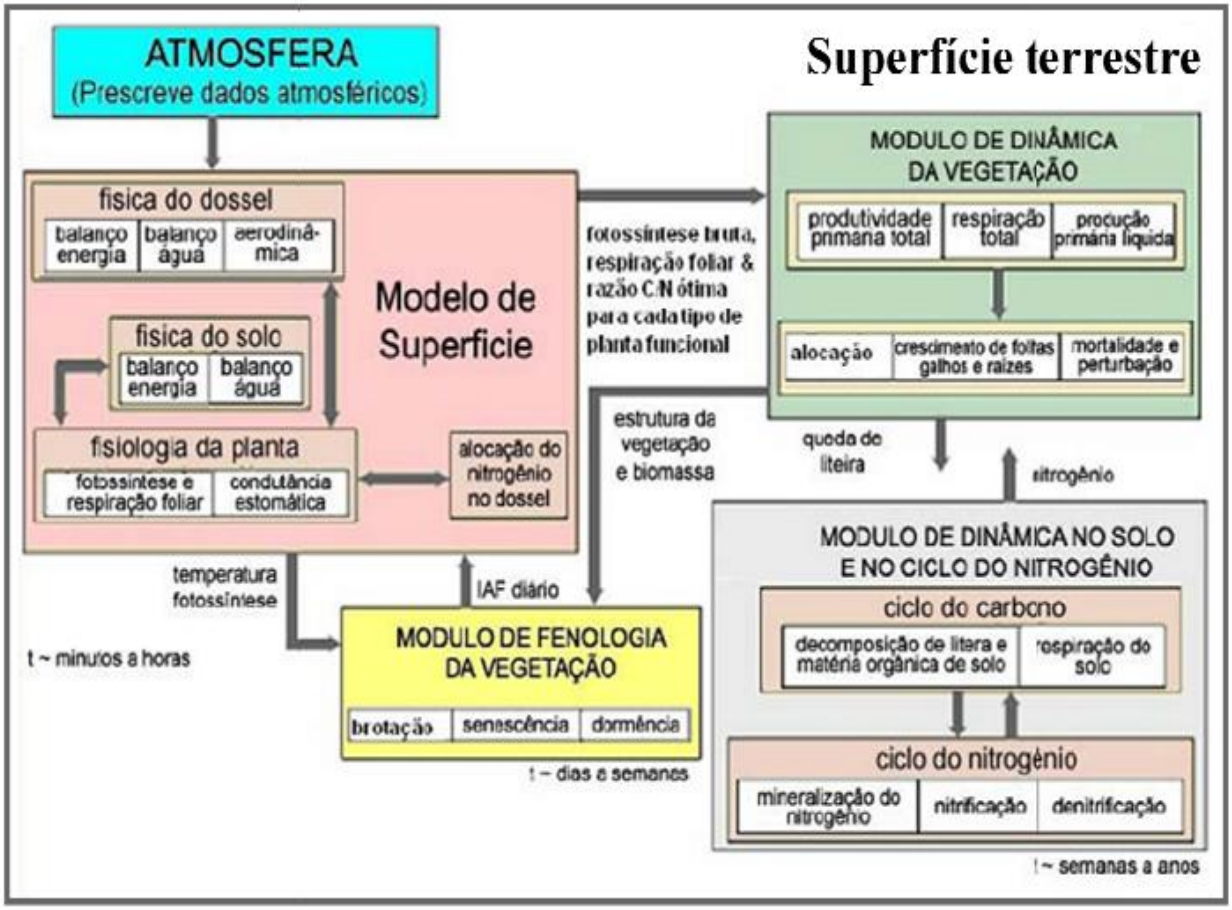

Figura 14 - Representação da estrutura do IBIS.
Fonte: KUCHARIK et al., 2000 (Adaptado).

Os dados de entrada (*input*) foram os arquivos responsáveis em fornecer as variáveis meteorológicas que alimentam o modelo (ver Anexo A). Já os dados de saída (*output*) (ver Anexo B e C) foram gerados pelo modelo e representados por diferentes variáveis.

3.2.2 Cenários de simulação

Nogueira (2011) para simular possíveis situações de mudanças climáticas, definidos com base nos cenários otimistas (A1) e pessimistas (B2) do relatório AR4 (*Fourth Assesment Report*) do IPCC de 2007, inseriu ao modelo dados de *input* de temperatura mensal e taxa de precipitação anual alterados por scripts específicos. Para os cenários alterados foram definidos três níveis (otimista, intermediário e pessimista) de aumento na temperatura média mensal (1,5°C; 2,5°C e 4°C) e redução na precipitação anual (15%, 25% e 35%), desenvolvidos isoladamente (Fig. 15 a e b, respectivamente), totalizando seis simulações de alterações. Permitindo assim descrever condições de estresse por aumentos de temperatura e reduções de precipitação, devido às mudanças climáticas.

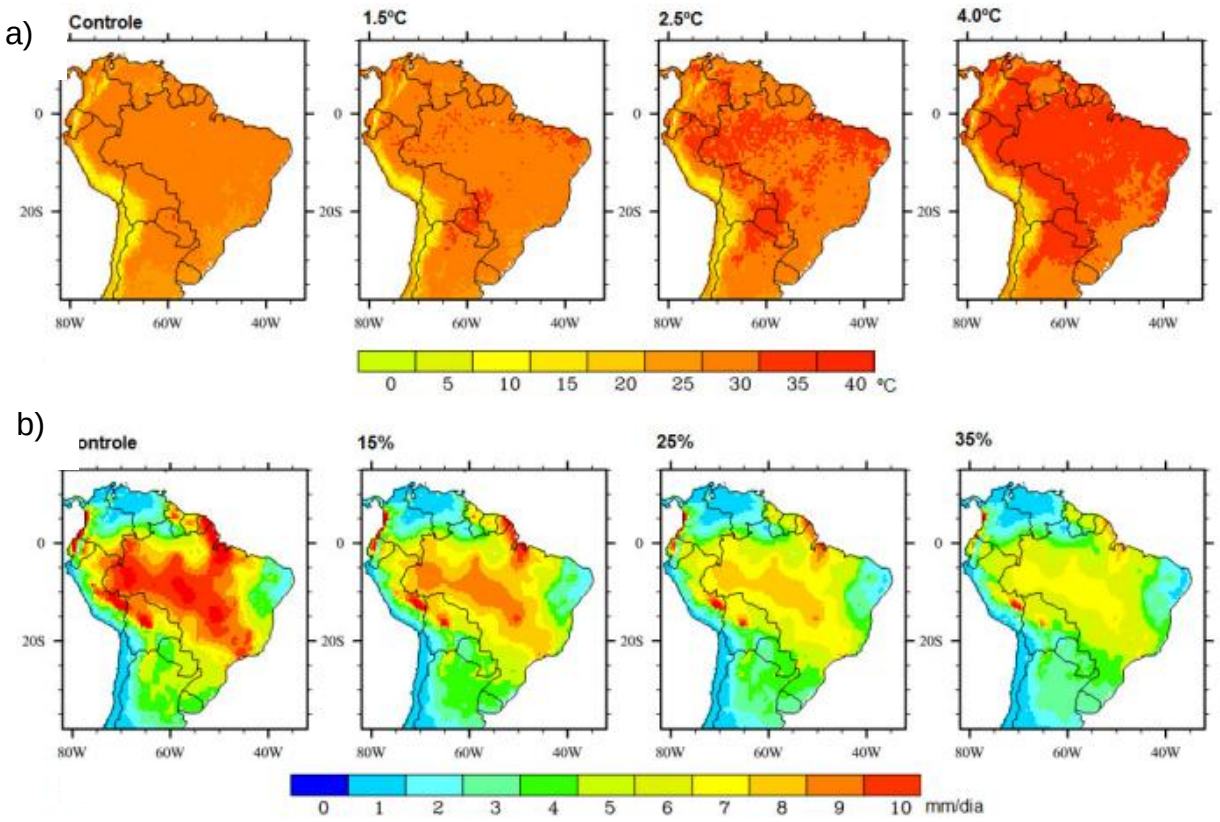

Figura 15 - Cenários isolados de aumento de temperatura média mensal (a) e reduções na precipitação anual (b) simulados no período de 40 anos.

Fonte: NOGUEIRA, 2011.

