

LUCIANA CRISTINA DE SOUSA VIEIRA

**DINÂMICA DA BIOMASSA DA FLORESTA AMAZÔNICA
EM RESPOSTA A ESTRESSE HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V657d
2011

Vieira, Luciana Cristina de Sousa, 1984-
Dinâmica da biomassa da Floresta Amazônica em resposta a
estresse hídrico / Luciana Cristina de Sousa Vieira.
– Viçosa, MG, 2011.
xiii, 55f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 45-55

1. Microclimatologia. 2. Biomassa florestal. 3. Secas -
Amazônia. 4. Chuvas - Frequência da intensidade.
5. Amazônia - Clima. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

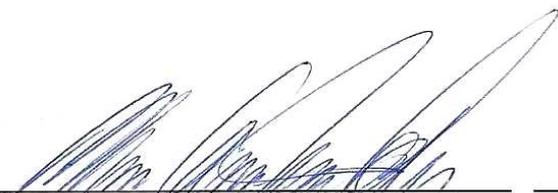
CDD 22. ed. 551.66

LUCIANA CRISTINA DE SOUSA VIEIRA

**DINÂMICA DA BIOMASSA DA FLORESTA AMAZÔNICA
EM RESPOSTA A ESTRESSE HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de julho de 2011.



Marcos Antonio Timbó Elmiro



Paulo Monteiro Brando
(Coorientador)



Britaldo Silveira Soares Filho
(Orientador)

*Aos meus pais Antonio Coimbra Vieira Filho
e Ana Cristina de Sousa Vieira;
à minha vó Maria Ambrozina;
e à minha tia Edna Rodrigues,
por serem a minha motivação.*

*“Aquele que pede, recebe; e, o que busca, encontra;
e, ao que bate se abre”.*
(Mateus 7:8)

“A natureza é a arte de Deus”.
(Dante Alighieri)

*“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não
posso desistir, pois para mim, vencer é nunca
desistir”.*

(Albert Einstein)

*“Existem apenas duas maneiras de ver a vida, uma é
pensar que não existem milagres e a outra é que tudo
é um milagre”.*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me ajudado, por me dar força nos momentos mais difíceis, por me mostrar que tudo é possível aquele que crê.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus pais Antonio Coimbra Vieira Filho e Ana Cristina de Sousa Vieira pelo incentivo aos estudos, pela educação nos caminhos da verdade, por todo amor e dedicação que deram a mim para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À minha querida vó Maria Ambrozina por ser um exemplo em minha vida de dedicação, luta e humildade.

À minha irmã Brígida da Silva.

À família Magalhães, Rita, Elcio, Allan e Luan por todo carinho, paciência, amizade e incentivo que me deram em Viçosa. Vocês são minha segunda família.

Ao meu orientador Britaldo Silveira, pela paciência, apoio e pela oportunidade de aprender e crescer.

Aos meus co-orientadores Paulo Brando e Marcos Heil, pela atenção, pelas sugestões e contribuições.

A toda equipe do CSR (Centro de Sensoriamento Remoto) da UFMG, por toda gentileza e boa vontade em me ajudar, em especial a Rafaella pela dedicação, paciência, conselhos e incentivo que foram de grande importância para a conclusão desta pesquisa.

Aos demais professores que contribuíram para o enriquecimento de meu intelecto.

Às amigas feitas em Minas Gerais, Paulo, Camilo, Rômula, Marine, Carolina, Cinthia, Otarcílio (Tati), Mateus, Tathyane, Nathália, Luciana, Douglas, Jackson, Rodrigo, Nathália Nascimento, obrigada por todo companheirismo e momentos alegres.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho

BIOGRAFIA

LUCIANA CRISTINA DE SOUSA VIEIRA, filha de Antonio Coimbra Vieira Filho e Ana Cristina de Sousa Vieira nasceu em 16 de março de 1984 na cidade de Belém-PA

Em dezembro de 2001 concluiu o ensino médio no Instituto Adventista Grão Pará.

Iniciou a graduação em meteorologia em março de 2005, obtendo o título de bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará em janeiro de 2009.

Neste período foi aluna e bolsista de iniciação científica no Museu Paraense Emílio Goeldi com pesquisas voltadas para a Flona de Caxiuanã em 2008.

Em agosto de 2009 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de mestrado, em Meteorologia agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV) dedicando-se a micrometeorologia de ecossistemas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. FLORESTA AMAZÔNICA E CLIMA.....	7
2.1. Processos de interação entre a superfície e a atmosfera	7
2.2. Variabilidade da estação seca na Amazônia	9
2.3. Seca de 2005.....	14
2.4. Seca de 2010.....	16
3. METODOLOGIA	20
3.1. Descrição do modelo CARLUC.....	20
3.2. Descrição dos dados	24
3.3. Descrição das fases da modelagem	25
4. RESULTADOS.....	30
4.1. Resultados simulados pelo CARLUC de biomassa de 1995 a 2005	30
4.2. Mapa de porcentagem de perda para a seca de 2005 e resultados do CARLUC.....	31

4.3. Mapa de porcentagem de perda para a seca de 2010 e resultados do CARLUC.....	35
5. DISCUSSÃO.....	38
6. CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os mapas A e B mostram as diferenças entre os índices de chuvas na Amazônia em 2005 e 2010 e a média da década. Em C e D, aparece a intensidade da seca que atingiu a floresta em 2005 e 2010, medida pelo déficit hídrico climatológico (MCWD).....	3
Figura 2 - Interceptação vegetal.....	8
Figura 3 - Porcentagem de PAW% (água disponível para as plantas) para o período de 1996 a 2005.	13
Figura 4 - Média mensal de precipitação em mm para o período de 1996 a 2005.	14
Figura 5 - Mudança na biomassa acima do solo (AGB) na Amazônia.	16
Figura 6 - Evolução da temperatura da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico tropical entre novembro de 2009 e outubro de 2010	17
Figura 7 - Gráfico da extensão de árvores mortas medidas por stress climático MCWD (acúmulo de água).....	19
Figura 8 - Diagrama do fluxo de carbono no modelo CARLUC (<i>Carbon and Land-Use Change</i>).....	21
Figura 9 - Diagrama do CARLUC: demonstração do fluxo de carbono entre os reservatórios para uma única parcela de terra.....	23
Figura 10 - Biomassa aérea para a Floresta Amazônica usada como referência em Mg/ha.	25
Figura 11 - Média de tronco para a área da Floresta Amazônica (<i>stem</i>), em kg/m ²	26

Figura 12 - Média de folha para a Floresta Amazônica (<i>leaf</i>) (kg/m ²).	27
Figura 13 - Porcentagem de biomassa do CARLUC (1995 a 2005) em relação à biomassa referencial.	31
Figura 14 - Mapa de porcentagem de perda de biomassa (0 a 14%).	32
Figura 15 - Representação da cobertura de terra para a área da Floresta Amazônica para o ano de 2006.	32
Figura 16 - Porcentagem de biomassa do CARLUC (2006 a 2025) em relação à biomassa de referência.	33
Figura 17 - Representação do período de recuperação para cada grupo de células do mapa (2006 a 2054).	34
Figura 18 - Mapa das regiões afetadas pela seca de 2005 na Floresta Amazônica: simulação para 100 anos (2006 a 2054).	34
Figura 19 - Mapa de porcentagem de perda de biomassa (0 a 16%).	35
Figura 20 - Porcentagem de perda sobre as áreas atingidas pela seca de 2010.	36
Figura 21 - Comportamento percentual da biomassa para a Floresta Amazônica (porcentagem de aumento de biomassa em relação à biomassa referencial para o período de 2000 a 2025).	37
Figura 22 - Mapa das regiões afetadas pela seca de 2010.	37

RESUMO

VIEIRA, Luciana Cristina de Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Dinâmica da biomassa da Floresta Amazônica em resposta a estresse hídrico**. Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho. Coorientadores: Paulo Monteiro Brando e Marcos Heil Costa.

Diversos modelos climáticos prevêem secas mais intensas e frequentes na região Amazônica devido ao aumento de gases causadores do efeito estufa na atmosfera. Conseqüentemente, os estoques de carbono das florestas da Amazônia podem ser reduzidos substancialmente, visto que as secas severas tendem a aumentar a mortalidade e diminuir o crescimento das árvores. Assim, o objetivo geral desta pesquisa foi quantificar o balanço de carbono das florestas da Amazônia após os eventos de seca de 2005 e 2010. Para tanto, utilizou-se o modelo ecossistêmico CARLUC (*Carbon and Land-Use Change*), que simula o fluxo de carbono entre os 14 diferentes componentes da floresta (folhas, caules, raízes, etc.) e da floresta à atmosfera. Em particular, simularam-se as perdas de carbono causadas pelas secas de 2005 e 2010 e avaliou-se o tempo à recuperação dos estoques de carbono. Os resultados mostraram que houve uma forte associação entre os locais sob estresse hídrico e aqueles com reduções substanciais (5.3 Mg de biomassa acima do solo) nos estoques de carbono. O período de recuperação referente

às secas de 2005 e 2010 para toda a Bacia Amazônia foi, em média, de oito e dez anos, respectivamente. Quando se considerou apenas os locais onde a seca foi mais severa (déficit cumulativo hídrico máximo < 100 mm), os resultados mostraram que a recuperação dos estoques de carbono reduzido durante as secas de 2005 e 2010 levaria 60 e 100 anos, respectivamente.

ABSTRACT

VIEIRA, Luciana Cristina de Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Dynamics of the Amazon Forest biomass in response to water stress**. Adviser: Britaldo Silveira Soares Filho. Co-advisers: Paulo Monteiro Brando and Marcos Heil Costa

Several climate models predict more intense and frequent droughts in the Amazon region due to increased greenhouse gases in the atmosphere. Consequently, the carbon stocks of forests in the Amazon may be substantially reduced, since that severe droughts tend to i) increase the mortality and ii) reduce the growth of trees. The objective of this research was to quantify the carbon balance of forests in the Amazon after the events of 2010 and 2005 drought. To do so, we used the model ecosystem CARLUC (Carbon and Land-Use Change), which simulates the flow of carbon between the 14 different components of the forest (leaves, stems, roots, etc.). Forest and the atmosphere. In particular, we simulated carbon losses caused by droughts in 2005 and 2010 and evaluated the time to recovery of carbon stocks. The results showed a strong association between sites under water stress and those with substantial reductions (5.3 mg of above-ground biomass) in carbon stocks. The recovery period relating to drought of 2005 and 2010 for the entire Amazon basin was, on average, eight and ten years respectively. When we considered

only the locations where drought was more severe (maximum cumulative deficit water <100 mm), the results showed that the recovery of carbon stocks decreased during the droughts of 2005 and 2010 would take 60 and 100 years respectively.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa das florestas tropicais desempenha um papel importante no ciclo global do carbono, como um reservatório dinâmico e como uma fonte de dióxido de carbono para a atmosfera. A alta produtividade primária e a ampla distribuição da vegetação na Amazônia indicam seu grande potencial para seqüestrar carbono. Para melhorar a estimativa dos fluxos e estoques de carbono é necessário conhecer mais sobre quais fatores podem levar a alterações no estoque de carbono da biomassa em florestas tropicais e assim usar modelos de estimativa de biomassa ajustados às amplitudes de condições de variações destes fatores para a região. Com o objetivo de quantificar o balanço de carbono das florestas da Amazônia, especialmente e temporalmente na Amazônia esta pesquisa analisou o comportamento da biomassa em função da disponibilidade hídrica.

Uma abundante quantidade de provas científicas, incluindo os resultados divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) indica que haverá, no decorrer deste século, aumento de temperatura por todo o planeta, sendo mais severo sobre os continentes do que sobre os oceanos e aumento do nível dos oceanos. Haverá ainda aumento de chuvas nas regiões que já são bem providas de chuvas e diminuição nas regiões que hoje sofrem com a escassez de água, além de aumentar a frequência e a intensidade dos eventos extremos como secas prolongadas (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS

CLIMÁTICAS – IPCC, 2007). Dos 23 modelos climáticos globais empregados pelo IPCC em seu relatório em 2007, 50 a 70% prevêm uma redução (acima de 20 %) da precipitação durante a estação seca na parte leste da Amazônia (BETTS et al., 2008).

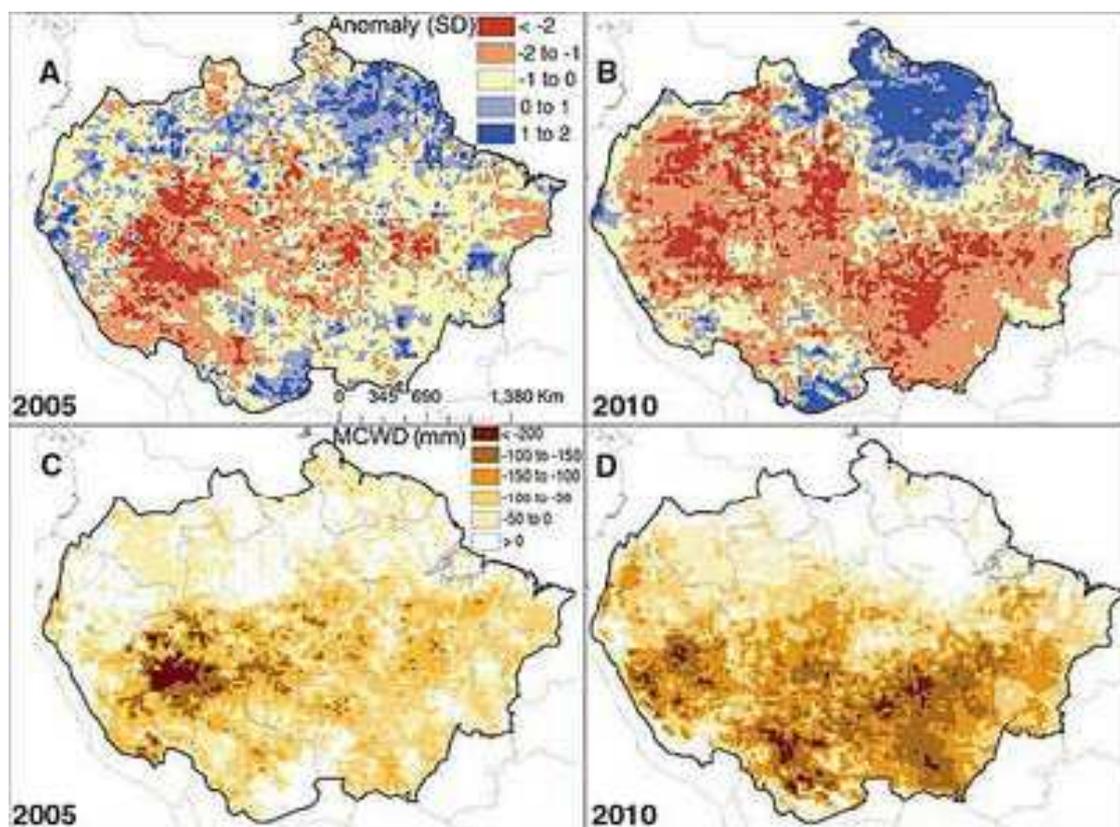
As secas severas conduzem à perda de carbono de ecossistemas de floresta em pé, mesmo na ausência de fogo (TIAN et al., 1998; CAMARGO et al., 2004). De acordo com pesquisas realizadas por Phillips et al. (2009b), da rede de inventários para a Amazônia (RAINFOR), os eventos de seca podem alterar fortemente o balanço de carbono regional e, assim, acelerar mudanças climáticas. Sabendo que a biosfera terrestre armazena aproximadamente 1.500 Pg (1 Pg = 10^{15} g) de carbono (C) nos primeiros 100 cm de solo e outros 600 Pg de C na vegetação, que, somados, equivalem a três vezes a quantidade de C contida na atmosfera, mudanças nos estoques de C da vegetação podem causar impactos significativos nas concentrações de dióxido de carbono e de outros gases do efeito estufa (CERRI et al., 2006).

O dióxido de carbono, embora presente em pequenas proporções na atmosfera, desempenha o papel de termorregulador, sendo absorvedor eficiente de radiação de ondas longas. Teme-se que o aumento de CO₂ na atmosfera possa causar um superaquecimento da mesma, com o conseqüente desequilíbrio climático do globo, o que poderá, em última análise, colocar em risco a sobrevivência da humanidade (VIANELLO; ALVES, 1991).

Em 2005 foi registrado um evento extremo de seca que ocorreu na Floresta Amazônica atingindo a região sul e sudeste da floresta. De acordo com um estudo realizado por Philips et al. (2009), onde houve maior déficit hídrico durante a seca de 2005, a taxa de biomassa lenhosa aérea diminuiu 2,39 Mg Cha/ano, enquanto que as parcelas não afetadas pela seca continuaram a ganhar 0,76 Mg Cha/ano. Embora não tenha sido a primeira, foi registrado o menor índice pluviométrico dos últimos 40 anos. O Pará teve 13 municípios atingidos diretamente, mas as piores conseqüências ocorreram na região sudoeste do Amazonas e no Acre (BROWN et al., 2006).