Neste trabalho foram utilizados apenas os cenários de aquecimento simulados por Nogueira (2011), pois, segundo o relatório do IPCC (2007), para a região sul da América do Sul, onde está localizada a área deste estudo, os cenários de mudanças climáticas indicam que mesmo com CO_2 elevado e maiores temperaturas, a precipitação na região não diminuiria, chegando até mesmo mostrar um aumento para o futuro.

3.3 Descrição do método

Para avaliar os impactos que as mudanças climáticas causariam no bioma Pampa primeiramente é necessário conhecer o seu padrão de funcionamento para, então, analisar a alteração. Assim, neste estudo foi selecionado o período de 2008 a 2010 como cenário atual de controle e, o período de 2028 a 2030, como cenário de influência das mudanças climáticas, porém, como dito anteriormente, apenas para os cenários de aumento da temperatura média mensal (1,5°C; 2,5°C; 4°C) (Fig. 16). Não houve calibração do modelo para região de estudo.

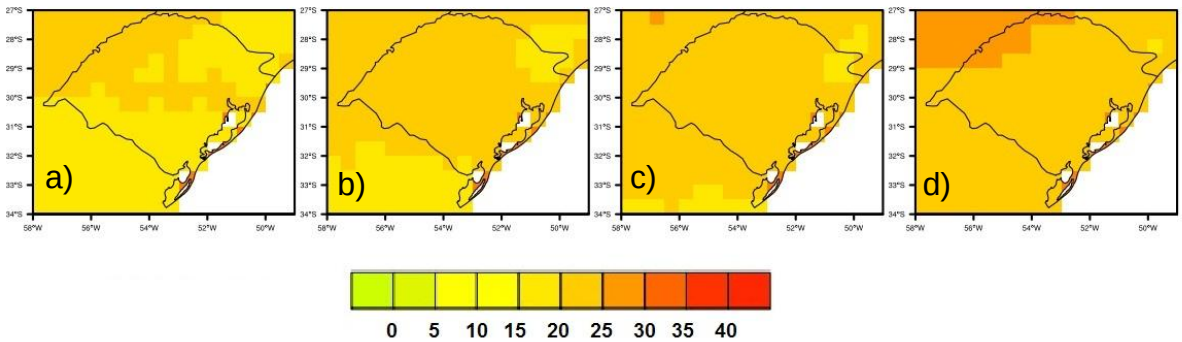

Figura 16 - Cenários isolados de aumento de temperatura média mensal simulada no período de 40 anos. Simulações: a) controle, b) aumente de 1,5°C, c) aumento de 2,5ºC, d) aumento de 4ºC.

Para a delimitação dos pixels representantes da área refrente á APA do Ibirapuitã, foram selecionados os pixels dentro dos seguinte limites: norte- 29,96°S, sul - 30,86°S, leste - 55°W e oeste - 55,35°W (BRASIL, 2014). Com auxilio do NCL foi possível selecionar os limites mais próximos disponíveis nos dados (29,75°S a 30,75°S e 55,25°W a 55,75°W) (Fig. 17), determinando assim, 6 pixels, que cobriam toda a área do APA do Ibirapuitã, que foram utilizados para o cálculo médio das variáveis de interesse.

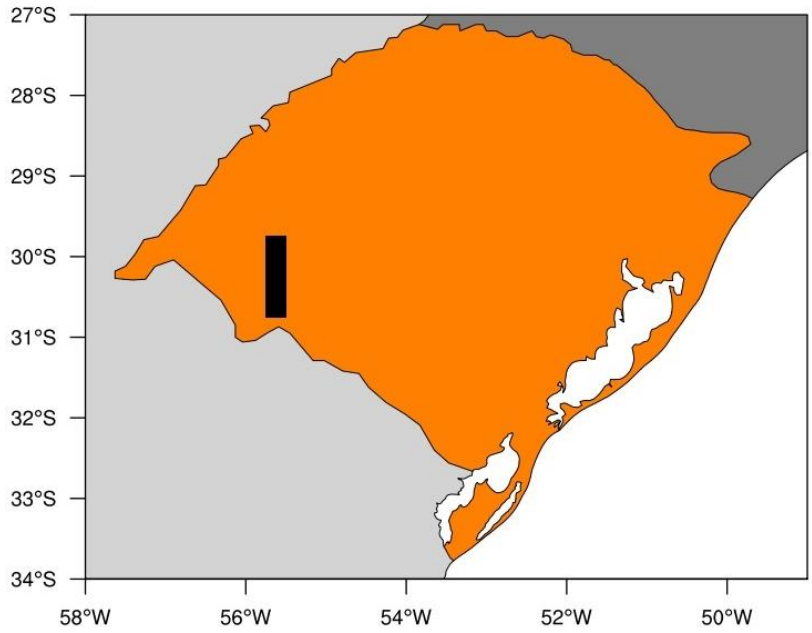

Figura 17 - Mapa do Estado do Rio Grande do Sul (laranja), onde a área demarcada em preto corresponde à localização dos pixels referentes à APA do Ibirapuitã.

Com base nos períodos selecionados como controle (2008 a 2010) e cenário de alteração (2028 a 2030), foram calculadas as médias dos 6 pixels para os dados referentes aos fluxos de carbono, água e energia, respectivamente representados por: IAF (LAI, $m^2.m^{-2}$) e PPL (NPP, $kg.m^{-2}.mês^{-1}$); evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$) e quantidade de água no solo (fração); calor latente ($W.m^{-2}$) e calor sensível ($W.m^{-2}$). Deste ponto em diante, a média do controle será nomeada de CO, e dos cenários de mudanças climáticas, com alteração de temperatura média do ar de 1,5°C, 2,5°C e 4°C, nomeados de CA1, CA2 e CA3, respectivamente.

Com base nas médias representativas da região de estudo, foi analisado o comportamento mensal das variáveis citadas acima, para o CO, e cada um dos cenários de aquecimento (CA1, CA2 e CA3). Por fim, foi calculada a diferença entre cada um dos cenários de aquecimento e o controle ($\Delta C = CAx - CO$, onde x=1, 2 ou 3). Assim, foi possível avaliar o comportamento de cada variável frente aos cenários de mudanças climáticas.

Resultados e Discussão

4.1 Fluxo de Carbono

4.1.1 Produção primaria líquida

A PPL apresentou médias maiores na estação quente (primavera e verão, de setembro a março) e menores na estação fria (outono e inverno, de abril a agosto) para o controle e em todos os cenários de aquecimento testados (Fig.18), evidenciando bem a vegetação do Pampa onde há o predomínio de vegetação C_4 com crescimento na estação quente (TRENTIN, 2011). Pode-se notar que do cenário CA1 para o CA3 (Fig. 18 b a d) houve um aumento gradativo no PPL dos meses frios. Neste novo padrão observa-se que o mês de outubro passaria a ter os maiores valores de PPL, aumentando assim a variação entre o mês com menor e maior PPL. E, os meses de janeiro a março, tem uma diminuição no PPL, atingindo valores menores aos dos meses frios (Fig. 18 d). Nos meses do período quente, a mudança climática sugerida, indicados nos CA1, CA2 e CA3, mostra uma menor PPL, (Fig. 18).