Apenas cinco anos após a seca de 2005 a Amazônia foi submetida a mais um evento extremo de seca em 2010 que foi bem mais intensa e embora tenha atingindo os mesmos locais (parte sul e sudeste da floresta), esta foi mais distribuída na região. Lewis et al. (2010), em um estudo sobre a seca de

2010, correlacionaram a mortalidade das árvores com o máximo déficit hídrico acumulado e constataram que a mortalidade das árvores poderia aumentar significativamente com o déficit hídrico, que atingiu cerca de 3,2 milhões de km² da floresta em comparação com 2,5 milhões de km² atingidos pela seca de 2005. Para dimensionar a seca de 2010 um estudo conduzido por Simon et al. (2011) utilizou dados de pesquisas meteorológicas anteriores referentes à última década (Figura 1). A partir daí, foi possível obter a média de chuvas durante o período normal de seca, que vai de julho a setembro. Essa média foi comparada com os índices de precipitação de 2005 e 2010 e verificou-se que realmente choveu abaixo da média nesses anos.



Fonte: Lewis et al. (2011).

Figura 1 - Os mapas A e B mostram as diferenças entre os índices de chuvas na Amazônia em 2005 e 2010 e a média da década. Em C e D, aparece a intensidade da seca que atingiu a floresta em 2005 e 2010, medida pelo déficit hídrico climatológico (MCWD).

A intensidade da seca – avaliada a partir dos índices de chuva – combinada com medições de biomassa feitas em campo permitiu aos pesquisadores chegar aos valores totais de carbono emitido para a atmosfera, 1,5 e 2,2 Pg C respectivamente para as secas de 2005 e 2010. Assim, a alta concentração de C na atmosfera pode representar uma alteração no equilíbrio da floresta podendo também causar mudanças no clima.

O aumento de CO₂ na atmosfera tende a aumentar o índice de área foliar (IAF) e a biomassa. O aumento do IAF por sua vez, faz com que ocorra o aumento da interceptação de luz, aumentando ainda mais a assimilação de carbono (COSTA, 2007). Até este ponto, pode parecer que há uma correlação positiva entre o aumento de CO₂ na atmosfera e a floresta. Porém, antes é preciso entender outros processos como a etapa inicial chamada de produtividade primária líquida (PPL). Na floresta esta etapa é o início do ciclo do carbono no qual ele é fixado como biomassa (ZHAO et al., 2010).

O decréscimo da PPL na Floresta Amazônica se deve ao aumento do estresse hídrico, aumento da temperatura do ar e aumento considerável da respiração autotrófica (ZHAO et al., 2010). Com pouca disponibilidade de água na floresta, a tendência da temperatura é aumentar e o efeito do aumento da temperatura é negativo sobre a PPL. Se houver aumento de CO₂ a PPL aumenta, a respiração heterotrófica (RH) diminui e o resultado implica em diminuição do sequestro de carbono. Por outro lado, o aumento da precipitação poderá fazer com que a taxa de sequestro de carbono pela vegetação viva (PPL) aumente e com isso a RH também aumenta implicando em sequestro de carbono (COSTA, 2007). Resumindo, com o aumento de CO₂ na atmosfera e com o aumento da temperatura haverá mais emissão de CO₂ para a atmosfera.

A PPL aumenta durante eventos de El Niño, quando há a redução de nuvens e aumento da radiação fotossinteticamente ativa sem que ocorra déficit de umidade do solo o suficiente para inibir a fotossíntese (BRANDO et al., 2007). Quando a umidade do solo é escassa, a PPL pode declinar e sua relativa repartição entre folhas, caules e raízes podem ser afetados, porém, o conhecimento sobre este assunto ainda é pouco. O crescimento do caule é o componente da PPL mais sensível a seca devido a diminuição na alocação de carbono (CHAPIN et al., 1990), a respiração do solo, que integra a produção

de CO₂ de todas as fontes subterrâneas, incluindo a respiração radicular e decomposição de folhas, também tende a ser menor na época seca em comparação com o período chuvoso (DAVIDSON et al., 2000 e 2004; SALESKA et al., 2003), provavelmente em grande parte devido a variação sazonal da respiração heterotrófica na camada serrapilheira (BRANDO et al., 2007). Estas são algumas das consequências que a seca causa na dinâmica da floresta. É importante ressaltar que a interação de um clima alterado com uma floresta fragmentada e enfraquecida intensificaria o impacto da seca. Além do meio ambiente perder em termos de serviços ambientais, a fragmentação da floresta pode provocar a redução do regime de chuvas regionais (NOBRE et al., 1991; SAMPAIO et al., 2007; SILVA et al., 2008), alteração no regime de rios amazônicos (COE et al., 2009) e grande impacto no clima global (HOUGHTON, 2005). Soma-se a isso o efeito do aquecimento global que poderá induzir na região Amazônica estações secas mais prolongadas (MALHI et al., 2008). A conversão da terra através do desmatamento e as atividades subsequentes é um dos principais impulsionadores da dinâmica do fogo na Amazônia que também é uma das interações que poderão levar florestas remanescentes a um vicioso ciclo de degradação (UHL et al., 1990).

Notavelmente, as florestas tropicais da Amazônia têm sido consideradas como uma em região em risco, especialmente quando possíveis impactos do clima são associados ao aumento nas mudanças de uso da terra (SCHOLZE et al., 2006; SOARES-FILHO et al., 2006; MALHI et al., 2009).

Mas, a seca pode aumentar a inflamabilidade da floresta mesmo com o declínio do desmatamento. A taxa de desmatamento no acre diminuiu 30 % entre 2004 e 2005. Mesmo assim a área total de floresta queimada em 2005 foi cinco vezes maior do que a área desmatada e estas florestas queimadas provavelmente poderão ser muito mais vulneráveis às queimadas se um novo evento de seca ocorrer (COCHRANE et al., 1999). Em caso de aumento da frequência de secas, a dispersão de incêndios em áreas florestais provavelmente será o maior agente de transição da floresta ao invés de mudanças na ecologia e fisiologia da floresta. Ainda há poucos estudos sobre quais são as estratégias adaptativas da floresta durante as secas, quanto de carbono a floresta pode estocar, se os eventos de seca continuarem e se houver maior emissão de CO₂ qual será a dinâmica da biomassa da floresta

para estas elevadas taxas de CO₂, também ainda não é possível saber se a floresta está passando por um ciclo de secas ou se está iniciando um processo frequente deste evento na região.

Tendo em vista que mudanças relativamente pequenas na estrutura e função da Floresta Amazônica podem ter conseqüências globais para o clima, os resultados desta pesquisa poderão contribuir para um melhor entendimento do impacto que a seca pode causar na Floresta Amazônica e o quanto a floresta pode estar funcionando como uma grande fonte de carbono para a atmosfera se submetida a condições de déficit hídrico extremo.

2. FLORESTA AMAZÔNICA E CLIMA

Neste trabalho, os seguintes assuntos serão revisados: a interação entre a biosfera e a atmosfera, os mecanismos de circulação atmosférica, e os mecanismos de dinâmica da floresta. O enfoque será dado aos processos meteorológicos próximos à superfície da terra e à dinâmica de florestas tropicais, especialmente durante condições climáticas extremas como, por exemplo, as secas.

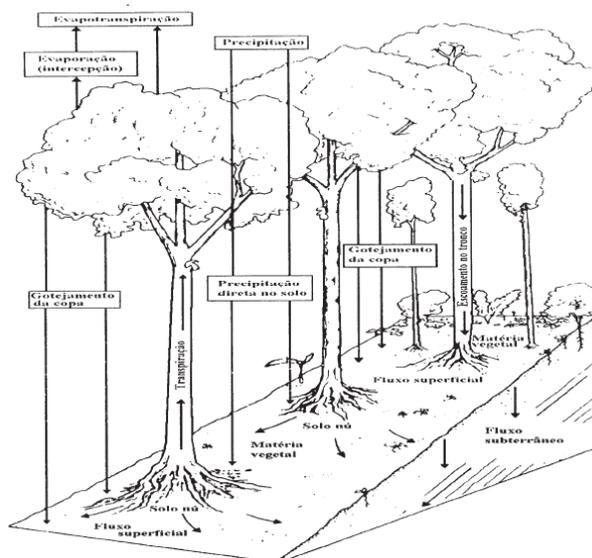
2.1. Processos de interação entre a superfície e a atmosfera

O objetivo de analisar a circulação da atmosfera em escala planetária consiste em compreender os mecanismos físicos que asseguram a manutenção do equilíbrio energético (VAREJÃO-SILVA, 2006). Dentre os principais eventos de circulação destacam-se LA NIÑA, EL NIÑO e Oscilação do Atlântico Norte.

Nos trópicos o evento climático El Niño Southern Oscillation (ENSO) é certamente o fenômeno mais notável, onde as anomalias de temperatura da superfície sobre o oceano Pacífico Equatorial modificam a intensidade da célula de Walker, a qual está associada com regimes de precipitação em vários locais do globo, principalmente na Amazônia. As alterações de temperatura da superfície do Oceano Pacífico durante episódios EL NIÑO e LA NIÑA são acompanhadas de alterações climáticas globais. Há variações dos fluxos de

calor sensível e de vapor d'água da superfície do Oceano Pacífico Equatorial para a atmosfera. Isto provoca mudanças na circulação atmosférica e na precipitação em escala global. No Brasil, há impactos significativos sobre a precipitação em várias regiões em diferentes fases do ciclo EL NIÑO-Oscilação Sul (GRIMM et al., 2000; GRIMM, 2003; GRIMM, 2004).

A vegetação também tem papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação (Figura 2): quanto maior for a superfície de folhagem, maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume retido é evaporado assim que houver capacidade potencial de evaporação. Quando esse volume, retido pelas plantas, é totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através da transpiração. A planta retira essa umidade do solo através de suas raízes. A evapotranspiração (evaporação + transpiração) de florestas tropicais, que raramente tem déficit de umidade do solo é, em média, 1415 mm (1310 – 1500 mm). Esse valor pode cair para 900 mm se houver períodos de déficit hídrico (BRUIJNZEEL, 1990). A expressão déficit hídrico designa uma situação na qual as precipitações exibem valores inferiores aos da evaporação e a transpiração das plantas.



Fonte: Bruijnzeel (1990).

Figura 2 - Interceptação vegetal.

A variação natural na disponibilidade de água afeta a produtividade dos ecossistemas tropicais mais profundamente do que qualquer outra variável climática. Como resultado, a seca é talvez a ameaça climática mais importante às florestas tropicais. Os cenários de alterações climáticas para o século 21 têm sugerido a diminuição da disponibilidade de umidade no solo em certas regiões do mundo (BATES et al., 2008).

A deficiência hídrica provoca alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta. Segundo Levitt (1980), no entendimento das respostas das plantas ao déficit hídrico é de fundamental importância se quantificar a capacidade de armazenamento de água no solo e analisar a influência dos mecanismos de adaptação das plantas à redução da disponibilidade de água no solo, pois, de acordo com Kiehl (1979), a quantidade de água armazenada no solo disponível às plantas varia com a textura e as características físicas do solo, levando a planta a apresentar diferentes respostas em seus mecanismos de resistência morfofisiológicos (SANTOS et al., 1998).

2.2. Variabilidade da estação seca na Amazônia

A variabilidade da estação seca se verifica através de valores climáticos extremos registrados nas mais diferentes regiões geográficas e que persistem durante semanas, meses e, inclusive, anos. Na Amazônia, em sua sua grande extensão territorial, há uma grande variabilidade nos regimes climáticos e hidrológicos que ocorre em diferentes escalas de tempo e espacial (TOMASELLA et al., 2010). A variabilidade decenal pode ajudar a explicar algumas tendências das condições mais secas ou mais úmidas registradas. Por exemplo, o período de 1945-1976 foi relativamente úmido e o de 1977-2000 relativamente seco na Amazônia (MARENGO et al., 2011). Medições realizadas durante esse período mostraram uma transição de condições mais úmidas para mais secas e podem ajudar a explicar a aparente tendência de seca a curto prazo no sul da Amazônia. A redução das precipitações observada entre 1951 e 1990 foi modulada por uma oscilação decenal. Variações como essa são atribuídas à variabilidade climática que ocorre a cada década no

oceano pacífico que afeta as precipitações na Amazônia por meio de mudanças na circulação atmosférica. A variabilidade decenal observada no clima ocorre de forma natural, independente das mudanças causadas pelo homem no clima ou na terra (MARENGO et al., 2011).

Assim como a variabilidade decenal nas precipitações da Amazônia, há também variações de ano para ano, conhecidas como variabilidade climática interanual. Nas escalas interanuais, o fenômeno EL NIÑO – oscilação sul (já citado anteriormente) foi reconhecido como um dos maiores padrões que afetam o clima da Amazônia. Por exemplo, a seca de 2010 começou durante um evento de EL NIÑO no início do verão austral e depois se tornou mais intensa durante o evento de LA NIÑA (MARENGO et al., 2011).

Compreender o comportamento da floresta mediante estes eventos é um grande desafio para a comunidade científica. Algumas pesquisas têm mostrado que durante o período seco na Floresta Amazônica pode haver um “greening-up” (maior produção de folhas) na floresta quando esta está passando por período de máxima temperatura, máxima radiação solar e pouca precipitação (SALESKA et al., 2007).

Em uma outra pesquisa, Samantha et al. (2010) demonstraram que em 2005 não houve um “greening” (maior verdor das folhas) na Floresta Amazônica pois não encontraram evidências em grande escala. Aproximadamente 11% a 12% das áreas da floresta atingidos pela seca de 2005 apresentaram o efeito “greening” enquanto que 28% a 29% apresentaram escurecimento na vegetação ou nenhuma mudança. Para os demais locais os dados de EVI (índice de vegetação, sigla em inglês para *Enhanced Vegetation Index*) não tiveram qualidade o suficiente para avaliar e caracterizar qualquer alteração em larga escala de um possível “greening” não podendo reproduzir a realidade devido a contaminação nos dados de satélite decorrentes de nuvens e aerossóis.

Para Graham et al. (2003), a fotossíntese da floresta (produtividade primária bruta, PPB) aumenta durante os estágios iniciais da seca devido à maior radiação fotossinteticamente ativa, em contraste uma pesquisa mostrou através de dois experimentos (BRANDO et al., 2008), realizados na região Amazônica que a produtividade florestal diminuiu sob condições de seca com o aumento da mortalidade de árvores

resultante da diminuição da água disponível para as plantas (PAW) (HUTYRA et al., 2007).

Segundo Brando et al. (2010), o aumento da radiação solar durante períodos de seca pode aumentar a produtividade da floresta, porém, se considerarmos secas prolongadas e severas a produtividade será limitada devido a indução ao fechamento dos estômatos e até mesmo a mortalidade de árvores. O conhecimento da capacidade das plantas utilizarem a água que fica armazenada a uma grande profundidade fornece a chave para entender porque algumas áreas de floresta tropical se mantêm apesar de longos períodos de baixa pluviosidade.

Grande parte da Amazônia mantém uma cobertura verde em toda a estação seca por aquisição de água por raízes profundas (NEPSTAD et al., 1994) e, possivelmente, por redistribuição hidráulica de água pelas plantas (OLIVEIRA et al., 2005). Os limites em que a seca começa a reduzir a produtividade ainda não são conhecidos. Brando et al. (2010) demonstraram que locais onde a densidade da vegetação é alta podem estar melhor protegidos contra a seca devido a maior quantidade de árvores e seus sistemas de raízes profundas, os autores esclarecem ainda que o desenvolvimento da folha é controlado pela disponibilidade hídrica para que ocorra a expansão celular, portanto, alterações na dinâmica da vegetação devido a mudanças na precipitação (ou até mesmo queda das folhas) durante eventos extremos de seca é provável que sincronize com o brotamento das folhas e, conseqüentemente, maior “rubor” ou “greening” (BRANDO et al., 2010).

Um outro fator importante a destacar é a interação entre secas e incêndios que desempenham um papel importante na dinâmica do carbono. Durante períodos de seca, Saleska et al. (2003) demonstraram que para alguns locais da floresta houve uma melhor absorção de CO₂. Outros estudos mostram que a absorção diminuiu durante a estação seca (MALHI et al., 1998; ARAÚJO et al., 2002; VON RANDOW et al., 2004), e outros mostram sazonalidade nos padrões de troca de CO₂ (CARSWELL et al., 2002).

Segundo Saleska et al. (2003), a absorção líquida de carbono na estação seca ocorreu devido a menores taxas de respiração, enquanto que

alguns modelos preveram a liberação de carbono na estação seca devido a limitações na captação de água e absorção fotossintética de CO₂.

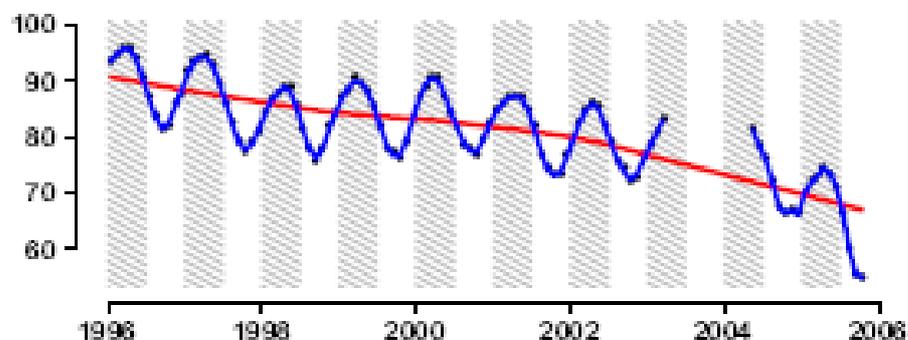
Da mesma forma, a evapotranspiração (ET) foi alta em alguns lugares na floresta durante a estação seca quando as entradas de radiação solar foram mais altas (HUTYRA et al., 2005; ROCHA et al., 2004; CARSWELL et al., 2002; VON RANDOW et al., 2004; SHUTTLEWORTH, 1988), porém, em outros locais a evapotranspiração máxima ocorreu durante a estação chuvosa quando a disponibilidade hídrica foi mais elevada (MALHI et al., 2002; VOURLITIS et al., 2002).

Florestas secas podem se comportar como florestas úmidas se tiverem raízes profundas e, ou, solos favoráveis ao fornecimento do acesso a água durante toda a temporada seca. A sazonalidade da limitação de água pode reduzir o crescimento da floresta e colocá-la em risco de incêndios. O modelo do IPAM/INPE (NEPSTAD et al., 2000) considera a floresta suscetível ao fogo na medida em que diminuem os estoques de água disponível para plantas até 10 metros de profundidade. Cenários futuros climáticos sugerem que as temperaturas na Amazônia podem aumentar, enquanto que a precipitação pode diminuir (FUNG et al., 2005), diminuindo provavelmente a disponibilidade de água, aumentando a seca e a inflamabilidade da floresta.

Um exemplo a ser citado sobre a interação entre seca e incêndios na floresta foi o que ocorreu durante a seca de 2005 onde os incêndios florestais afetaram com bastante intensidade a parte sudoeste da Amazônia. Os incêndios ocorreram principalmente em áreas onde não havia atividade humana que pudesse levar a queimadas. No estado do Acre, no sudoeste da Amazônia, o CPTEC/INPE relatou que o número de pixels de fogo detectados usando o satélite NOAA12 triplicou para quase 2.880 em setembro de 2005, em comparação com 800 em 2004. No Amazonas, o número de pixels de fogo em setembro foi de 760, enquanto que em setembro de 2005 quase triplicou para 2.166. O desmatamento e as queimadas na Amazônia repondem por mais de 75% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, e são colocados como um dos quatro maiores contribuintes nas mudanças climáticas global (MARENGO et al., 2008b; ARAGÃO et al., 2007). Geralmente a ocorrência das atividades de fogo coincide com as anomalias negativas de umidade (MARENGO et al., 2008b).

Outras secas severas antes de 2005 ocorreram na Amazônia, entre elas a de 1997-1998 causada pelo fenômeno EL NIÑO. Durante este evento houve um pronunciado déficit de chuva sobre o centro, norte e leste da Amazônia (MARENGO, 2009).

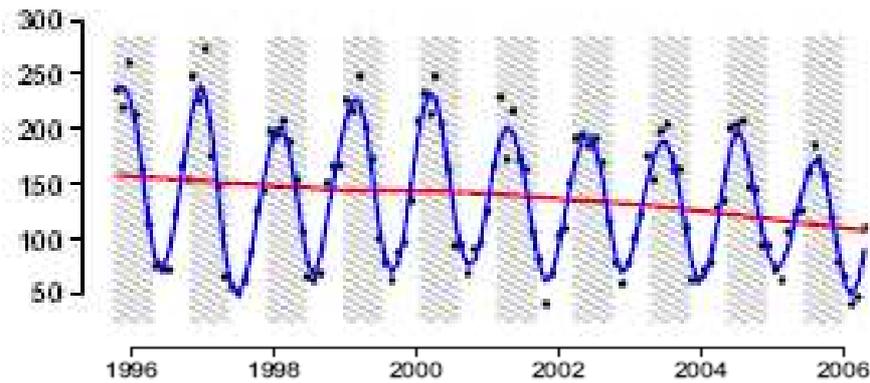
Como resultado da diminuição da precipitação sobre as regiões atingidas pela seca e ao aumento do déficit de pressão de vapor, o PAW (água disponível para as plantas) diminuiu significativamente ao longo do período de 1996 a 2005 (BRANDO et al., 2010), linhas azuis representam uma curva suave com base no método LOESS e linhas vermelhas representam um modelo de regressão local (*spline*) (Figura 3).



Fonte: Brando et al. (2010).

Figura 3 - Porcentagem de PAW% (água disponível para as plantas) para o período de 1996 a 2005.

A Bacia Amazônica experimentou também um declínio na precipitação (Figura 4) durante a estação chuvosa de 1996 a 2005 (BRANDO et al., 2010).



Fonte: Brando et al. (2010).

Figura 4 - Média mensal de precipitação em mm para o período de 1996 a 2005.

2.3. Seca de 2005

Em 2005, extensas áreas da Bacia Amazônica sofreram uma das mais intensas secas dos últimos 100 anos, oferecendo uma oportunidade única para avaliar diretamente a sensibilidade das florestas tropicais ao déficit hídrico. Contrariamente ao que ocorre na Amazônia, onde secas são frequentemente geradas pelo fenômeno El Niño, o evento de 2005 foi causado pelo aumento da temperatura da superfície do oceano Atlântico Tropical Norte (MARENGO et al., 2008b).

Este evento afetou dois terços da região sul da Amazônia, especialmente a região sudoeste, causando uma redução na precipitação e um aumento nas temperaturas em relação à média histórica (MARENGO et al., 2008b). Como resultado, muitos rios e lagos tiveram os níveis mais baixos dos últimos anos (ZENG et al., 2008).

Durante a seca uma área de mais de 3.300,000 km² experimentou um estresse de água (48% da bacia) e 5% (160.000 km²) teve um aumento do déficit hídrico em mais de 200 mm (PHILIPS et al., 2009b).

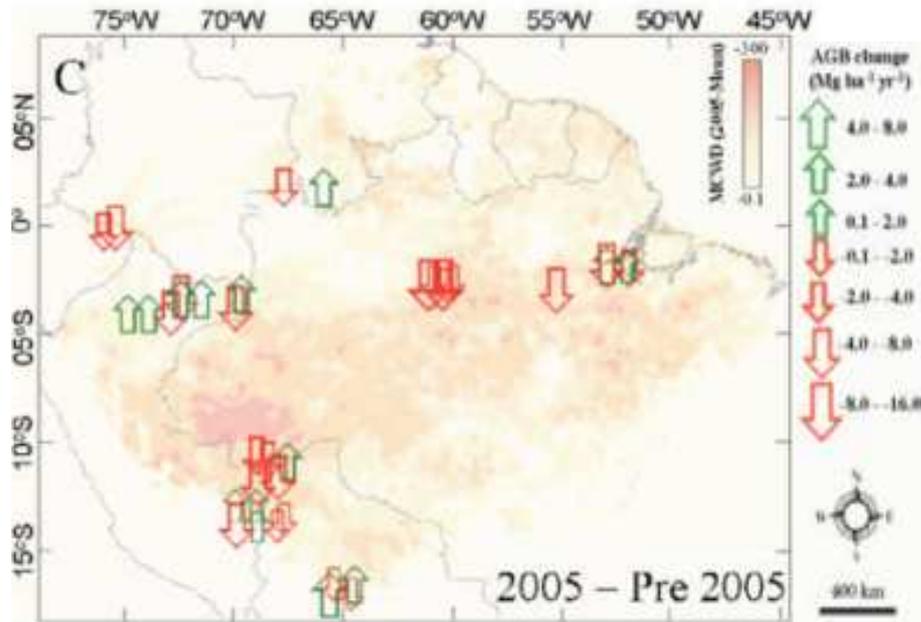
As conseqüências deste estresse hídrico foi objeto de várias pesquisas. Muitas delas mostraram que a seca causou perda de biomassa florestal (Figura 5), invertendo o processo de seqüestro de carbono que ocorreu nas décadas anteriores (PHILIPS et al., 2009a). Antes de 2005, 76%

das parcelas (93 de 123) ganharam biomassa, mas durante o intervalo da seca em 2005 apenas 51% teve incremento de biomassa (28 de 55), esta diferença é altamente significativa (PHILIPS et al., 2009b). Além disso, entre as parcelas que apresentaram maior déficit hídrico durante 2005, a taxa de biomassa lenhosa aérea diminuiu 2,39 Mg Cha/ano, enquanto àquelas parcelas que não sofreram estresse hídrico continuaram a ganhar 0,76 Mg Cha/ano (PHILIPS et al., 2009b). Isto mostra que durante a seca a taxa de sequestro de carbono pela vegetação viva diminui. Estes resultados mostraram o quanto a floresta tropical pode ser sensível a eventos extremos de seca.

E não somente isto, a limitação de água além de reduzir o crescimento pode colocar a floresta em risco de incêndios. Estudos indicam que em períodos de secas extremas os incêndios florestais podem atingir extensas áreas e com isso há significativas quantidades de carbono emitidas para a atmosfera. Isso sugere que os incêndios florestais têm desempenhando um papel significativo tanto como uma ameaça ao equilíbrio biológico da floresta quanto na perda de biomassa e aumento das emissões de gases de efeito estufa (SALDANHA et al., 2011).

Os incêndios ocorridos devido à seca de 2005 danificaram dezenas de milhares de áreas causando a morte de árvores e conseqüentemente a emissão de milhões de toneladas de gases de efeito estufa para a atmosfera (BROWN et al., 2006).

Uma síntese dos últimos resultados divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) indica que haverá, no decorrer deste século aumento de temperatura por todo o planeta, sendo mais severo sobre os continentes (IPCC, 2007). Isto pode indicar que eventos como estes pode aumentar a intensidade e freqüência de eventos extremos como este que ocorreu em 2005.



Nota: A escala de cores indica a intensidade da seca de 2005 relativa á média do período de 1998-2004.

Fonte: Philips et al. (2009).

Figura 5 - Mudança na biomassa acima do solo (AGB) na Amazônia.

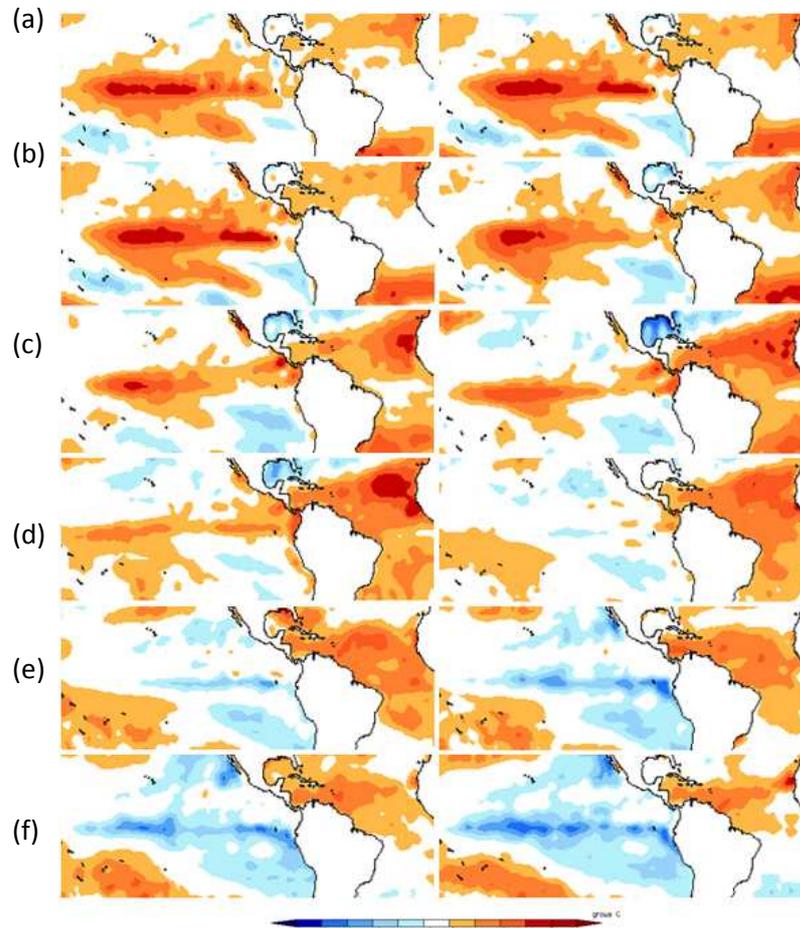
A seca teve um impacto total de 1,2 a 1,6 Pg C de biomassa, portanto, florestas da Amazônia parecem ser vulneráveis ao aumento do estresse hídrico podendo exercer um grande *feedback* sobre as alterações climáticas ao liberar carbono para a atmosfera (PHILIPS et al., 2009).

2.4. Seca de 2010

O ano de 2010 apresentou uma das mais graves secas na Floresta Amazônica, mais intensa que a seca de 2005. Níveis de água dos principais afluentes do Amazonas diminuíram drasticamente. Esta seca ocorreu durante o evento de EL NIÑO e foi intensificada pelo aquecimento do Atlântico tropical norte (MARENGO et al., 2011).

Em um artigo recente, Lewis et al. (2011) determinaram que cerca de 3,0 milhões de km² foram afetados pela seca em 2010, em comparação com 1,9 milhões de km² em 2005. Esta seca levou a um impacto no estoque de

carbono de 2,2 PgC. Na maioria dos anos, estas florestas são um sumidouro de carbono, a seca de 2005 e 2010 reverteram esta função (Figura 6).



Nota: (a) novembro-dezembro, (b) janeiro- fevereiro, (c) março-abril, (d) maio- junho, (e) julho-agosto, (f) setembro-outubro.

Fonte: Disponível em: <www.cptec.inpe.br>.

Figura 6 - Evolução da temperatura da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico tropical entre novembro de 2009 e outubro de 2010

De acordo com dados obtidos pelo MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), concluiu-se que 1,68 milhões de quilômetros quadrados de floresta apresentaram sinais de estresse hídrico ou diminuição da fotossíntese. Outras análises com base em coleta de medidas de precipitação concluiu que capacidade fotossintética diminuiu significativamente durante a seca de 2010 (XU et al., 2011).

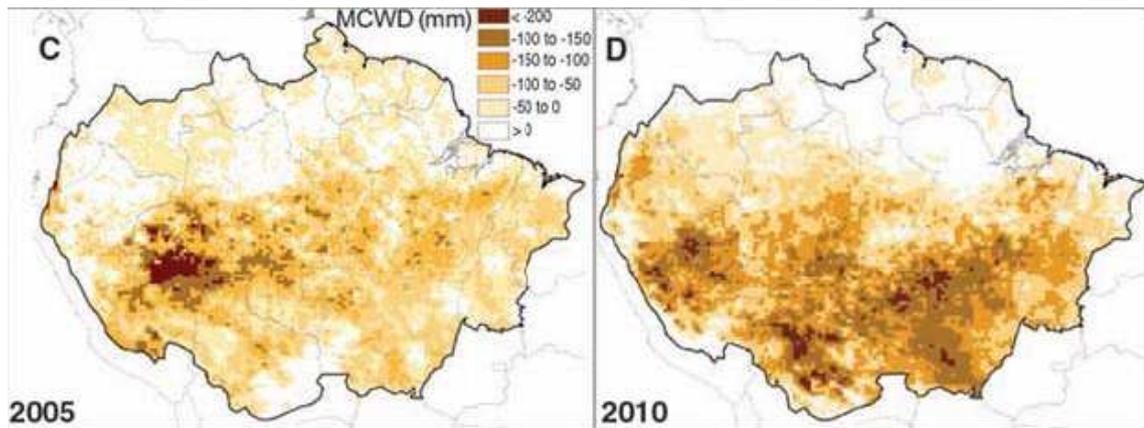
Uma das características mais importantes das regiões tropicais são as variações das precipitações em escalas interanuais e interdecadais, processos muito estudados na literatura científica (RONCHAIL et al., 2002; MARENGO, 2004).

MARENGO et al. (2011) analisaram a evolução a evolução das anomalias da temperatura da superfície do mar TSM no oceano pacífico e tropical desde novembro de 2009 a outubro de 2010 mostrando quais foram as causas deste evento. As áreas em vermelho indicam a ocorrência de temperatura acima da média, as áreas em azul representam o resfriamento abaixo da média.

A ocorrência do fenômeno El NIÑO, somado ao aquecimento do oceano atlântico tropical norte no início de 2010, trouxe como consequência a diminuição das precipitações na parte norte da bacia, afetando as vazões dos tributários do norte, principalmente o rio Negro (MARENGO et al., 2011). Esta análise sugere que o fenômeno El NIÑO, somado ao aquecimento do atlântico tropical, influenciou desfavoravelmente as cheias e recargas dos tributários da região norte durante o período chuvoso de dezembro de 2009 a março de 2010. A continuação do aquecimento do oceano atlântico tropical norte fez com que o fenômeno El NIÑO fosse substituído pela fase fria, o fenômeno La NIÑA. Esta situação climática durante o verão e outono favoreceu a ocorrência de estiagens severas nos tributários da calha sul do Rio Amazonas até outubro de 2010 (MARENGO et al., 2011).

Usando dados pluviométricos de uma década e tomando como referência a seca de 2005, Lewis et al. (2011) geraram um mapa que mostra que, em 2010, 57% da Floresta Amazônica teve chuva abaixo do normal. O índice é maior que o de 2005, quando em 37% da região ocorreram menos chuvas (Figura 7). Com base nesse dado, os cientistas calcularam ainda a emissão de carbono que a mortalidade de árvores causada pela seca pode provocar, e chegaram à conclusão de que 2010 também têm indicadores piores que 2005.