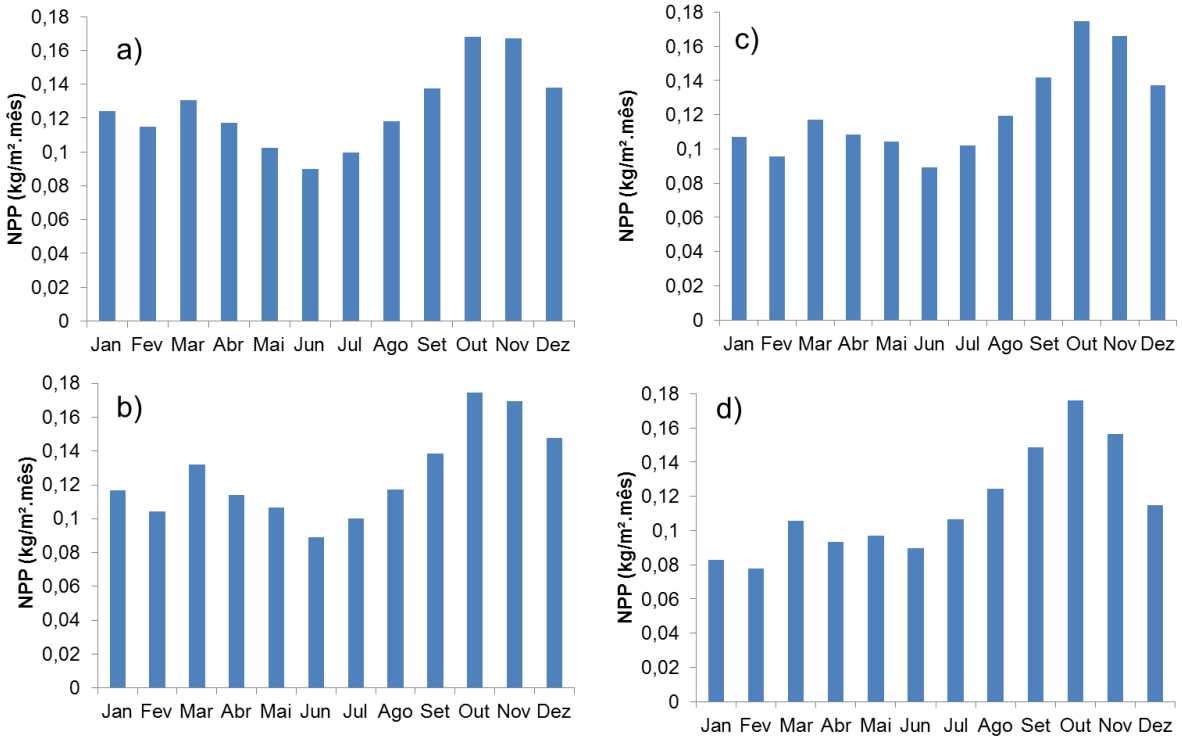

Figura 18 - Taxa mensal média de PPL (NPP, kg.m-2.mês-1) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

Pela anomalia entre os cenários e CO, pode-se observar que o comportamento é semelhante entre eles, com valores negativos nos meses de janeiro a maio e positivos de junho a outubro. Nos meses de novembro e dezembro, as anomalias foram positivas para CA1 e negativas para CA2 e CA3 (Fig. 19). A Fig. 18 está de acordo com o previsto pela literatura, pois segundo Machado (1999), o bioma Pampa possui predomínio de espécies com maior desenvolvimento na estação quente (primavera e verão). O estresse térmico em uma planta pode inibir o processo de fotossíntese e consequentemente a PPL, o que pode explicar o fato da PPL ter predominado abaixo da média de controle na estação quente, tornando-se menores ainda com o aumento da temperatura do cenário (Fig. 19).

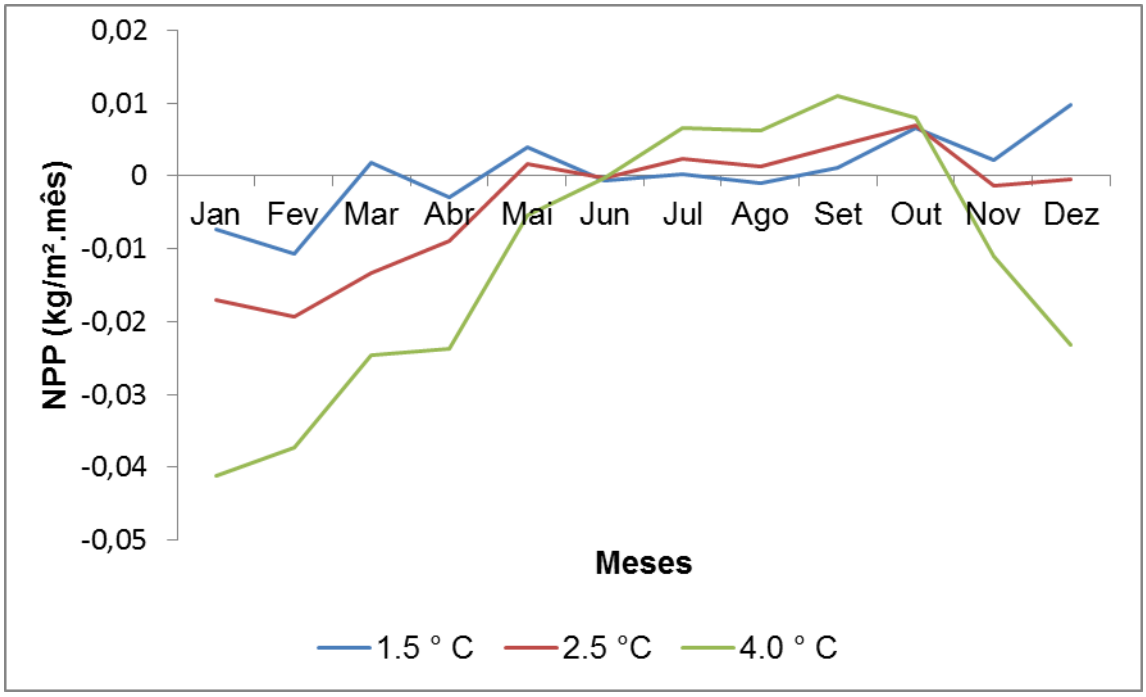

Figura 19- Anomalia mensal de PPL (NPP, kg.m-2.mês-1), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

4.1.2 Índice de área foliar

Não houve variação significativa do IAF nos cenários de mudança climática em comparação ao controle (Fig 20). Porém pelo gráfico de anomalia (Fig. 21) é possível notar uma pequena diminuição no IAF, resultando em médias menores para CA1, CA2 e CA3 que CO entre os meses de janeiro a abril, sendo mais intenso no CA3. O período de diminuição do IAF coincide com o maior período de diminuição de PPL como mostrado nas Fig. 19 e 21. Ou seja, uma menor PPL, diminui o crescimento da planta, diminuindo assim seu IAF.

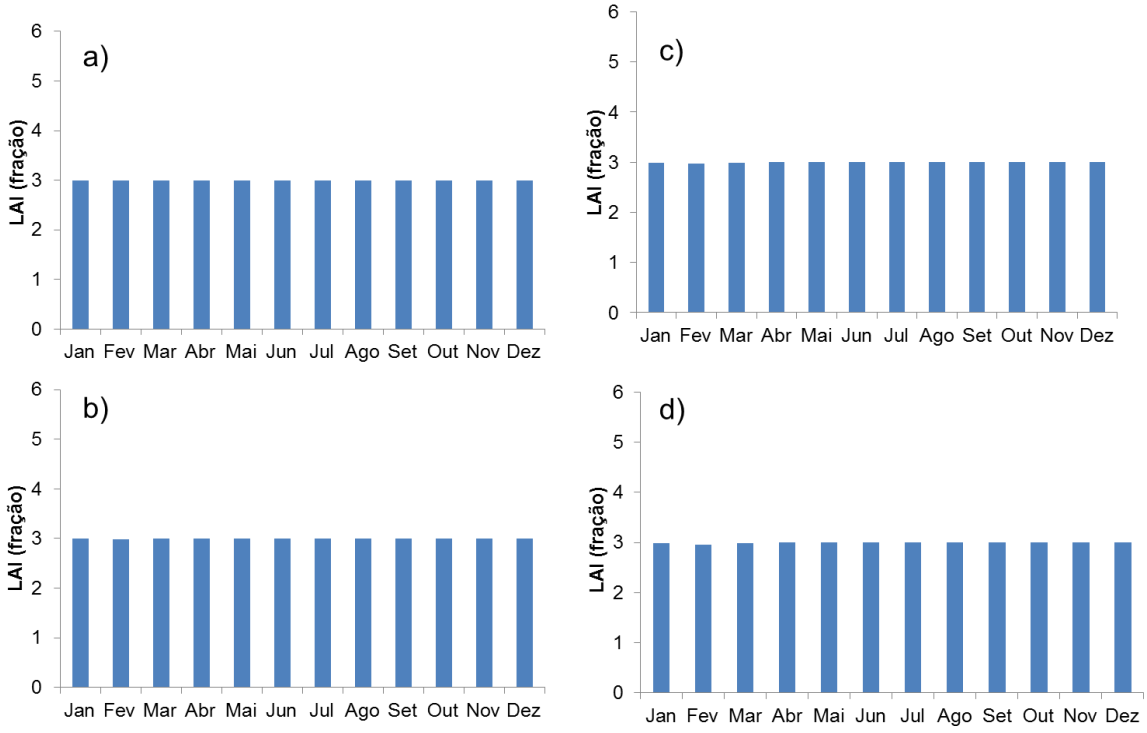

Figura 20- Média mensal do IAF (LAI, $m^2.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