Em 2010, a diferença do MCWD (máximo déficit hídrico acumulado) (≤ -25 mm) para a média da década mostra que a mortalidade das árvores aumentou significativamente para 3,2 milhões de km² em comparação com a mortalidade de árvores que atingiu 2,5 milhões de km² em 2005.



Nota: Medida foi feita pela média dos 12 meses (outubro a setembro) dos anos 2005 (C) e 2010 (D) comparados com média dos últimos 10 anos (excluindo os anos da seca).

Fonte: Lewis et al. (2011).

Figura 7 - Gráfico da extensão de árvores mortas medidas por stress climático MCWD (acúmulo de água).

A seca de 2010 teve três epicentros no sudoeste da Amazônia, centro-norte da Bolívia e no Mato Grosso-Brasil .Esta seca mostra que as florestas intactas da Amazônia podem reverter o mecanismo de sumidouro de carbono e acelerar o aumento da emissão de dióxido de carbono na atmosfera (LEWIS et al., 2011).

Ainda, segundo Lewis et al. (2011), a ocorrência de duas grandes secas, separadas em um intervalo de 10 anos, pode compensar largamente o carbono absorvido pelas florestas intactas da Amazônia durante esse período. Se eventos como esses se tornarem mais freqüentes, a Floresta Amazônica chegará a um ponto crítico, no qual deixará de ser um valioso reservatório de carbono para se tornar uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (FALEIROS, 2011).

3. METODOLOGIA

Todas as fases de modelagem desta pesquisa foram desenvolvidas usando a plataforma de interface gráfica DINAMICA EGO. Esta plataforma foi desenvolvida para manipular um grande conjunto de mapas e para realizar modelagem espacial e simulações avançadas (SOARES et al., 2008). Nesta interface gráfica foi implementado o modelo CARLUC através do qual simulou-se a dinâmica da biomassa para 100 e 200 anos para a seca de 2005 e 2010 respectivamente (HIRSCH et al., 2004).

3.1. Descrição do modelo CARLUC

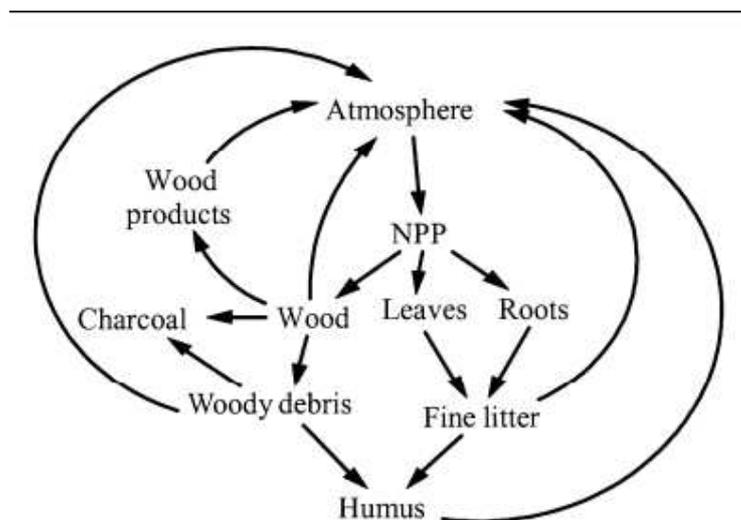
O CARLUC é composto de cinco submodelos:

- a) Produtividade primária da floresta, baseado no modelo 3PG, modelo de base fisiológica (LANDSBERG, 1997).
- b) Alocação e volume de carbono em florestas intactas baseadas em aproximações feitas pelo NASA-CASA (POTTER, 1998).
- c) Modelo ROTH-C, simula a decomposição de matéria orgânica morta (JENKINSON, 1990).
- d) Modelo *Carbon Bookkeeping Model*, WHRC (*Woods Hole Research Center*) que calcula a mudanças do estoque de carbono de acordo com as mudanças no uso da terra (HOUGHTON, 2000).

e) Mapas de mudança na cobertura do solo obtidos por imagens de satélite (HOUGHTON, 2000).

O modelo CARLUC foi desenvolvido com base na dinâmica do crescimento da floresta e ciclo do carbono para estimar o tamanho do reservatório de carbono terrestre em florestas de terra firme (não inundadas) de toda a Amazônia brasileira, foi projetado para mapear a quantidade de estoque de carbono na Floresta Amazônica.

No modelo CARLUC, o carbono entra na floresta através da produção primária líquida (NPP – *Net Primary Production*). Em seguida é alocado entre madeira, folha e raízes finas. Folhas e raízes finas eventualmente morrem e são adicionados ao modelo os detritos finos como reservatórios de carbono, a outra parte do carbono é transferido para o reservatório de madeira morta grossa. Os detritos finos (ou serrapilheira fina) e o detrito mais grosseiro (serrapilheira grossa) de matéria orgânica morta decompõem-se retornando uma parte do carbono para a atmosfera, enquanto o restante vai para o solo na forma de húmus que também se decompõe, porém, mais lentamente. A Figura 8 ilustra como é feita a distribuição do carbono para diferentes reservatórios.



Fonte: Hirsch et al. (2004).

Figura 8 - Diagrama do fluxo de carbono no modelo CARLUC (*Carbon and Land-Use Change*).

A composição e a estrutura de um ecossistema dependem basicamente da taxa de fixação de carbono e da taxa de mortalidade do ecossistema. A taxa de fixação de carbono em um ecossistema, ou produtividade primária líquida (NPP, sigla em inglês), é o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas, sendo igual à diferença entre a taxa de fotossíntese (GPP - *Gross Primary Production*) e a respiração autotrófica dos ecossistemas (RA), integrada ao longo do tempo ($NPP = GPP - RA$). A produtividade primária líquida também pode ser relacionada à troca líquida do ecossistema (NEE, sigla em inglês) e à respiração heterotrófica dos ecossistemas (RH) pela relação $NEE = NPP - RH$. A NPP é sensível a vários fatores de controle, incluindo aspectos relacionados ao clima, topografia, solos, planta, características microbianas, distúrbios e impactos antropogênicos (FIELD et al., 1995).

O modelo 3-PG calcula a NPP (Mg de matéria seca por hectare por mês, $1 \text{ Mg} = 1 \times 10^6 \text{ g}$) como uma fração constante da produtividade primária bruta (GPP), usando a razão NPP/GPP ($c_{pp} = 0,45 \pm 0,05$, adimensional) com base em estudos empíricos (HIRSCH et al., 2004).

No modelo, o esgotamento da água do solo e o déficit de pressão de vapor (DPV) influenciam, independentemente, o fechamento dos estômatos e, portanto, a produtividade é limitada pela restrição mais intensa de um dos dois fatores (HOUGHTON, 2000).

A Figura 9 ilustra a interação do carbono com os componentes da floresta. Durante cada passo a NPP será alocada entre os reservatórios de troncos, folhas e raiz, então, os reservatórios de carbono diminuem de acordo com diferentes taxas de decomposição e mortalidade, resultando em transferências de carbono para outros reservatórios e para a atmosfera, então, o carbono será realocado novamente na floresta completando o ciclo. O modelo restringe o incremento de carbono na biomassa quando índice de área foliar é demasiadamente extenso impedindo a entrada da luz solar na floresta. Se o índice de área foliar tende ao infinito, a NPP vai tender a zero. Isto é explicado na equação da NPP, pois conforme aumenta o índice de área foliar haverá pouca entrada de luz na floresta diminuindo o uso eficiente da energia solar. Então o modelo passa a limitar o crescimento da floresta até que não haja restrições para que a NPP seja máxima. Então, o modelo simula a

diminuição de biomassa exponencialmente com o passar dos anos até novamente atingir o equilíbrio. Esta condição do modelo pode ser melhor compreendida observando a equação (1) da produtividade primária líquida:

$$NPP = ckm \cdot fnr \cdot qe \cdot PAR \cdot fTEMP \cdot fAGE \cdot \min(fSW, fVPD) \cdot \left(1 - e^{-0.7 \cdot SLA \cdot c_{leaf}}\right)$$

em que NPP é produtividade primária líquida; ckm, fator de conversão = 0.012 kg C/mol C; fnr, razão entre NPP e GPP = 0.225; qe, eficiência quantum = 0.0275; PAR, radiação fotossinteticamente ativa; fTEMP, fator temperatura; fAGE, fator idade normalizado (adimensional) = 1; fSW, umidade do solo; fVPD, déficit de pressão de vapor; SLA, área específica da folha; e cLEAF, carbono estocado na folha.

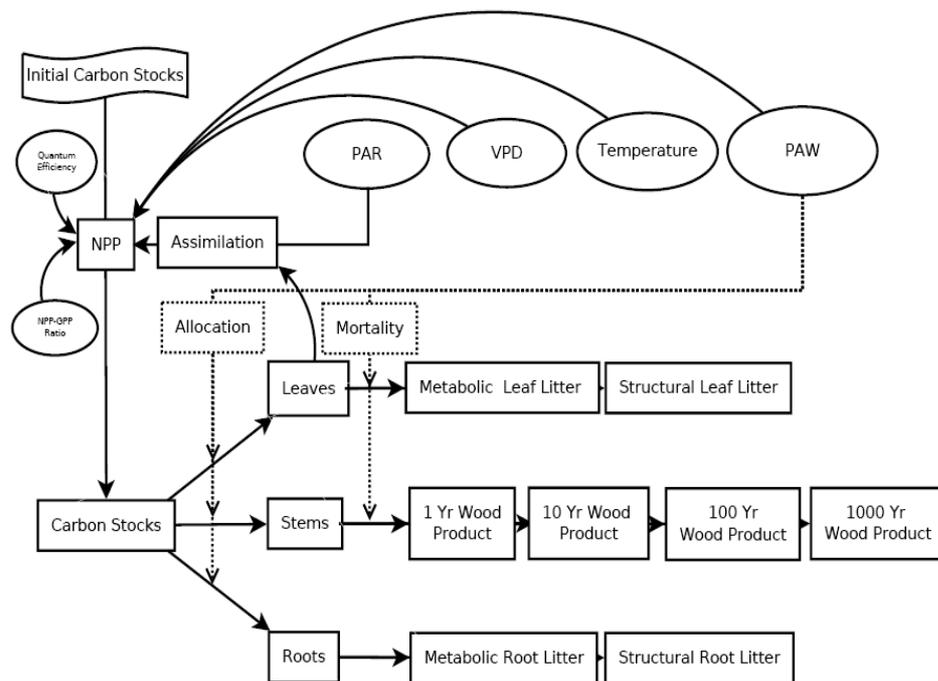


Figura 9 - Diagrama do CARLUC: demonstração do fluxo de carbono entre os reservatórios para uma única parcela de terra.

O fluxo de carbono entre a terra e a atmosfera é determinado pelo cálculo da variação no teor global de carbono terrestre (a soma dos 13 reservatórios de carbono) para cada simulação.

3.2. Descrição dos dados

Padrões climáticos mensais sobre a região Amazônica foram obtidos com base em dados de 280 estações meteorológicas distribuídas em toda a bacia através de um experimento realizado em Santarém por Brando et al. (2010) que foram utilizados como dados de entrada no modelo CARLUC.

Estes dados são: PAR, radiação fotossinteticamente ativa; TEMP, temperatura do ar; SW, umidade do solo; VPD, déficit de pressão de vapor; PAW, percentual máximo de água disponível para a planta.

Para o cálculo da perda de biomassa devido ao evento de seca para os anos de 2005 e 2010 foram usados mapas de perda de biomassa para os respectivos anos obtidos através de dados publicados por Lewis et al. (2011).

Lewis et al. (2011) padronizaram anomalias de precipitação calculados através de dados de 10 anos obtidos por imagens de satélite para a estação seca. Os dados são do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) com 0,25° de resolução para os 5,3 milhões de km² da Amazônia para os anos de 2005 e 2010. A pesquisa usou períodos de referência idênticos para permitir uma comparação rigorosa dos dois eventos de seca.

Com a obtenção destes mapas de perda, foi utilizado um mapa de biomassa obtido de um experimento realizado por Saatchi et al. (2007). Este mapa usado no modelo foi a referência de biomassa antes dos eventos de seca (Figura 10).

De acordo com os dados de SAATCHI et al. (2007) a biomassa aérea é maior na Amazônia Central e em regiões no leste e norte da floresta. A biomassa em média é acima de 300 Mg/ha com exceção de áreas de planície, intensa exploração madeireiras ou clareiras. Na Amazônia ocidental, a partir de áreas de terra baixa do Peru, Equador e Colômbia próximo as montanhas andinas, os intervalos de biomassa vão de 150 a 300 Mg/ha. Na maioria das florestas de transição e sazonais no sul e noroeste na borda da bacia, a biomassa varia de 100 a 200 Mg/ha.

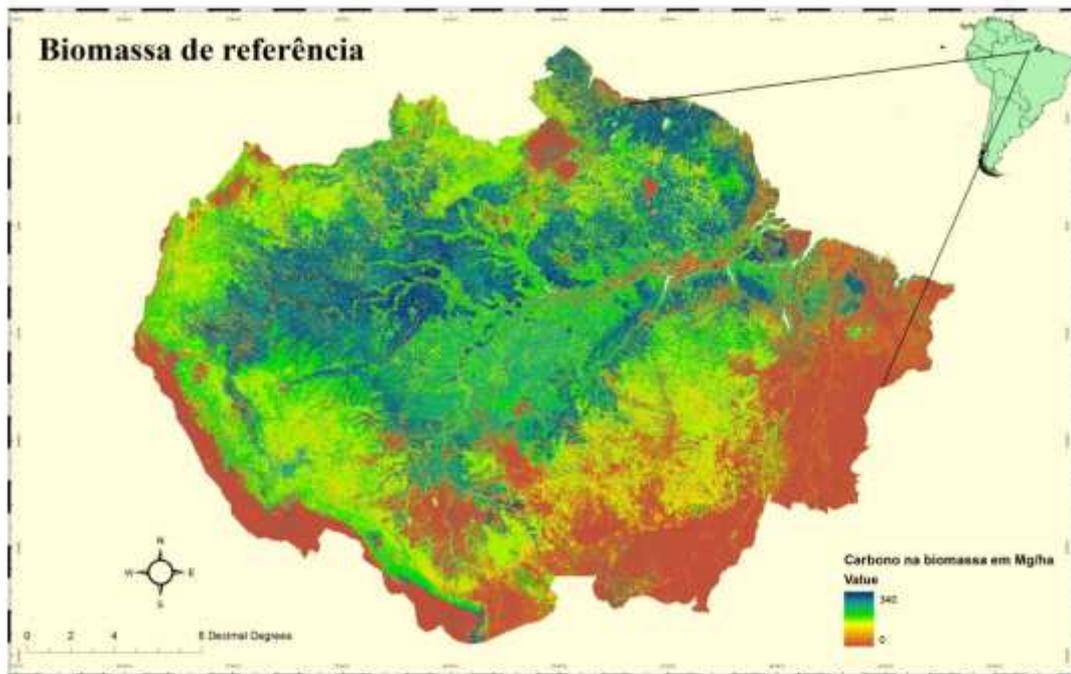


Figura 10 - Biomassa aérea para a Floresta Amazônica usada como referência em Mg/ha.

3.3. Descrição das fases da modelagem

Inicialmente foi simulado o crescimento da biomassa florestal para cinco anos com dados de clima de 1995 a 2005. As saídas do modelo correspondem aos vários componentes da floresta que contém carbono tais como:

Reservatórios de carbono:

- cleaf = carbono nas folhas
- cstem = carbono nos troncos
- croot = carbono nas raízes
- ccwd = carbono em restos de madeira Grossa
- chum = carbono no húmus
- cllmet = carbono em liteira metabólica
- cllstruc = carbono de liteira estrutural
- crlmet = carbono de serrapilheira metabólica de raiz
- crlstruc = carbono de serrapilheira estrutural de raiz

- c1 = decomposição em um ano (ex.: lenha)
- c10 = decomposição em 10 anos (ex.: papel)
- c100 = decomposição em 100 anos (ex.: madeira)
- c1000 = decomposição em 1.000 anos (ex.: carvão vegetal)

Todos estes mapas de saída do modelo estão no formato raster com resolução de 2 km x 2 km. As Figuras 11 e 12 ilustram dois exemplos de dados simulados pelo modelo representando a média da biomassa para tronco (*stem*) e folha (*leaf*) na qual foi aplicada a porcentagem de perda de biomassa.