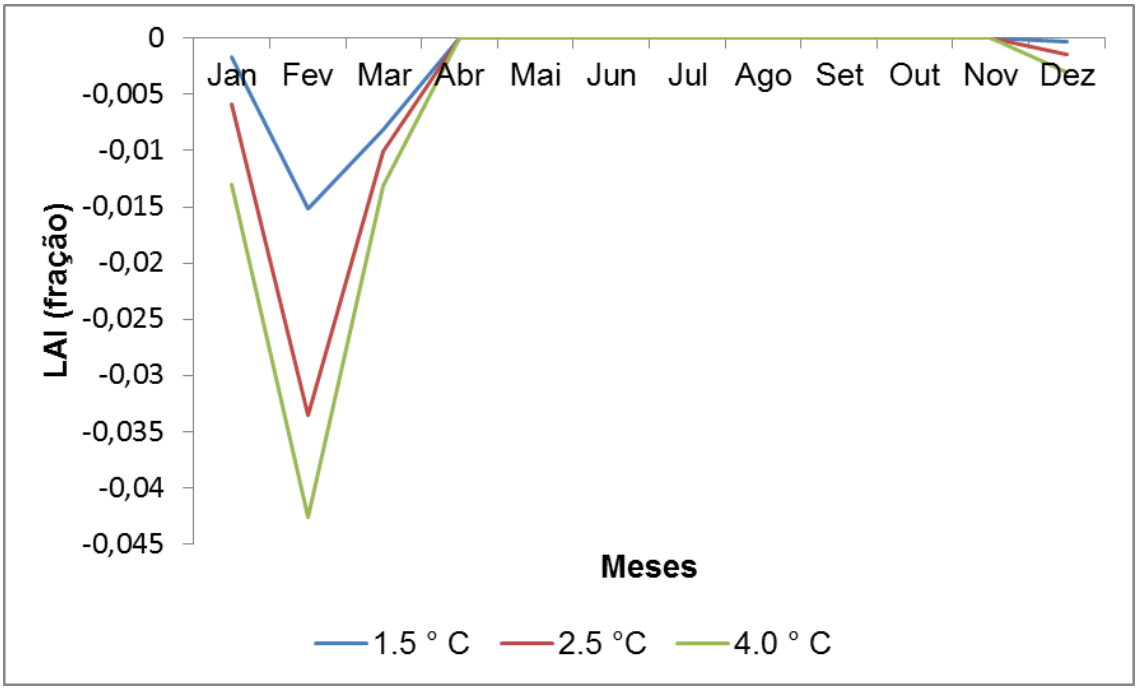

Figura 21 - Anomalia mensal do IAF (LAI, $m^2.m^{-2}$), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

4.2 Fluxo de água

4.2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração possui uma sazonalidade em todos os cenários (CO, CA1, CA2 E CA3), com valores mínimos no inverno e máximos no verão (Fig 22). No CA3 observa-se uma maior diminuição da evapotranspiração nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (Fig. 22 d).

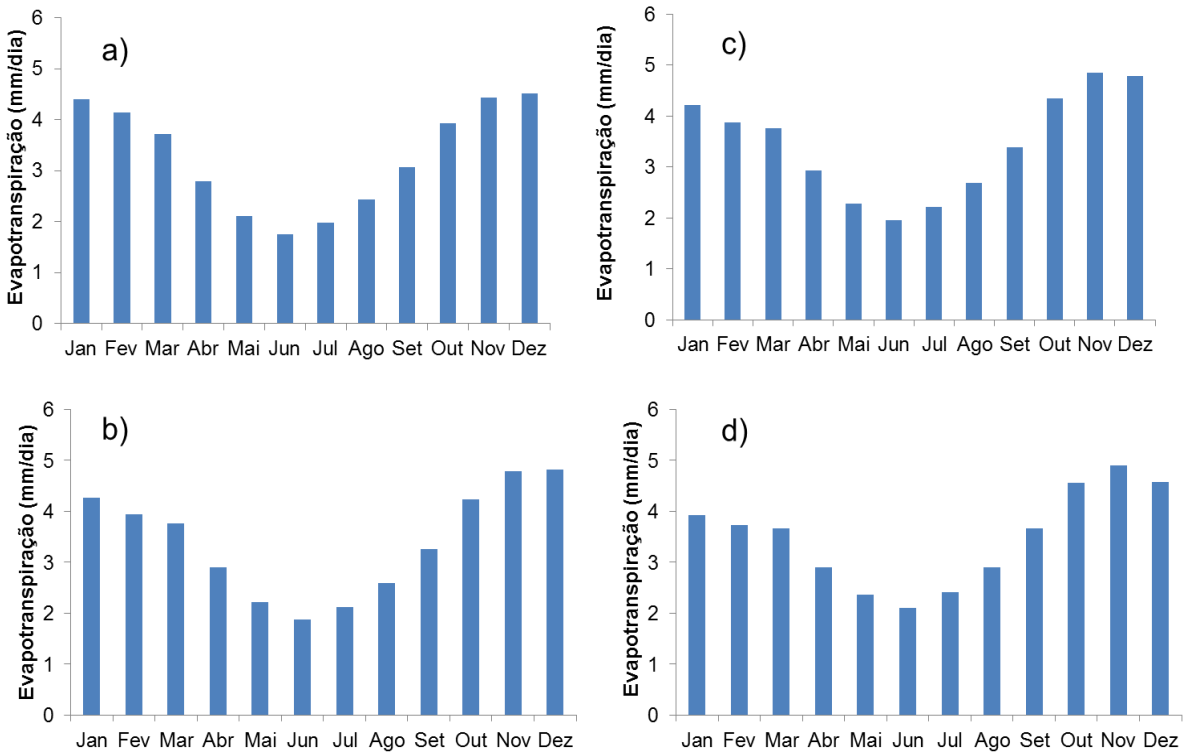

Figura 22 - Média mensal de evapotranspiração (mm.dia^{-1}) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

Através das anomalias de evapotranspiração (Fig. 23), percebe-se que de março a novembro a evapotranspiração é maior que o CO em todos os cenários (CA1, CA2 e CA3), Mas, a diferença entre os cenários de aquecimento aparece em relação ao período em que a evapotranspiração deveria ser maior. Nos meses de outubro a novembro, essa anomalia positiva começa a diminuir, em CA3 (outubro) e CA1 e CA2 (novembro). E, nos meses de janeiro a março, os desvios são negativos, e mais intensos no CA3 (Fig. 23). Era esperado que a evapotranspiração fosse maior com o aumento da temperatura do ar para todos os meses, porém na Fig. 22

é observada redução para os cenários CA1, CA2 e CA3 durante o verão. Uma das possíveis justificativa seria de que para esse período a precipitação pode não ter suprido a demanda da evapotranspiração.

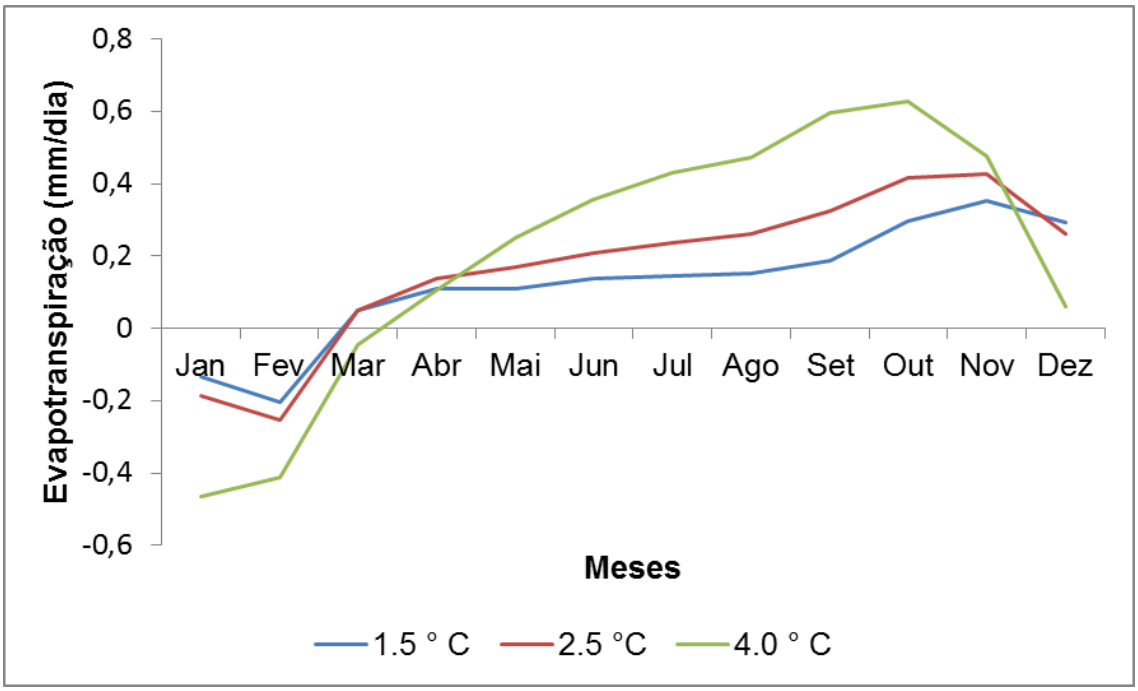

Figura 23 - Anomalia mensal de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

4.2.2 Umidade no solo

Os resultados indicam que a média mensal da umidade do solo possui pequena variação nos cenários CA1, CA2 e CA4, mantendo o mesmo padrão do CO. Menor umidade do solo no verão e maior no inverno (Fig. 24). Como esperado a umidade do solo tende a diminuir à medida que a temperatura do cenário aumenta, ficando abaixo da média de CO (Fig. 25). O comportamento da evapotranspiração (Fig. 22) está coerente com a umidade do solo, pois quando é maior coincide com o período de menor disponibilidade hídrica.