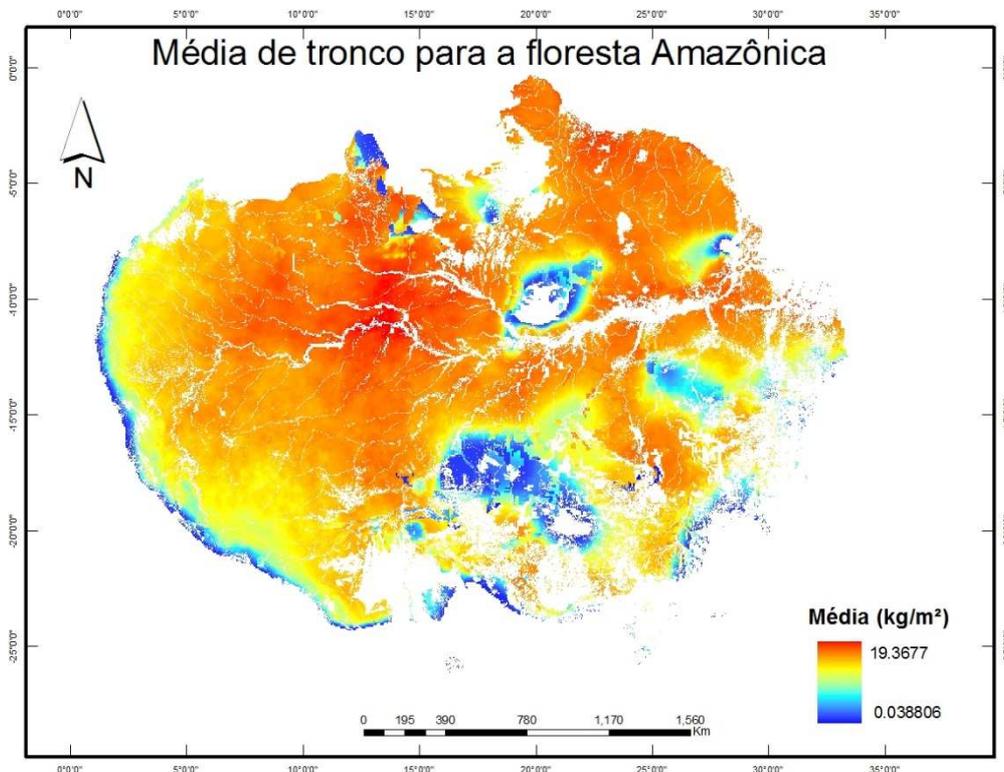


Figura 11 - Média de tronco para a área da Floresta Amazônica (*stem*), em kg/m².

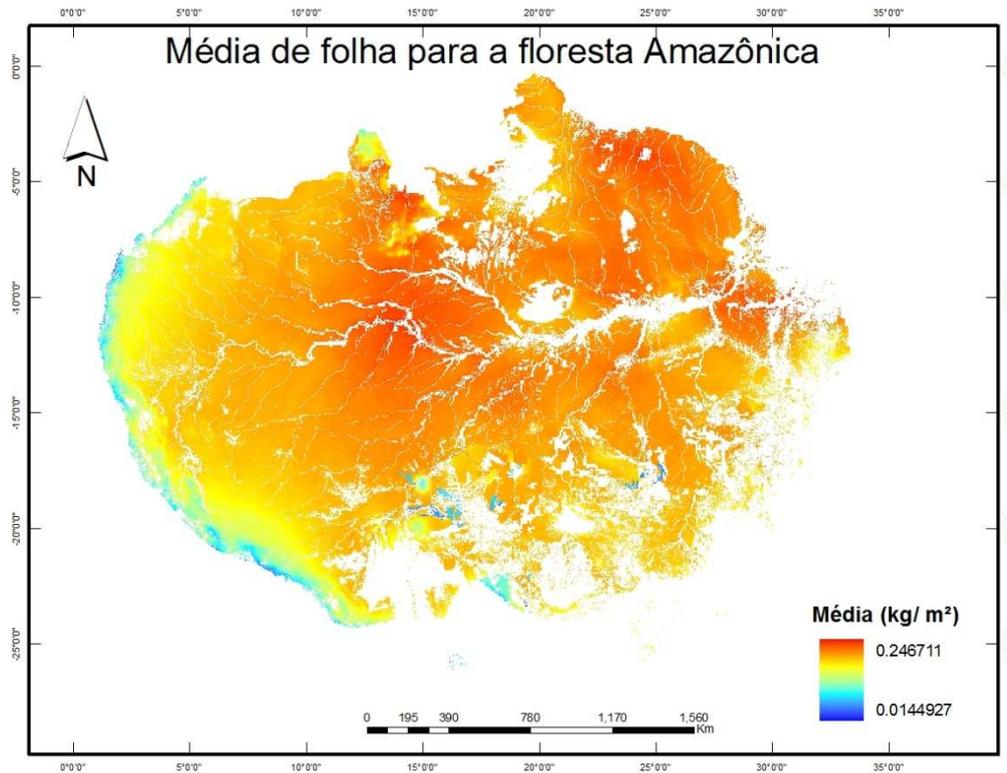
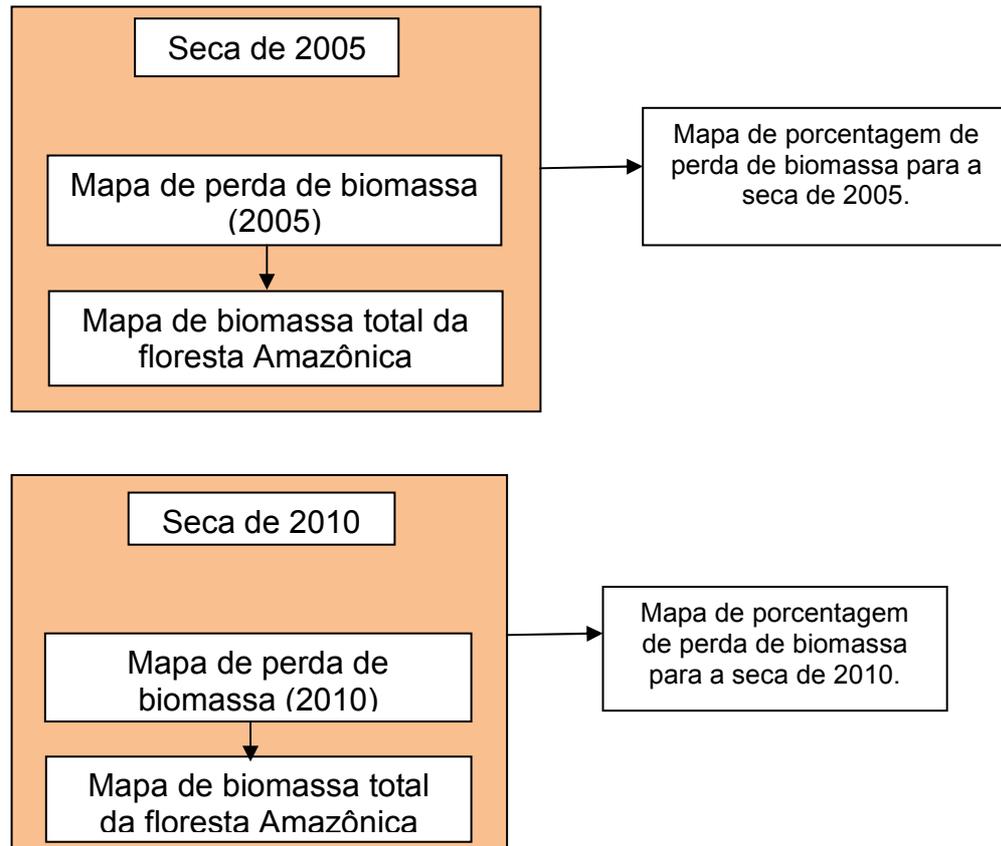


Figura 12 - Média de folha para a Floresta Amazônica (*leaf*) (kg/m²).

Para estimar a diminuição do estoque de carbono na floresta devido a seca foi calculado a perda de biomassa em porcentagem para as secas de 2005 e 2010 com o uso do mapa de biomassa total da floresta que foi usado como referência e dois mapas de perda de biomassa para os eventos de seca. Com isso, obteve-se um mapa de porcentagem de perda de biomassa um para 2005 e outro para 2010.

Devido a não padronização dos dados, foi feito o uso de porcentagem para fins de comparação de perda e ganho de biomassa.

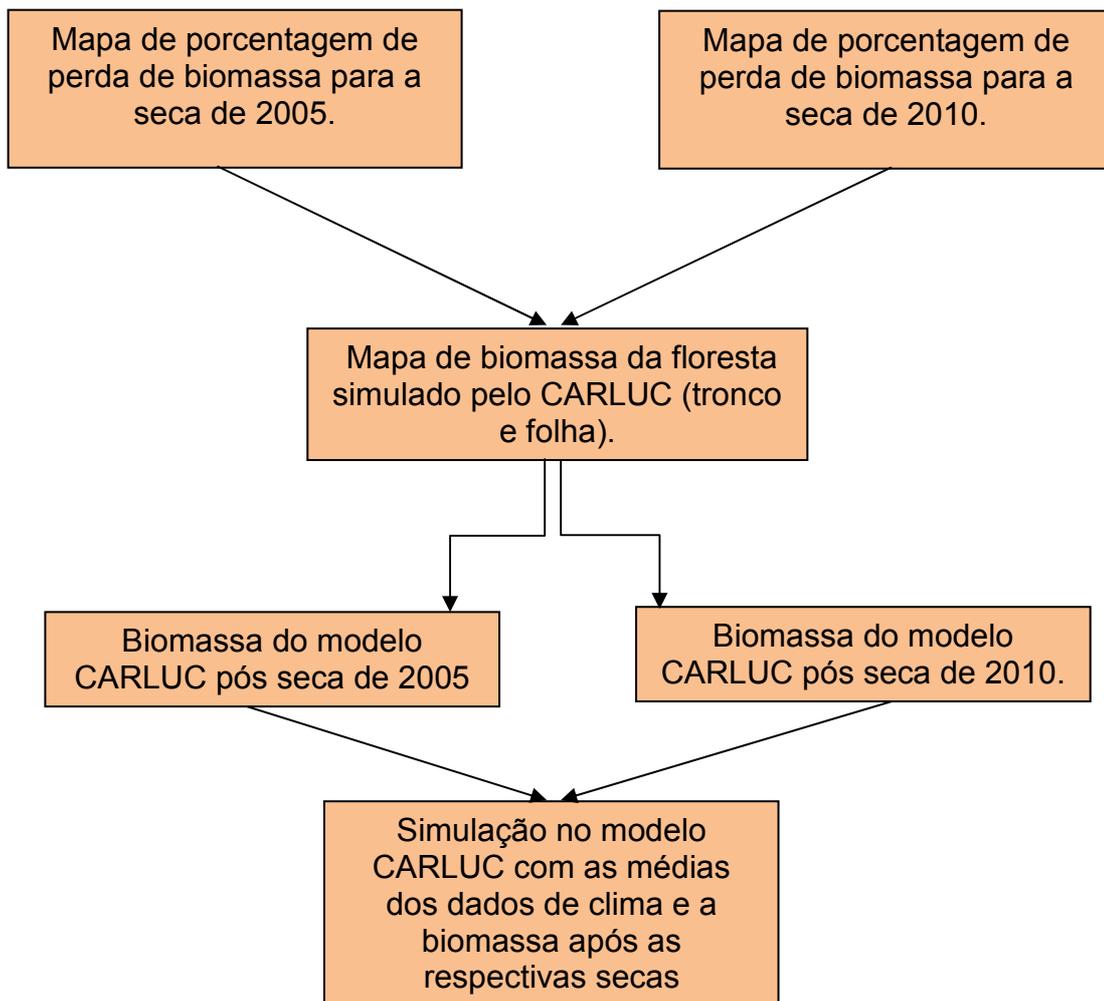
Esta porcentagem de perda foi aplicada nos mapas de biomassa de entrada do modelo CARLUC de folha (*leaf*) e tronco (*stem*). Nos outros mapas de entrada do modelo não foi aplicada a perda. Considerou-se apenas a biomassa aérea para a análise dos resultados, ou seja, 80% da biomassa da floresta ($cstem \cdot 0.80$).



Com estes cálculos, obtiveram-se quatro mapas:

1. Quantidade de carbono em cleaf pós seca de 2005;
2. Quantidade de carbono em cleaf pós seca de 2010;
3. Quantidade de carbono em cstem pós seca de 2005;
4. Quantidade de carbono em cstem pós seca de 2010.

O resultado deste cálculo foi usado como dado de entrada no modelo. Com a média do clima de 1995 a 2004 foram feitas simulações do incremento de carbono na biomassa por um período de 200 anos para a seca de 2005 e de 300 anos para a seca de 2010. A média das variáveis climáticas usada como entrada no modelo foi necessária para representar qual a resposta da dinâmica da biomassa florestal sob condições de clima médio sem eventos extremos.



4. RESULTADOS

4.1. Resultados simulados pelo CARLUC de biomassa de 1995 a 2005

Os resultados das simulações do incremento de carbono na biomassa simulados de 1995 a 2005 mostraram que a biomassa diminuiu gradualmente com o passar dos anos (Figura 13). Este comportamento é explicado devido a diminuição gradual também na quantidade de precipitação na floresta e conseqüentemente da quantidade de água disponível para as plantas (PAW) para este período conforme os dados das estações meteorológicas. O modelo CARLUC representa o clima, o comportamento da dinâmica do carbono na floresta, para este modelo, é mais sensível aos dados de PAW. O modelo simulou o incremento do carbono na biomassa conforme a disponibilidade hídrica que foi baixa para este período. A quantidade de carbono diminuída foi de 1% em relação a biomassa usada como referência para a floresta.

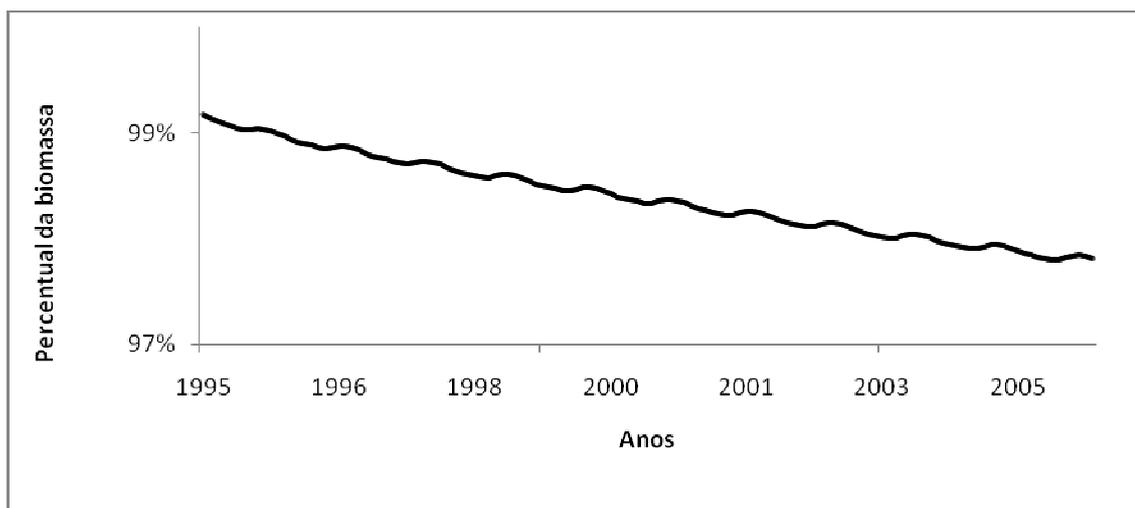


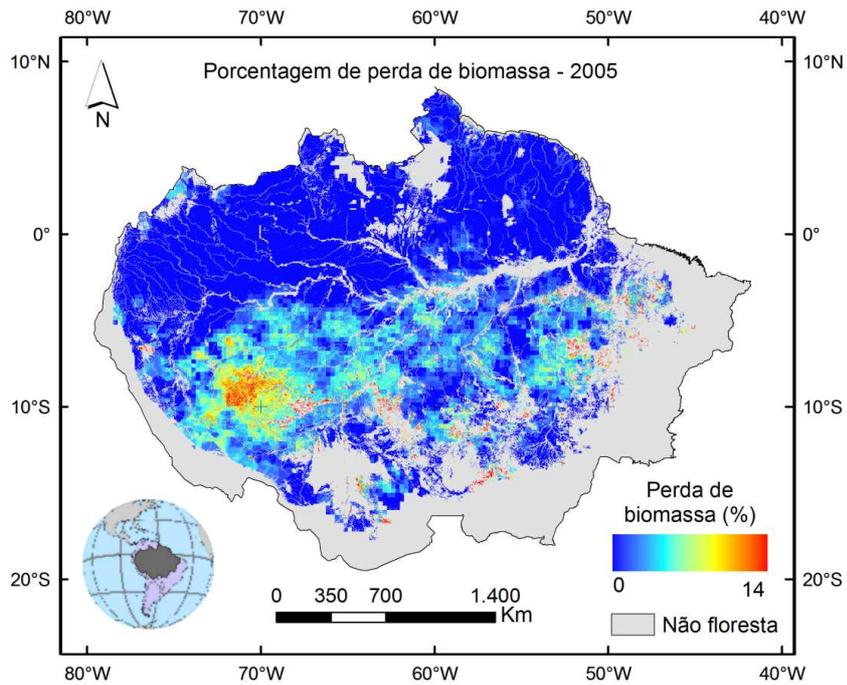
Figura 13 - Porcentagem de biomassa do CARLUC (1995 a 2005) em relação à biomassa referencial.

4.2. Mapa de porcentagem de perda para a seca de 2005 e resultados do CARLUC

A quantificação da porcentagem de perda de biomassa representada pela Figura 14 indica os locais atingidos pela seca. Observa-se que este evento afetou mais a parte sudoeste e sul da Amazônia evidenciando um epicentro sobre grande parte do estado do Acre onde a seca foi mais severa.