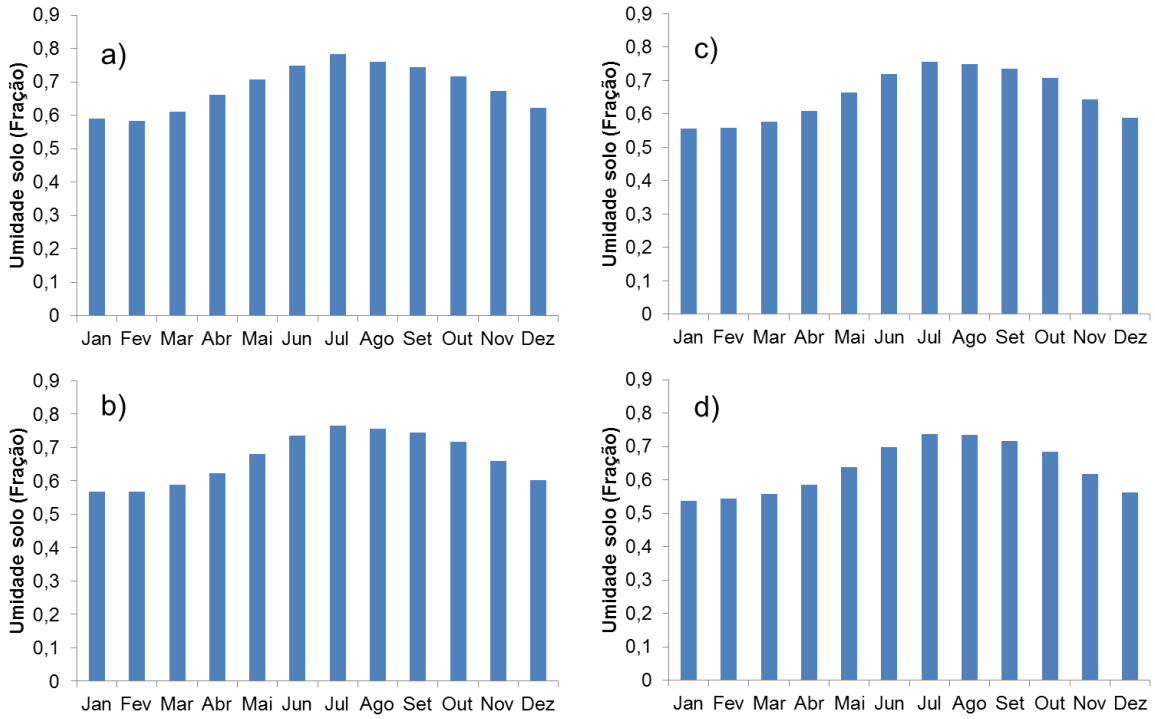

Figura 24 - Média mensal da umidade no solo (fração) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

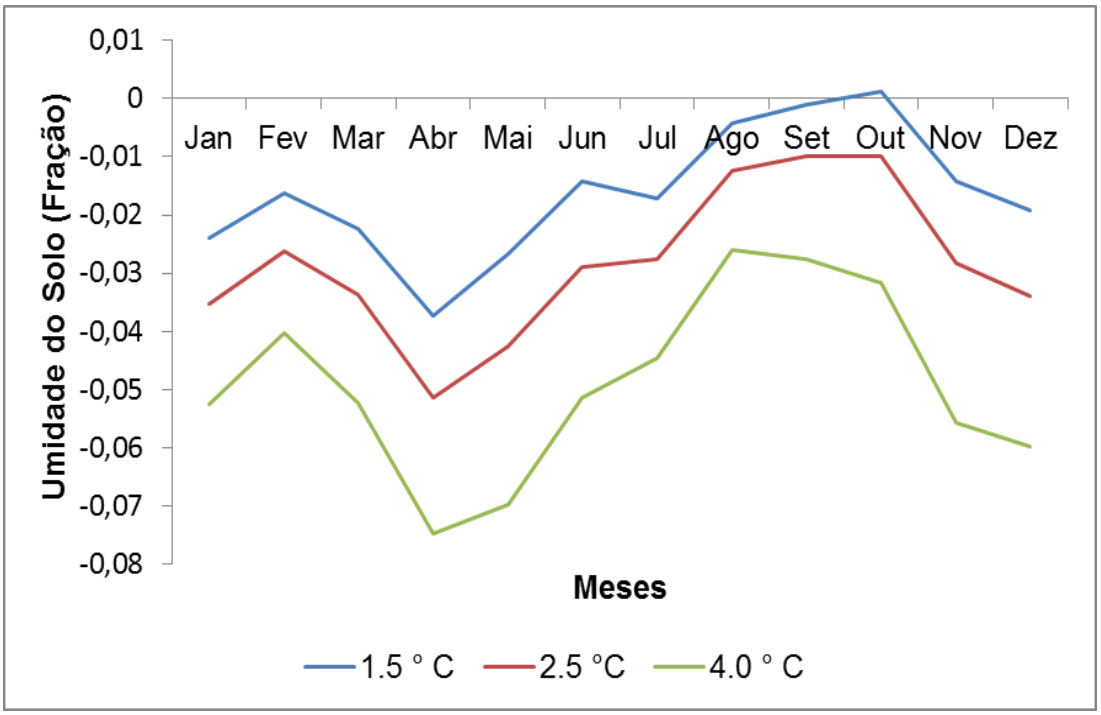

Figura 25 - Anomalia mensal da umidade no solo, entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

4.3 Fluxo de energia

4.3.1 Fluxo de calor latente

A Fig. 26 indica uma sazonalidade para CO, CA1, CA2 e CA3, maiores fluxo de calor latente nos meses com temperaturas médias mais altas e menores nas temperaturas médias mais baixas. No decorrer do ano as médias mensais de fluxo de calor latente para todos os cenários tende a diminuir no verão chegando a valores abaixo da média de controle, sendo a diminuição menos intensa para CA1 e mais intensa para CA3. Neste período as precipitações são menos intensas (NIMER, 1999), reforçando a hipótese de déficit hídrico. Já entre o outono até a primavera o fluxo de calor latente aumenta ocorrendo a intensificação com o agravamento do cenário, talvez pela maior disponibilidade hídrica, menor para CA1 e maior para CA3.

Como previsto, o fluxo de calor latente possui mesmo padrão sazonal da evapotranspiração (Fig. 22 e 26). O fluxo de calor latente esta associado à vaporização, assim também há semelhança entre os gráficos de anomalia de calor latente e evapotranspiração (Fig. 23 e 27).