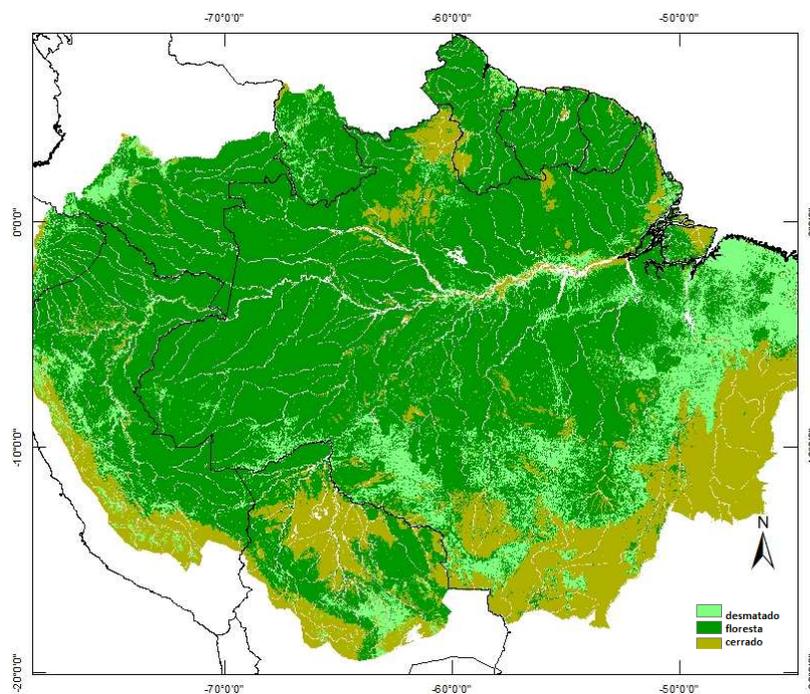
Os valores de porcentagem de perda para a seca de 2005 no mapa indicam que 85% dos locais atingidos pela seca tiveram em média uma diminuição no estoque de carbono de 3%. Os locais em que não há representação de cores no mapa indicando perda são áreas desflorestadas ou áreas de vegetação classificadas como cerrado de acordo com o mapa da Figura 15.

O resultado obtido com a simulação do modelo apresentado na Figura 16 mostra que foram necessários em média quatro anos para que o estoque de carbono na floresta retornasse ao valor inicial. Porém o tempo de recuperação local pode variar de 4 a até 34 anos de acordo com a intensidade da estiagem para cada lugar como mostra o mapa da Figura 18.



Nota: Tons na cor azul representam locais onde a seca foi mais intensa.

Figura 14 - Mapa de porcentagem de perda de biomassa (0 a 14%).



Fonte: Soares et al. (2007).

Figura 15 - Representação da cobertura de terra para a área da Floresta Amazônica para o ano de 2006.

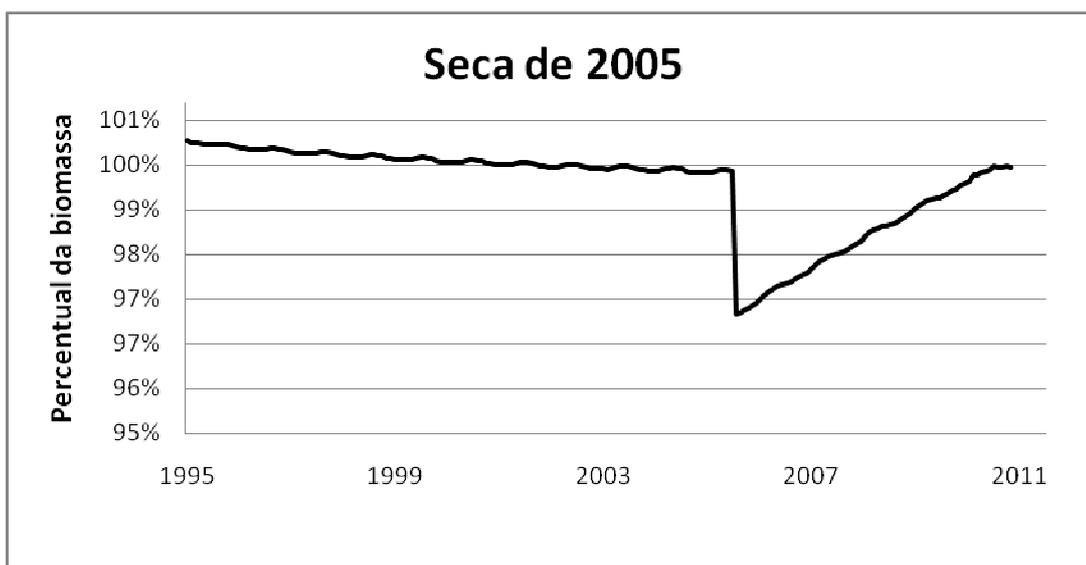


Figura 16 - Porcentagem de biomassa do CARLUC (2006 a 2025) em relação à biomassa de referência.

Este período de resiliência da floresta é para condições de clima médio simulado sem que houvesse a simulação de algum evento climático extremo. Os valores iniciais de biomassa não iniciam em 100% devido à diferença de biomassa entre os mapas utilizados.

Verificou-se que na simulação feita para 100 anos, até o ano 2047, mais de 90% das células do mapa já apresentavam recuperação total no estoque de carbono diminuído (Figura 17).

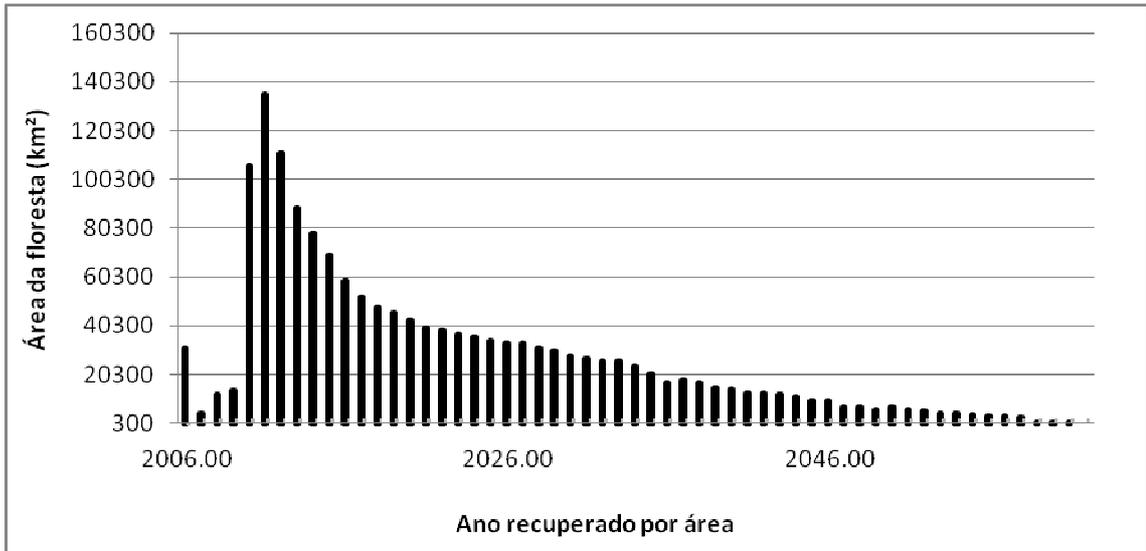
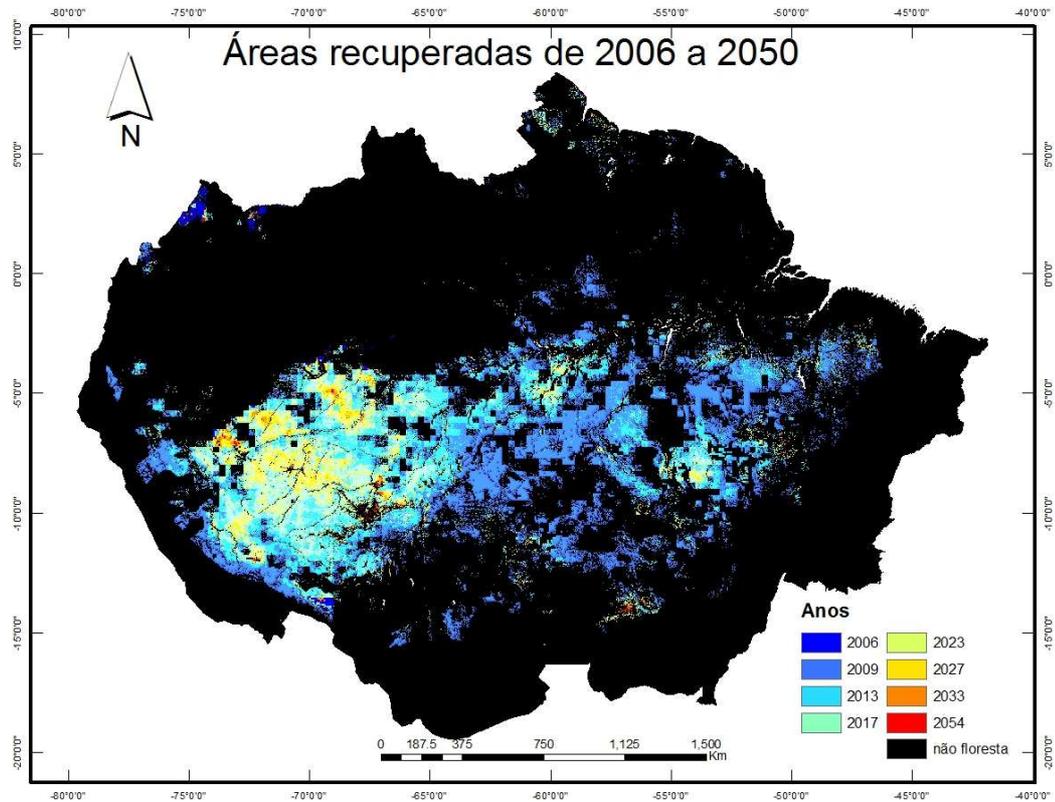


Figura 17 - Representação do período de recuperação para cada grupo de células do mapa (2006 a 2054).

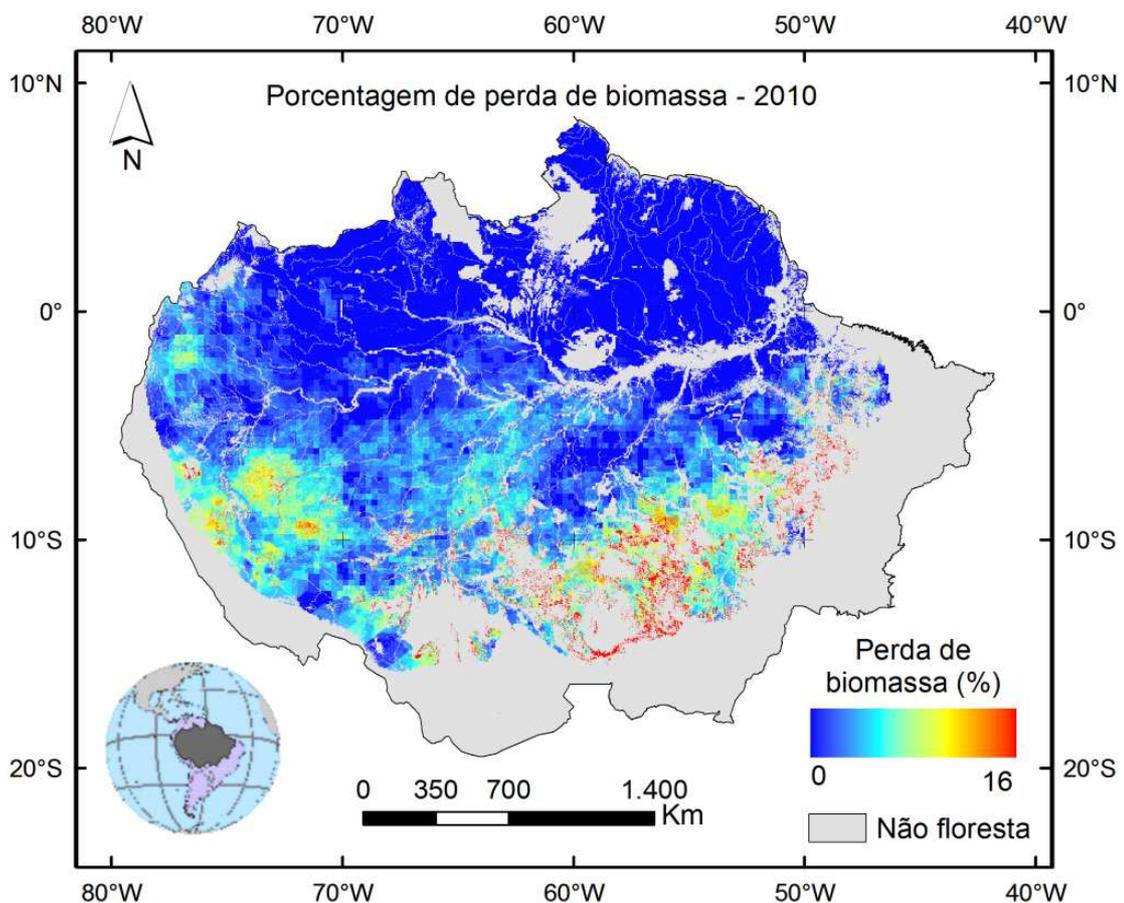


Nota: A escala de cores indica os anos de recuperação para cada local.

Figura 18 - Mapa das regiões afetadas pela seca de 2005 na Floresta Amazônica: simulação para 100 anos (2006 a 2054).

4.3. Mapa de porcentagem de perda para a seca de 2010 e resultados do CARLUC

O mapa de porcentagem de perda de biomassa para a seca de 2010 apresenta três epicentros (área com alta porcentagem de perda), onde houve maior diminuição do carbono na biomassa florestal (Figura 19), mostrando o resultado do impacto da seca. Observa-se que a distribuição das áreas atingidas pela seca é espacialmente maior em relação a seca de 2005, afetando não somente as bacias ao sul da Amazônia mas também áreas mais ao norte. Cerca de 86% da área da floresta afetada pela seca teve uma diminuição de 7% em sua biomassa conforme mostra as Figura 20 e 21.



Nota: Tons na cor azul representam locais onde a seca foi mais intensa.

Figura 19 - Mapa de porcentagem de perda de biomassa (0 a 16%).

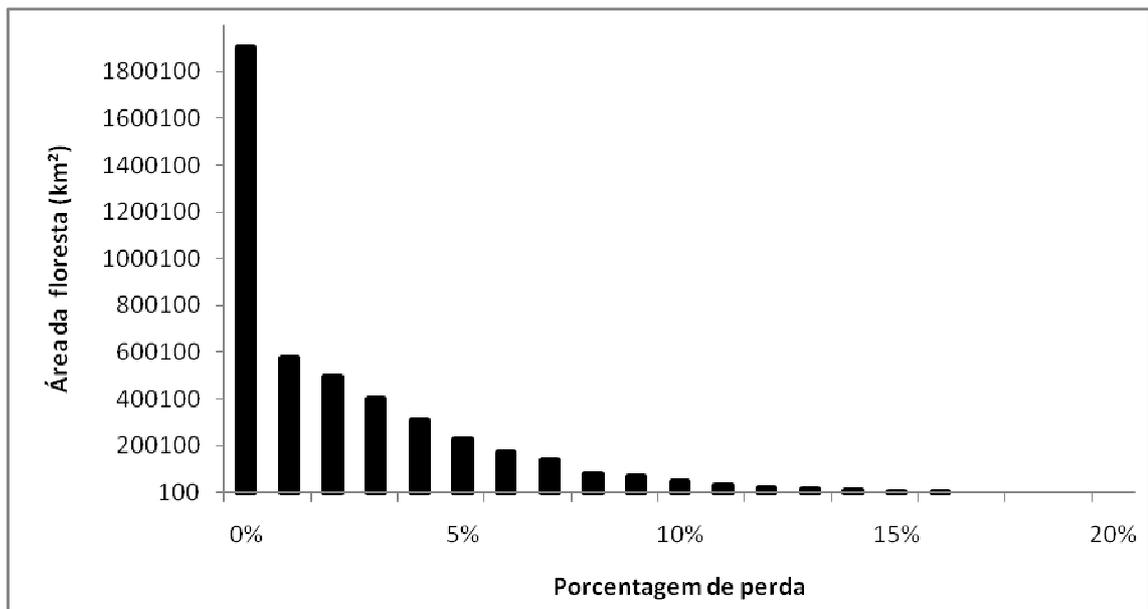


Figura 20 - Porcentagem de perda sobre as áreas atingidas pela seca de 2010.

Para a seca de 2010 foram feitas simulações para 200 anos.

Com a seca simulada no ano 2010 observa-se a porcentagem diminuída de carbono da floresta em comparação com a biomassa de referência. Os resultados da Figura 21 mostram que a floresta teve uma diminuição de 7% (média para toda a Amazônia) na quantidade de biomassa e levou cerca de treze anos em média para recuperar o estoque de carbono inicial. Estes valores variam de acordo com a localização das áreas afetadas, o que significa que houve locais onde a diminuição foi maior que 7% e a recuperação do estoque de carbono precisou de bem mais que treze anos.

A Figura 22 representa o período de anos que a floresta precisou para chegar ao valor da biomassa antes da seca. No gráfico, a diminuição da biomassa foi inserida no mesmo intervalo em que foi analisada a seca de 2005 para fins de comparação de qual evento foi mais intenso e qual o período necessário para recuperação da biomassa antes da seca de acordo com a intensidade do fenômeno.