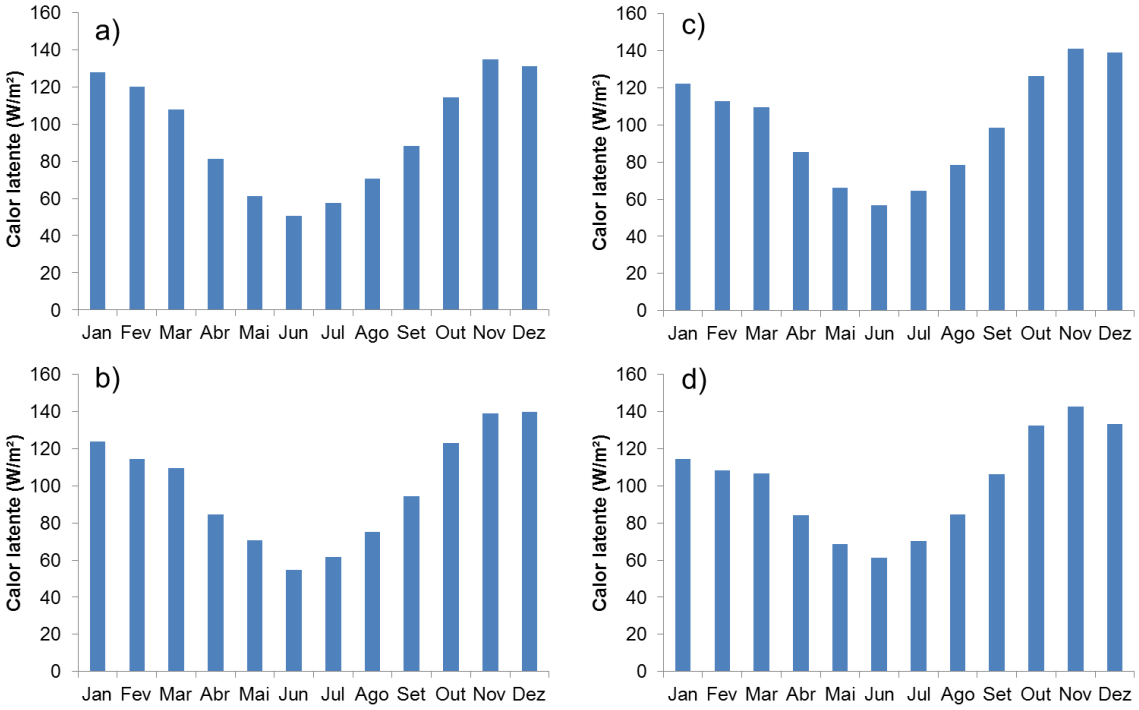

Figura 26 - Média mensal do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

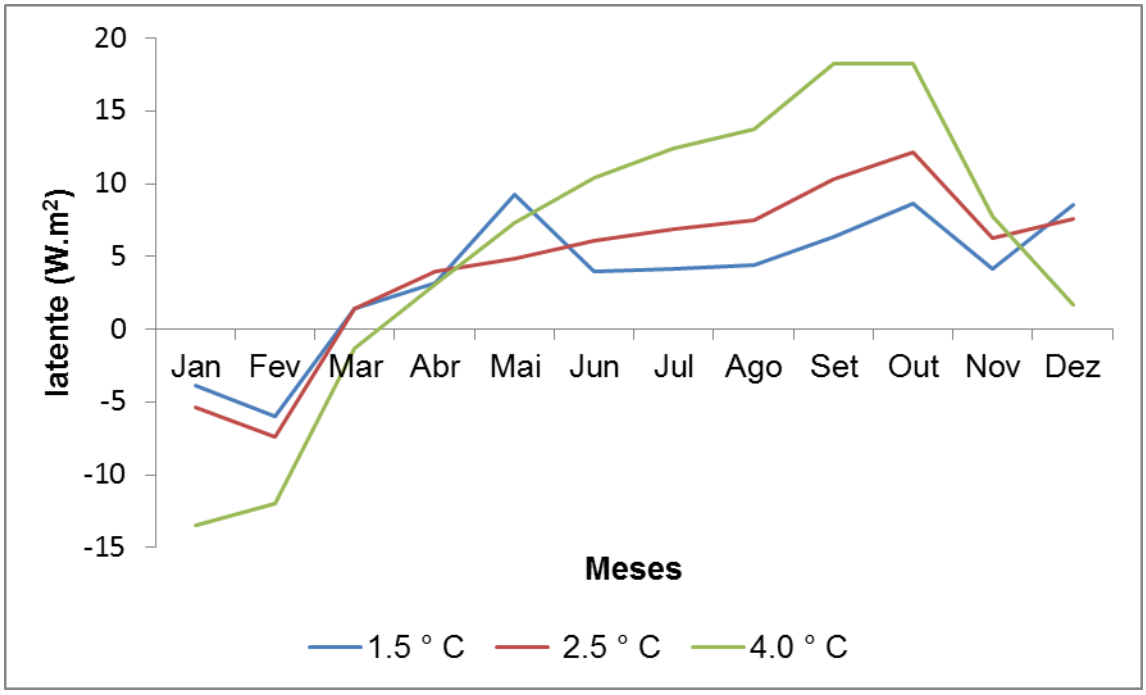

Figura 27 - Anomalia mensal do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$), entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

4.3.2 Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível possui comportamento semelhante ao de latente, fluxos maiores em meses com temperaturas médias mais altas e menores nas baixas para CO, CA1, CA2 e CA3 (Fig. 26 e 28). O calor sensível esta associado à energia que eleva a temperatura, então o padrão do gráfico esta coerente com o esperado, pois nos períodos que a temperatura média é maior o calor sensível também é maior (Fig. 28).

Nos cenários CA1, CA2 e CA3, o comportamento do fluxo de calor sensível entre janeiro e abril é diretamente proporcional ao aumento da temperatura do cenário. Ao passo que, entre maio e outubro o fluxo de calor sensível se comporta de maneira inesperada, inversamente proporcional ao aumento da temperatura do cenário (Fig. 29), a falta de calibração do modelo para a região de estudo pode ter causado este comportamento estranho.

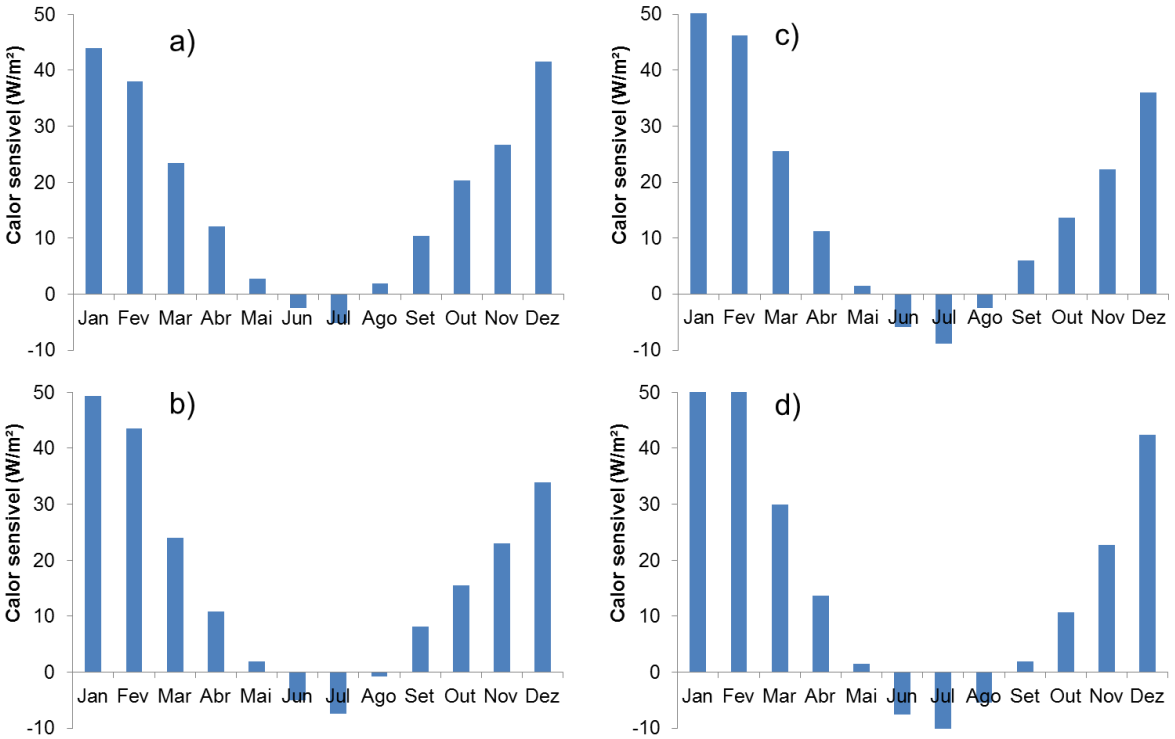

Figura 28 - Média mensal do fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) para (a) controle e para os cenários de (b) CA1, (c) CA2 e (d) CA3.