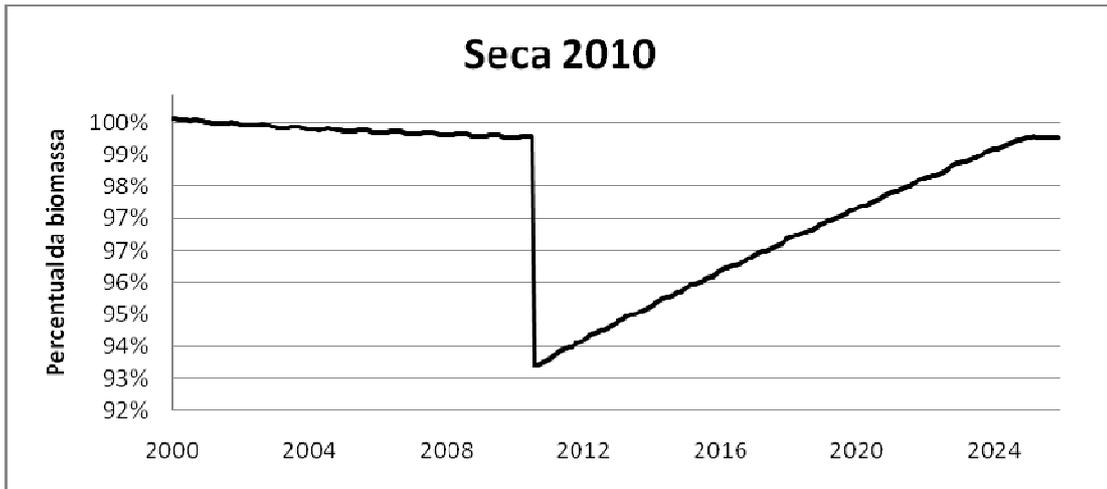
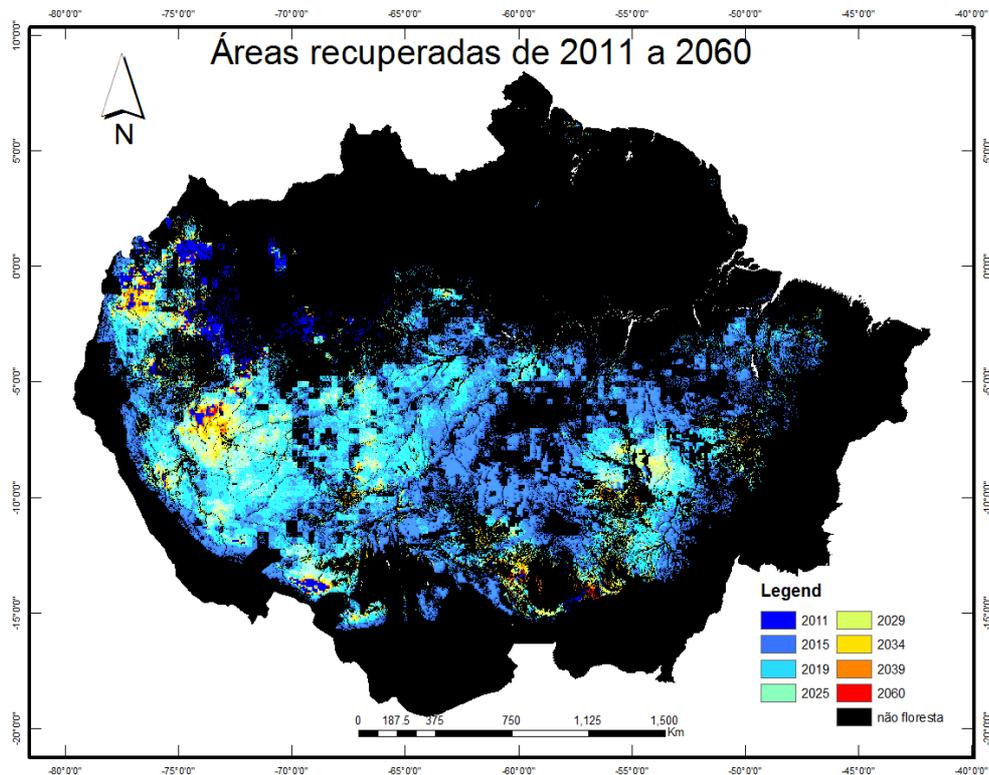


Figura 21 - Comportamento percentual da biomassa para a Floresta Amazônica (porcentagem de aumento de biomassa em relação à biomassa referencial para o período de 2000 a 2025).



Nota: A escala de cores indica a quantidade de anos para recuperação necessária em cada local da floresta (2011 a 2063). O modelo simulou a recuperação para 200 anos.

Figura 22 - Mapa das regiões afetadas pela seca de 2010.

5. DISCUSSÃO

Secas causam emissões potenciais de carbono para a atmosfera, porém, ainda não sabemos o efeito líquido destas emissões:

Através das simulações feitas com o auxílio do modelo CARLUC foi possível estimar o efeito potencial da seca sobre a floresta. Os resultados mostraram que com a seca a floresta perde uma grande quantidade de carbono para a atmosfera. A seca de 2005 levou a um impacto de 1,12 Pg de C na biomassa. As estimativas reais do processo de emissão para a atmosfera decorrente desse carbono nos anos subsequentes dependerá do balanço entre a taxa de decomposição das árvores mortas e o recrescimento da floresta em um dado período de tempo. A seca de 2005 foi mais intensa sobre a região do estado do Acre, segundo as simulações, esta área precisou de mais anos para recuperar a sua biomassa inicial. O modelo simulou que foram necessários 34 anos para que o estoque de carbono fosse recomposto em 99 % das áreas afetadas pela seca.

A seca de 2010 levou a um impacto de 2,0 Pg C na biomassa. A intensidade da seca de 2010 em relação à de 2005 é bem evidente nos resultados que mostraram que a área afetada pela seca de 2010 foi bem mais distribuída e o período de recuperação no estoque de carbono foi maior para este evento. Na seca de 2010 os epicentros observados estavam sobre o Mato Grosso, o centro norte da Bolívia e o Acre. Foram necessários cerca de 42 anos, segundo as simulações, para que o estoque de carbono retornasse ao

valor inicial em 99% das áreas atingidas pela seca de 2010. Este resultado da simulação pode representar a capacidade da floresta em resistir a dois eventos de seca em um intervalo de tempo tão curto. Com um segundo evento extremo de estiagem ainda mais intenso que o anterior, a floresta pode estar bem mais vulnerável pelo fato de que a seca de 2005 ainda estaria gerando seus efeitos sobre a vegetação e precisaria de muito mais tempo para se recuperar. A floresta submetida a estresse hídrico pode gerar uma série de fatores, desde a diminuição no seu crescimento até a mortalidade de árvores e queimadas.

Na prática, estes eventos extremos transformam a Floresta Amazônica em contribuidora de peso para as emissões de gases de efeito estufa fazendo com que a floresta precise de muitos anos para armazenar novamente o carbono emitido devido a morte das árvores.

Todos estes efeitos levam a emissão de CO₂ para a atmosfera. A quantidade de carbono que potencialmente será emitido pela floresta devido a seca pode levar décadas. Isto porque os efeitos não são imediatos, por exemplo, as árvores que morrem devido ao estresse hídrico levaram um tempo de decomposição prolongado liberando CO₂ para a atmosfera, portanto, a quantidade de carbono diminuída segundo as simulações, 3% e 7% para as secas de 2005 e 2010 respectivamente, pode ainda não representar o impacto do fenômeno sobre a floresta. E não somente isso, o fato de a seca diminuir a capacidade fotossintética da floresta em razão da estiagem faz com que a floresta diminua seu potencial de absorver carbono da atmosfera intensificando o efeito da seca sobre as mudanças climáticas com a não absorção de CO₂.

A explicação para a limitação no crescimento da biomassa devido a seca e conseqüentemente a diminuição do seqüestro de CO₂ da atmosfera ocorre porque, com a diminuição da precipitação na floresta tropical a assimilação de carbono diminui (PPL, produtividade primária líquida), e conseqüentemente a resposta para este cenário é a diminuição no crescimento da vegetação, se a vegetação não cresce, não há seqüestro de carbono.

Outras pesquisas mostram que secas podem levar a mortalidade de árvores, por exemplo, Philips et al. (2010) constataram que a mortalidade de árvores tropicais aumentou com a intensidade da seca: “As taxas de mortalidade tenderam a aumentar desproporcionalmente com os níveis mais

elevados de estresse hídrico”. Estes resultados representam a sensibilidade do bioma a secas extremas.

A possibilidade da Floresta Amazônica não resistir à mudança do regime de chuvas e ser substituída por um ecossistema de vegetação mais esparsa, do tipo savana, é outra consequência devido à seca. Uma das razões para esta hipótese se deve ao fato de que a seca aumenta a probabilidade de propagação de incêndios na floresta. Sob a indução do estresse hídrico, a seca sobre florestas intactas pode aumentar a queda de folhas gerando um acúmulo de serrapilheira. Esta serrapilheira acumulada secará devido ao aumento da insolação pela abertura do dossel (LAURANCE et al., 2001). Estas condições associadas à degradação da floresta, exploração madeireira intensa e o desmatamento podem aumentar o risco de incêndios (COCHRANE et al., 1999).

Forçantes de larga escala tais como desflorestamento e o aquecimento global podem mudar o clima da Amazônia para clima típico de savana com estações secas mais longas. Segundo Nobre (1991) há projeções de aumento de temperatura global, e os maiores valores deste aumento estão sobre a Floresta Amazônica. Esta tendência de aumento de temperatura à superfície é também devido ao desmatamento. Segundo Soares et al. (2005) somente para a Amazônia brasileira, o projeto Prodes (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, 2004) mensurou cerca de 100 mil km² de perda florestal. Dados desse projeto demonstram ainda que as taxas brutas de desmatamento, que atingiram 23 mil km²·ano⁻¹ entre o biênio 2002-2003, vêm se acelerando através do último quinquênio em cerca de 13% ao ano.

Estes resultados são preocupantes, pois o aumento da degradação e fragmentação da floresta poderá fazer com que estes locais sejam mais frágeis tornando-os mais vulneráveis quando submetidos a estiagem severa. Este pode ser o motivo do maior impacto da seca para algumas regiões. Mas ainda não há medidas de campo suficientes para explicar todos os efeitos.

Após a ocorrência da seca sobre a floresta outro efeito também é observado, em alguns pontos da floresta devido a mudança na cobertura vegetal em função da seca e das queimadas, que novas plantas podem se estabelecer enquanto as pré-existentes podem estar ou não crescendo. Então passa a haver competição por recursos limitados. O aumento na frequência de

secas intensas poderia atuar localmente no sentido de reduzir a resiliência da floresta e induzir a sua substituição por espécies típicas de savana dominada por gramíneas.

Para a seca de 2010 pesquisadores ainda tem muita incerteza quanto as características do solo nos epicentros onde o evento foi mais severo sobre o que poderia moderar ou aumentar o clima mais seco, há dúvidas sobre o que poderá acontecer se uma outra seca ocorrer (se poderá matar mais árvores já que estas podem estar mais vulneráveis) ou matar menor quantidade de árvores (já que devido a primeira seca estas, que podem ter sido mais vulneráveis e podem já estar mortas), há duvidas também se a seca diminui a respiração do solo (compensando temporariamente a fonte de carbono) (LEWIS et al., 2011).

Mesmo após a floresta ter recuperado o estoque de carbono inicial como nas simulações feitas, isto não significa que a composição da vegetação será igual ou semelhante a vegetação pioneira. A quantidade inicial pode ser recomposta, mas o modelo não simula qual tipo de vegetação poderá crescer no lugar da floresta primária o que pressupõe que pode haver modificações nas características da comunidade e mudanças direcionais na composição de espécies.

Para os locais onde o período de recuperação pode levar até mais de 50 anos são, por exemplo, (para algumas regiões) locais próximos a borda da floresta onde o desflorestamento é intenso e áreas fragmentadas de floresta que podem ser mais suscetíveis a incêndios com um clima mais seco e com isso a resiliência da floresta levará um período maior.

Nas simulações o crescimento quase linear da floresta pode ser explicado pelo fato de que não há limitação de disponibilidade hídrica no modelo, então a PPL não é limitada pela restrição de água no solo ou pelo déficit de pressão de vapor, por isso o incremento de carbono na floresta foi constante ao longo da simulação. Com a diminuição no estoque de carbono nos mapas de entrada de *stem* e *leaf* no modelo tenderam a retornar ao equilíbrio então o crescimento do estoque de carbono foi quase linear oscilando entre as estações secas e chuvosas.

Ainda há outras dinâmicas intrínsecas que não são representadas neste modelo, tais como variação da disponibilidade de nutrientes no solo,

dados de profundidade das raízes (para conhecimento dos reservatórios de água disponível para as plantas, competição entre espécies. Para simulações futuras, o modelo poderia ter representação de CO₂ para melhor entendimento da dinâmica da floresta em função do aumento e diminuição do carbono na atmosfera.

6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesta pesquisa mostraram como eventos extremos de seca podem alterar a quantidade de carbono estocado em florestas da Amazônia quando levamos em consideração a quantidade de água necessária para o crescimento da biomassa florestal.

Grande parte da floresta compensou a perda de carbono de forma rápida durante a simulação sem que houvesse restrição hídrica para a região, recuperando o crescimento em menos de cinco anos para alguns locais em ambos os eventos de seca. Também constatou-se que a intensidade da seca pode determinar o período que algumas áreas da floresta podem precisar para voltar ao equilíbrio, no caso a seca de 2010 que foi mais severa e precisou de 42 anos para recompor o estoque de carbono inicial. Para a seca de 2005 foram necessários até 34 anos, para algumas regiões recuperarem o carbono diminuído da biomassa. Estes dados simulados estimam o tempo de recuperação que a Floresta Amazônica pode precisar para retornar ao equilíbrio.

As consequências que um evento extremo de seca pode causar na floresta pode se prolongar por muitos anos, pois em casos de árvores mortas, o carbono estocado nestas árvores será emitido para a atmosfera a medida que estas decompõem prolongando então o efeito da estiagem. É importante lembrar que a recuperação do estoque inicial de carbono armazenado na Floresta Amazônica não indica que a floresta voltará a ter a mesma

diversidade de espécies arbóreas anterior. Mesmo sem intervenção humana alguma, apenas simulando o crescimento, pode ser que esta floresta tenha uma composição diferente da vegetação primária. Mas ainda são necessárias mais medidas de campo para estimar melhor a sucessão de espécies após eventos de seca.

O conhecimento de todos estes fatores é de grande importância para melhor entendimento sobre o que a seca pode causar na dinâmica da Floresta Amazônica, estas mudanças começam na inibição do crescimento da vegetação, mortalidade das árvores, queimadas, seleção de espécies resistentes, mudança na composição vegetal e competição entre espécies.

O fato de estes fatores estarem ligados diretamente ao fluxo de CO₂ mostra que qualquer alteração na dinâmica da floresta pode resultar em maior ou menor função de sumidouro de carbono pela vegetação e com o melhor entendimento desta dinâmica será possível projetar cenários futuros para a floresta prevendo o clima futuro não só local, mas também global e assim colaborar com projetos que visam à preservação da Floresta Amazônica e desaceleração das mudanças climáticas. Mas ainda são necessários mais estudos e pesquisas para que possam ser usados como dados de entrada em modelos ambientais para assim estimar o balanço de carbono da floresta em condições climáticas típicas e atípicas e com isso obter respostas para a consequência da mudança da composição atmosférica para o clima regional e global.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, L.E.O.C.; YADVINDER, M.; MARIA, R.C.; SAATCHI, L.O.A.; SHIMABUKURO, Y. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. L07701, 2007.

ARAÚJO, A.C. et al. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.**, v. 107, n. D20, p. 8090, 2002.

BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; PALUTIKOF, J.P. **Climate change and water**: technical paper of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2008. 210 p.

BETTS R.A.; MALHI, Y.; ROBERTS, J.T. The future of the Amazon: new perspectives from climate, ecosystem and social sciences. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 363, p. 1729-1735, 2008.

BRANDO, P.M.; NEPSTAD, D.C.; ERIC, A.D.; SUSAN, E.T.; DAVID, R.; PLÍNIO, C. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. **Phil. Trans. R. Soc. B**, 2007.

BROWN, I.F.; SCHROEDER, W.; SETZER, A.; MALDONADO, M.J.R.; PANTOJA, N.; DUARTE, A.F.; MARENGO, J. Monitoring fires in Southwestern Amazônia rain forest. **EOS, Transaction American Geophysical Union**, v. 87, n. 26, p. 253-264, 2006.

BUDOWSKI, G. Distribution of tropical American rain forest species in the light of successional process. **Turrialba**, v. 15, p. 40-42, 1965.

CERRI, C.E.P.; VALADARES, G.M.; KEITH, P. **Modelagem da dinâmica da matéria orgânica do solo**. v. 31, n. 2, 2006.

CHAGNON, F.; BRAS, R. Contemporary climate change in the Amazon. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. 1-4, 2005.

CHAMBERS, J.Q.; HIGUCHI, N.; TRIBUZY, E.S.; TRUMBORE, S.E. Carbon sink for a century. **Nature**, v. 410, p. 429, 2001.

CHAPIN, F.S.; SCHULZE, E.D.; MOONEY, H.A. The ecology and economics of storage in plants. **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, v. 21, p. 423-447, 1990.

CHARNEY, J.G.; QUIRKS, S.W.J.; CHOU, H.; KORNFIELD, J. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 34, p. 1366-1385, 1977.