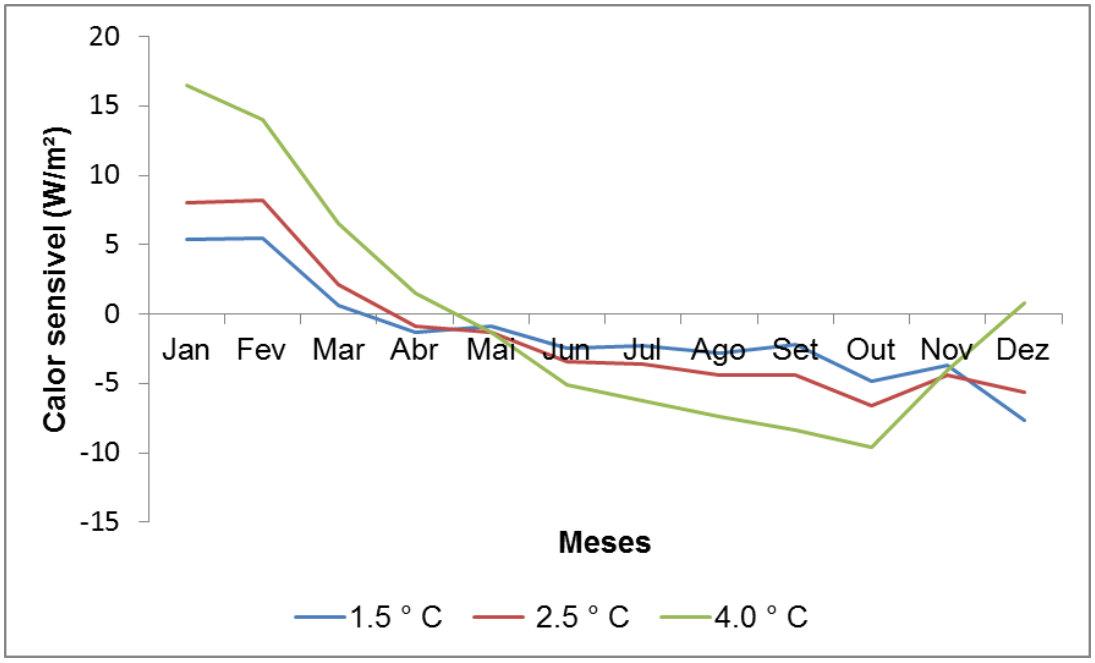

Figura 29 - Anomalia mensal do fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) dos cenários, entre CA1 (linha azul), CA2 (linha vermelha) e CA3 (linha verde) e o controle (CO).

Conclusão

Utilizando-se dados gerados pela simulação do modelo IBIS, foi possível verificar alterações no comportamento da vegetação através dos fluxos de carbono, água e energia entre a atmosfera e a vegetação no bioma Pampa da APA do Ibirapuitã, impostas pelo aumento da temperatura média no cenário atual (2008 a 2010) para um cenário futuro (2028 a 2030).

Haverá no cenário futuro redução da vegetação campestre, pois a diminuição da PPL (janeiro - maio) é mais acentuada que seu aumento (junho - outubro) em relação ao controle. O IAF se reduzirá no período em que há diminuição da PPL, nos demais períodos se manterá igual ao cenário atual considerado.

Para o fluxo de água os cenários indicam distribuição temporal regular da evapotranspiração. Se a precipitação não aumentar como indicam as projeções de mudanças climáticas para região sul, é possível haver déficit hídrico no verão.

No fluxo de energia, o calor latente será intensificado medida que a temperatura do cenário aumenta, havendo disponibilidade hídrica. O fluxo de calor sensível se comporta de maneira inesperada, inversamente proporcional ao agravamento do cenário entre os meses de maio e novembro. Este resultado necessitada de mais investigação.

O presente trabalho mostrou que o comportamento da maioria das variáveis aqui estudadas esta coerente com esperado pela literatura, sendo ainda necessária a comparação com dados experimentais. Assim é projetada a diminuição da vegetação campestre na APA do Ibirapuitã trazendo riscos para os serviços ambientais**.**

Referências

AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M.; SILVA, D. P.L.; WAINER, I.; ARTAXO, P.; MARENGO, J. A. **Base científica das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. 197p.

ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; OLIVEIRA, L. E.; DE ARAGÃO, C.; DE MORRISON, V. D. Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7.2005, Goiânia-Go, **Anais:** v. 12, p. 2811-2818.

ANDREAE, M.O; ARTAXO, P.; BRANDÃO, C.; CARSWELL, F. E.; CICCIOLI, P.; COSTA, A.L; CULF, A. D; ESTEVES, J. L.; GASH, J. H. C.; GRACE, J. ; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI,Y.; MANZI, A. O.; MEIXNER, F. X. ; NOBRE, A. D.; NOBRE, C.; RUIVO, M. D. L. P.; SILVA-DIAS, M. A.; STEFANI, P.; VALENTINI, R.; VONJOUANNE, J.; WATERLOO, M. J. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA – EUSTACH experiments**.** **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 33 1-25, 2002.

BRASIL. LEI. Disponível em:<http://www.planalto.gov>. Acesso em 9 de jan. 2014.

CARDOSO, M. F.; HURTT, G. C.; MOORE III, B.; NOBRE,C. A.; PRINS, E. M. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology9**, p. 656 - 669, 2003.

CLARK, P.U.; McCABE, A.M.; MIX, A. C.; WEAVER, A. J. Rapid Rise of Sea Level 19,000 Years Ago and Its Global Implications. **Science**, v. 304, n. 5674, p. 1141-1144, 2004.

CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.;

COSTA, A.L; CULF, A. D; ESTEVES, J. L.; GASH, J. H. C.; GRACE, J. ; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI,Y.; MANZI, A. O.; MEIXNER, F. X. ; NOBRE, A. D.; NOBRE, C.; RUIVO, M. D. L. P.; SILVA-DIAS, M. A.; STEFANI, P.; VALENTINI, R.; VONJOUANNE, J.; WATERLOO, M. J. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA – EUSTACH experiments**.** **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 33 1-25, 2002.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A**. Combined Effects of Deforestation and Doubled Atmospheric CO2 Concentrations on the Climate of Amazonia**. Journal of Climate, v. 13, p. 18-34, 2000.

DDC. Centro de distribuição de dados do IPCC. Disponível em: <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/sres/index.html>. Acesso em: 22 de jan. 2014.

DELIRE, C.; FOLEY, J. A.; THOMPSON, S. Evaluating the carbon cycle of a Coupled atmosphere-biosphere model. **Global Biogeochemical Cycles**, v.17, n. 1, 1012, 2003.

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. Englewood Cliffs: Waveland Press, 1994. 307p.

FEARNSIDE, P. M.; FERRAZ, J. A. Conservation Gap Analysis of Brazil's Amazonian Vegetation. **Conservation Biology**, v. 5, p. 1134-1147, 1993.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas**. *Estudos avançados***, São Paulo, v.19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FLORESTAL. Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: < http://www.florestal.gov.br/>. Acesso em: 28 de dez. 2013.

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics**. Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, p. 603 -628, 1996.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; CUNHA, A. D.; KLOSOWSKI, E. S. Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido-cultivo de inverno e de verão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 8-13, 2000.

GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle**. Journal of ecology**, v. 92, n. 2, p. 189-202, 2004.

HOOM, C.; WESSELINGH, F. P.; TER STEEGE, H.; BERMUDEZ, M. A.; MORA, A.; SEVINK, J.; ANTONELLI, A. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity**. Science**, v. 330, n. 6006, p. 927-931, 2010.

HORNBERGER, G.M.; RAFFENSPERGER, J.P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K.N. **Elements of physical hydrology**. The Johns Hopkins University Press, Baltimore,1998. 302p.

HULME, P. E. Adapting to climate change: is there scope for ecological management in the face of a global threat? **Journal of Applied Ecology**, v. 42 p. 784 -794, 2005.

IBRAM. Cerrado. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/informacoes/meio-ambiente/bioma-cerrado.html >. Acesso em: 12 de jan. De 2014.

ICMBIO. Instituto Chico de Mendes de conservação da biodiversidade. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/portal/>. Acesso em: 16 de jan. De 2014.

IPAM. Amazônia. Disponível em: < http://www.ipam.org.br/ >. Acesso em: 12 de jan. 2014.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007**, Contribution of working group I to the third. Cambridge University Press, Cambridge. 2007.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Scenarios Emission**. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US), 2000.

KUCHARIK, C.J.; FOLEY, J.A.; DELIRE, C.; FISHER, V.A.; COE, M.T.; GOWER, S.T.; LENTERS, J.D.; YOUNG-MOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance end vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles,** v. 14, p.795-825, 2000.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima, 2006, 550p.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. ***Ecologia e conservação da Caatinga.*** Editora Universitária UFPE, 2003.

LEE, R.; Evaluating vegetation phonological patterns in innder Mongolia using NDVI time series analysis**. International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.12, p. 2505-2512, 2012.

LEIVAS, J. F.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 397-407, 2006.

MALCOLM, J.; PITELKA, L**. Ecosystems & global climate change: a review of potential impacts on US terrestrial ecosystems and biodiversity**. Arlington: Pew Center on Global Climate Change, 2000, 41p.

MALHI, Y. ; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT,B.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31593-31612, 1998.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). Biomas. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas>. Acesso em: 11.jan. 2014.

MOUILLOT, F.; RAMBAL, S.; JOFRE, R. Simulating climate change impacts on fire requency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. **Global Change Biology,** v. 8, p. 423-437, 2002.

NEPSTAD, D.; LEFEBVRE, P.; SILVA, U. L.; TOMASELLA, J.; SCHLESINGER, P.; SOLORZANO, L.; MOUTINHO, P.; RAY, D.; BENITO, J. G. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis**. Global Change Biology,** v. 10, p. 704 - 717; 2004.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1989. 421p.

NOBRE, C. A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do pais. **Parcerias Estratégicas**, v. 12, p.240, 2001.

NOGUEIRA, J. **Sensibilidade ecofísiológica dos fluxos de carbono, água e energia sob cenário de alterações climáticas: um estudo de caso no cerrado brasileiro**, 2011. 55 f. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas)-Faculdade de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PANTANAL. Portal Pantanal. Disponível em: <http://www.portalpantanal.com.br/>. Acesso em: 28. Dez. 2013.

PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y. ; HIGUCHI, N.; LAURENCE, W. F.; NÚÑEZ, P. V. ; VÁSQUEZ, R. M.; LAURANCE, S. G.; FERREIRA, L. V.; STERN, M.; BROWN, S.; GRAÇA, J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. **Science**, v. 282, n. 5388, p. 439-442, 1988.

PILLAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. Á. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. 403p.

PILLAR, V. D.; TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 673-681, 2012.

PILLAR, V. P.; VELÉZ, E. Extinção dos campos sulinos em Unidades de Conservação: um fenômeno natural ou um problema ético? **Braziliam Journal of Nature Conservation,** v. 8, p. 84-86, 2010.

PIELKE, R. A.; AVISSAR, R.; RAUPACH, M.; DOLMAN, A. J.; ZENG, X.; DENNING, A. S. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. **Global Change Biology**, v. 4, n. 5, p. 461-475, 1998.

PRESERVAÇÃO. Unidades de conservação no Brasil. Disponível em: <http://uc.socioambiental.org/>. Acesso em 09 de jan. 2014.

ROOT, T. L.; PRICE, J, T.; HALL, K. R. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. **Nature**, v. 421, p. 57-60, 2003.

SANO, E. E.; Rosa, R.; Brito, J. L. S.; Ferreira, L. G. Notas Científicas Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado**. Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.

SAWYER, D. Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1747-1752, 2008.

SCIENCEBITZ. Environmental Systems. Disponível em: < http://sciencebitz.com/?page_id=204>. Acesso em: 15 de jan. 2014.

SCHIMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global change biology**, v. 1, n. 1, p. 77-91, 1995.

SHUKIA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change.**Science (Washington**), v. 247, n. 4948, p. 1322-1325, 1990.

SILVA, E. L. O Pampa e a APA do Ibirapuitã: estratégias e ações para a sustentabilidade**.** In: Costa, B. P.; Quoos. J. H.; Dickel, M. E. G. (orgs.). **A sustentabilidade da região da Campanha-RS: Práticas e teoria a respeito das relações entre ambiente, sociedade, cultura e políticas públicas.** Santa Maria: UFSM, 2010. p. 32-61.

SIQUEIRA, M. F. D.; PETERSON, A. T. Consequences of global climate change for geographic distributions of Cerrado tree species. **Biota Neotropica**, v. 3, n. 2, p. 1-14, 2003.

TEIXEIRA, C. O desenvolvimento sustentável em unidade de conservação: a naturalização do social. **Revista Brasileira de ciências sociais**, Brasil, v. 20, n. 59, p. 51-66, 2005.

TONELLO, V. M. M. **Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade.** 2007. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.

TORNQUIST, C. G.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E.P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 1, p. 33-43, 2009.

TURNER II, B.L.; KASPERSON, R.E.; MATSON, P. A.; MCCARTHY, J.J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.; MARTELLO, M. L.; POLSKY, C.; PULSIPHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability**. Science**, v. 100**,** p. 8074-8079, 2003.

TRENTIN, C. B. **Análise da resposta espectral da vegetação da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/ MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRUMBORE, S. Carbon respired by terrestrial ecosystems - recent progress and challenges. **Global Change Biology**, v. 12, p. 141-153, 2006.

SCW (Science for a Changing World). Evapotranspiration. Disponível em: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleevapotranspiration.html>. Acesso em: 19 jan. 2014.

VELOSO, H. P.; RANGEL, F. A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classisficações da Vegetação Brasileira, Adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124p.

VETTER, R. E.; BOTOSSO, P. C. El Niño may affect growth behaviour of Amazonian tress. **GeoJournal**, v. 19, n. 4, p. 419-421, 1989.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, n. 1, p. 41-76, 1947

WIKIPEDIA. Caatinga. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Caatinga>. Acesso em: 12 jan. 2014.

WWF. World Wildlife Fund. Disponível em: <http://www.wwf.org.br>. Acesso em: 12 de jan. 2014.

Anexos

ANEXO A – Tabela de dados de entrada (input) da versão 2.5 do modelo IBIS

Input	Abreviatura	Resolução	Fonte
Nebulosidade média	Cld	Mensal	CRU
Taxa média de precipitação	Prec		
Temperatura média	Temp		
Umidade relativa média	Rh		
Diferença entre temperatura do mês mais frio e quente	Trange		
Dias úmidos	Wetd		
Velocidade do vento média mensal na sig = 0,995	Wspd		
% de Clay	soita.clay	-	IGBP/CON US
US % de sand	soita.sand		
Diferença entre temperatura mínima e média do mês mais frio	Deltat		Depto Geo de Oregon
Máscara de superfície	Surta		NOAA / NGDC, adaptado de ET0P05
Topografia	Topo		ET0P05
Tipos de vegetação	Vegtype		SAGE

ANEXO B – Tabela de dados de saída (output) da versão 2.5 do modelo IBIS

Output	Abreviaturas	Resolução
Escoamento médio da superfície	Srunoff	Diário
Escoamento médio total	Trunoff	
Solo médio de gelo	Wisoi	
Drenagem	Drainage	
Razão de respiração de raiz e solo	Co2ratio	Mensal
Radiação infravermelha descendente e ascendente	Ir	
Fluxo médio de calor latente	Latent	
Produtividade primária líquida total	Npptot	
Umidade média específica	Qa	
Fração média de nuvem	Qnof	
Radiação solar média incidente	Solar	
Temperatura média do ar	Temp	
Nebulosidade média	Cloud	Diário, mensal
Precipitação média	Rain	
Umidade relativa	Rh	
Quantidade média de neve	Snow	
Biomassa para dossel superior e inferior	Biomass	Anual
Respiração microbiana, do solo e da raiz; troca total de carbono no ecossistema	Co2fluxes	
Quantidade total de carbono no solo	Csoi	
Regime de distúrbio de fogo	Disturbf	
Presença de cada tipo funcional vegetal	Exist	
Fração de cobertura superior e inferior do dossel	Fcover	Anual
Produtividade primária líquida	Npp	
Quantidade total de nitrogênio no solo	Nsoi	
Tipo de vegetação	Vegtype0	
Altura do dossel	Zcanopy	

ANEXO C – Tabela de dados de saída (output) da versão 2.5 do modelo IBIS

Output	**Abreviaturas**	**Resolução**
Escoamento médio total e da superfície	Runoff	Mensal, anual
Fluxo médio de calor sensível	Tens	
Temperatura média do solo	Tsoi	
Umidade do solo	Wsoi	
Evapotranspiração	Aet, evt	Diário, mensal, anual
Índice de área foliar do dossel superior e inferior	Lai canopy, lai, plai	