CHOUDHURY, B.J.; DIGIROLAMO, N.E. A biophysical processbased estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data-I: model description and comparison with observations. **J. Hydrol.**, v. 205, p. 164-185, 1988.

CLARK, D.A.; CLARK, D.B. Climate-induced annual variation in canopy tree growth in a Costa-Rican tropical rain-forest. **J. Ecol.**, v. 82, p. 865-872, 1994.

COCHRANE, M.A. et al. Positive feedback in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. **Science**, v. 284, p. 1832-1835, 1999.

COE, M.; COSTA, M.; SOARES-FILHO, B.S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon river - land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hidrology**, 2009.

COOMES, D.A.; GRUBB, P.J. Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. **Ecol. Monogr.**, v. 200, p. 171-207, 2000.

COSTA, M.H. Incertezas no ciclo do carbono nos dias atuais e nos cenários do IPCC. In: CONFERENCIA REGIONAL SOBRE MUDANÇAS GLOBAIS, 3, 2007, São Paulo. **CD-ROM...** São Paulo, 2007.

COX, P.M.; BETTS, R.A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A.; TOTTERDELL, I.J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, v. 408, p. 184-187, 2000.

COX, P.M.; PHIL, P.H.; CHRIS, H.; RICHARD, A.B.; MATTHEW, C.; CHRIS, D.J.; TIM, E.J.; MARENGO, J.A. NOBRE, A.C. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, v. 453, p. 212-215, 2008.

CRAMER, W. et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. **Global Change Biol.**, v. 7, p. 357-373, 2001.

DAVIDSON, E.A.; ISHIDA, F.Y.; NEPSTAD, D.C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. **Glob. Change Biol.**, v. 10, p. 718-730, 2004.

DAVIDSON, E.A.; VERCHOT, L.V.; CATTANIO, J.H.; ACKERMAN, I.L.; CARVALHO, J.E.M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 53-69, 2000.

DICKINSON, R.E.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling tropical deforestation - a study of GCM land surface parameterizations. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, v. 114, n. 480, p. 439-462, 1988.

FALEIROS, G. **Seca de 2010 transformou Amazônia em emissora de carbono**. Disponível em: <<http://www.oecoamazonia.com/br/especiais/as-florestas-do-futuro/139-seca-de-2010-transformou-amazonia-em-emissora-de-carbono>>. Acesso em: 15 maio 2011.

FILHO, A.T.O. **Estrutura e dinâmica da vegetação**. Belo Horizonte: UFMG, s.d. (Curso de Ecologia da Vegetação).

FUNG, I.Y.; DONEY, S.C.; LINDSAY, K.; JOHN, J. Evolution of carbon sinks in a changing climate. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v. 102, n. 32, p. 201-211, 2005.

GATES, D.M. **Biophysical ecology**. Berlin: Spriger-Verlag, 1980. 611 p.

GENTRY, A.H. Tree species richness of upper Amazonian forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 85, p. 156-159, 1988.

GILVAN, S.M.; MANOEL, F.C.; NOBRE, C.A. Comparação entre a ocorrência de fogo durante a seca de 2005 e o el niño em 1998 na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4425-4429.

GÓMEZ-POMPA, A.G.; VÁZQUEZ-YANES, C.N., Successional studies of a rain forest in Mexico. In: WEST, D.C.; SCHUGART, H.H.; BOTKIN, D.B. (eds.). **Forest concepts and application**. New York; Springer-Verlag, 1981. p. 247-266.

GRAHAM, E.A.; MULKEY, S.S.; KITAJIMA, K.; PHILLIPS, N.G.; WRIGHT, S.J. Cloud cover limits net CO₂ uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v. 100, p. 572-576, 2003.

GRIMM, A.M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2-3, p. 123-138, 2004.

GRIMM, A.M. The El Niño impact on summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, p. 263-280, 2003.

GRIMM, A.M.; BARROS, V.R.; DOYLE, E.M.E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 13, p. 35-58, 2000.

HACKE, U.G.; SPERRY, J.S.; POCKMAN, W.T.; DAVIS, S.D.; McCULLOH, K.A. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. **Oecologia**, v. 126, p. 457-461, 2001.

HEYWOOD, V. (Ed.). **Global biodiversity assessment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

HOLDRIDGE, L.R. Determination of word plant formation from simple climatic data. **Science**, v. 105, p. 367.

HOLDSWORTH, A.R.; UHL, C. Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. **Ecological Applications**, v. 7, n. 2, p. 713-725, 1997.

HOUGHTON, R.A. Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions. In: MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S. (Ed.). **Tropical deforestation and climate change**. Woods Hole: The Woods Hole Research Center, 2005.

HOUGHTON, R.A.; LAWRENCE, K.T.; HACKLER, J.L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v. 7, n. 7, p. 731-746, 2001.

HUTYRA, L.R. et al. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.**, v. 112, 2007.

HUTYRA, L.R.; MUNGER, J.W.; NOBRE, C.A.; SALESKA, S.R.; VIEIRA, S.A.; WOFSY, S.C. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, 2005.

ICHII, K.; HASHIMOTO, H.; NEMANI, R.; WHITE, M. Modeling the interannual variability and trends in gross and net primary productivity of tropical forests from 1982 to 1999. **Global Planet. Change**, v. 48, p. 274-286, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite**: projeto Prodes. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes>>. 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Monitoramento da floresta**. São José dos Campos, 2004.

KAPPELLE, M.; GEUZE, T.; LEAL, M.; CLEF, M. Successional age and forest structure in a Costa Rica upper montane *Quercus* forest. **J. Trop. Ecol.**, v. 12, p. 681- 698, 1996.

KEELING H.; BAKER, T.R.; MONTEAGUDO, M.; VÁSQUEZ MARTÍNEZ, R.; PHILLIPS, O.L. Contrasting patterns of diameter and biomass increment across tree functional groups in Amazonian forests. **O. Ecologia**, v. 158, p. 521-534, 2008.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979.

KITAHASHI, Y.I.T.; MARUYAMA, Y.; KENZO, T.; KITAOKA, S.; MATSUKI, S.; CHONG, L.; NAKASHIZUKA, T.; KOIKE, T. Photosynthetic water use efficiency in tree crowns of *Shorea beccariana* and *Dryobalanops aromatica* in a tropical rain forest in Sarawak, East Malaysia. **Photosynthetica**, v. 46, p. 151-155, 2008.

KLEIDON, A.; HEIMANN, M. Assessing the role of deep rooted vegetation in the climate system with model simulations: mechanism, comparison to observations and implications for Amazonian deforestation. **Climate Dynamics**, v. 16, p. 183-199, 2000.

KLEIN, R.M. Ecologia da flora e vegetação do Vale do Itajaí. **Sellowia**, v. 32, p. 165-389, 1980.

KLINGE, H.; RODRIGUES, W.A. Biomass estimation in a central Amazonian rain forest. **Act. Cient. Venez.**, v. 24, p. 225-237, 1973.

KORNER, C. Through enhanced tree dynamics carbon dioxide enrichment may cause tropical forests to lose carbon. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 359, p. 493-498, 2004.

LAURANCE, W.F. et al. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. **Nature**, v. 428, p. 171-174, 2004.

LAURANCE, W.F.; WILLIAMSON, G.B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon, **Conserv. Biol.**, v. 15, p. 1529-1535, 2001.

LAURANCE, W.F.; FEARNside, P.M.; LAURANCE, S.G.; DELAMONICA, P.; LOVEJOY, T.E.; RANKIN-DE-MERONA, J.M.; CHAMBERS, J.Q.; GASCON, C. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology Management**, v. 118, n. 1-3, p. 127-138, 1999.

LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress**. II: Water radiation, salt and other stress. New York: Academic Press, 1980. 606 p.

LEWIS, S.L.; MALHI, Y.; PHILLIPS, O.L. Fingerprinting the impacts of global change on tropical forests. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 359, p. 437-462, 2004.

LEWIS, S.L. Tropical forests and the changing earth system. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 361, p. 195-210, 2006.

LEWIS, S.L.; BRANDO, P.M.; PHILLIPS, O.L.; VAN DER HEIJDEN, G.M.F.; NEPSTAD, D. The 2010 amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554, 2011.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G.D. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 363, p. 1811-1817, 2008.

MALHI, Y.; BAKER, T.R.; PHILLIPS, O.L.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ, E.; ARROYO, L.; CHAVE, J.; CZIMCZIK, C.I.; DI FIORE, A.; HIGUCHI, N. et al. The above-ground coarse woody productivity of 104 neotropical forest plots. **Global Change Biology**, v. 10, p. 563-591, 2004.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.R.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.J.; LI, W.; NOBRE, C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, p. 169-172, 2008.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L.E.O.C.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH, S.; McSWEENEY, C.; MEIR, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, p. 20610-20615, 2009.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. 31, p. 593-612, 1998.

MALHI, Y.R. et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 12, p. 1107-1138, 2006.

MARENGO, J.A. Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 22, p. 3236-3244, 2009.

MARENGO, J.A. Interdecadal variability and trends in rainfall in the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 79-96, 2004.

MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. L12703, 2011.

MARENGO, J.A.; NOBRE, A.C.; CHOU, S.C. **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. 2011.

MARENGO, J.A.; NOBRE, A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; CARDOSO, M.; OYAMA, M. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Biological Sciences**, v. 21, p. 1-6, 2008a.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.; SAMPAIO, G.; CAMARGO, H.; ALVES, L.M. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2008b.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **Drought in the Amazon forest**. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=50136&src=eoaiotd>>. Acesso em: 05 maio 2011.

NELSON B.W. **Fogo em florestas da Amazônia central em 1997**. Manaus: INPA, 2001.

NEPSTAD, D.; VERÍSSIMO, A.; MOUTINHO, P.; NOBRE, C. O empobrecimento oculto da floresta amazônica. **Ciência Hoje**, v. 27, n. 157, p. 70-73, 2000.

NEPSTAD, D.C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Climate**, v. 4, p. 957-988, 1991.

OBREGÓN, G.O.; NOBRE, C.A. **Variabilidade da estação seca na Amazônia**. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, 2006.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; PIMENTEL, L.C.G.; LANDAU, L. Avaliação da altura da camada limite atmosférica na região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto sob diferentes forçantes sinóticas via MM5. **Ciência e Natura**, v. 4, p. 353-356, 2005.

OLIVEIRA, P.H.F. et al. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus B**, v. 59, p. 338-349, 2007.

OLIVEIRA, R.S.; DAWSON, T.E.; BURGESS, S.S.O.; NEPSTAD, D.C. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. **Oecologia**, v. 145, n. 3, p. 354-363, 2005.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **AR4 - WGI Report**. Cambridge, 2007.

PANTOJA, N.V.; BROWN, I.F. Estimativas de áreas impactadas pelo fogo no leste do Acre associadas à seca de 2005. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009.

PHILIPS, O.L. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344-1347, 2009.

PHILIPS, O.L. et al. Drought–mortality relationships for tropical forests. **New Phytologist**, v. 187, p. 631-646, 2010.

PHILLIPS, O.L. The potential for harvesting fruits in tropical rainforests: new data from Amazonian Peru. **Biodiversity and Conservation**, v. 2, p. 18-38, 1993.

PHILLIPS, O.L. et al. **Changes in Amazonian forest biomass, dynamics, and composition, 1980-2002**. American Geophysical Union, 2009b. (Amazonia and Global Change Geophysical Monograph Series, 186).

POORTER, L.; McDONALD, I.; ALARCON, A.; FICHTLER, E.; LICONA, J.C.; PENA-CLAROS, M.; STERCK, F.; VILLEGAS, Z.; SASS-KLAASSEN, U. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. **New Phytologist**, v. 185, p. 481-492, 2010.

RAMAGE, C.S. **Monsoon meteorology**. New York: Academic Press, 1971. 296 p.

RONCHAIL, J.G.; COCHONNEAU, M.; MOLINIER, J.L.; GUYOT, A.G.; MIRANDA, C.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and tropical Atlantic Oceans. **International Journal of Climatology**, v. 22, p. 1663-1686, 2002.

SAATCHI, S.S.; HOUGHTONW, R.A.; ALVALÁ, R.C.S.; SOARES, Z.J.V.; YU, Y. **Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin**. São José dos Campos: INPE, 2007.

SALDANHA, V.S.; PHILIP, M.F.; PAULO, M.L.A. Mapeamento das áreas afetadas por incêndios florestais no sul do Amazonas e estimativas das emissões potenciais de carbono. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 8059.

SALDARRIAGA, J.G.; UHL, C. Recovery of forest vegetation following slash-and-burn agriculture in the upper rio Negro. In: GOMEZ-POMPA, A.; WHITMORE, T.C.; HADLEY, M. (Eds.). **Tropical rain forest: regeneration and management**. New York: Blackwell, 1991. p. 303-312.

SALESKA, S.R. et al. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 302, p. 1554-1557, 2003.

SALESKA, S.R.; DIDAN, K.; HUETE, A.R.; ROCHA, H.R. **Amazon forests green-up during 2005 drought**. 2007.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M.H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B.S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophys. Res. Lett.**, v. 34, p. 17, 2007.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SATYAMURTY, P.; COSTA, C. **Transporte de umidade na Amazônia e adjacências em 2005 e 2009**. Manaus: Universidade do Estado do Amazonas e Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia/Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2010.

SHIMABUKURO, Y.E.; KRUG, T.; SANTOS, J.R.; NOVO, E.M.; YI, J.L.R. Roraima: o incêndio visto do espaço. **Ciência Hoje**, v. 27, n. 157, p. 28-34, 2000.

SILVA, G.A.M. **Introdução a variabilidade de baixa frequência e teleconexões**. São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas/IAG/USP, 2010.

SILVA, R.R.; WERTH, D.; AVISSAR, R. Regional impacts of future land-cover changes on the Amazon basin wet-season climate. **J. Climate**, v. 21, n. 6, p. 1153-1170.2008.

SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTADE, D.C.; CURRAN, L. Cenários de desmatamento para a Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, 2005.

SOARES-FILHO, B.S.; RODRIGUES, H.O.; FALIERI, A.; COSTA, W.L. **Dinâmica EGO Tutorial**. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acesso em: 2008.

SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.M.; CERQUEIRA, G.C.; GARCIA, R.A.; RAMOS, C.; VOLL, E.; McDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p. 520-523, 2006.

SOMBROEK, W. Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall: consequences for the planning of agricultural occupation and the protection of primary forests. **Ambio**, v. 30, n. 7, p. 388-396, 2001.

TIAN, H.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; McGUIRE, A.D.; HELFRICH III, J.V.K.; MOORE III, B.; VÖRÖSMARTY, C. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. **Nature**, v. 396, p. 664-667, 1998.

TIMMERMANN, A.; OBERHUBER, J.; BACHER, A. et al. Increased el niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. **Nature**, v. 395, p. 694-697, 1999.

TOMASELLA, J.; MARENGO, J.A. **A seca de 2010 na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oecoamazonia.com/br/artigos/9-artigos/128-a-seca-de-2010-na-amazonia>>. Acesso em: 15 maio 2011.

TUCCI, C.E.M.; ALLASIA, D. **Base conceitual e termos de referência para elaboração e funcionamento do sistema de prognóstico hidroclimático**. Relatório final. Manaus: Organização do Tratado de Cooperação Amazônica, 2006.

TYREE, M.; SPERRY, J. The vulnerability of xylem cavitation and embolism. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, v. 40, p. 19-82, 1989

UHI, C.; BUSCHBACHER, R. A disturbing synergism between cattle ranch burning practices and selective tree harvesting in the eastern Amazon. **Biotropica**, v. 17, n. 4, p. 265-268, 1985.

UHL, C.; KAUFFMAN, B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. **Ecology**, v. 7, n. 2, p. 437-449, 1990.

VAN NIEUWSTADT, M.G.L.; SHEIL, D. Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, **Indonesia**. **Journal of Ecology**, v. 93, p. 191-201, 2005.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Recife, 2006.

VERSTRAETE, M.M.; DICKINSON, R.E. Modeling surface processes in atmospheric general circulation models. **Annals Geophysicae**, v. 4B, n. 4, p. 357-364, 1986.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 55 p.

VOLDOIRE, A.; ROYER, J.F. Tropical deforestation and climate variability. **Climate Dynamics**, v. 22, p. 857-874, 2004.

VON RANDOW, C. et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia, **Theor. Appl. Climatol.**, v. 78, p. 5-26, 2004.

VOURLITIS, G.L.; PRIANTE, N.; HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.D.; CASEIRO, F.T.; CAMPELO, J.H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resour. Res.**, v. 38, n. 6, p. 1094, 2002.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The regional evapotranspiration of the Amazon. **J. Hydrometeorol.**, v. 5, p. 100-109, 2004.

WHITMORE, T.C. Tropical rain forest dynamics and its implications for management. In: GÓMEZ-POMPA, A.; WHITMORE, T.C.; HADLEY, M. (Eds.). **Tropical rain forest: regeneration and management**. New York: Blackwell, 1991. p. 67-89.

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M.H.; SANGRAM, G.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, R.; MYNENI, B. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, 2011.

ZENG, N.; YOON, J.H.; MARENGO, J.A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C.A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J.D. **Causes and impacts of the 2005 Amazon drought**. 2008.

ZHAO, M.; STEVEN, W.R. **Terrestrial net primary production from 2000 through 2009**. 2010.