

Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola

Foto: Genei Dalmago



Genei Antonio Dalmago¹
Gilberto Rocca da Cunha¹
Anderson Santi¹
João Leonardo Fernandes Pires¹
Evandro Schweig²



Introdução

A agricultura, em geral, tem ocupado os ecossistemas naturais, modificando completamente sua estrutura. Com poucas exceções, tem ocasionado degradação dos mesmos, afetando não somente o seu entorno, mas também áreas distantes, pelo efeito sobre os grandes fluxos globais e/ou regionais, como aumento na emissão de gases e poluição das águas. Em função disso, é possível que, nessas condições, a eficiência de aproveitamento dos recursos naturais tenha sido baixa, e, por isso, tenha elevado a necessidade de uso de insumos externos ao ambiente para possibilitar a continuidade da produção agrícola. Essa dependência crônica compromete a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, seja pelo aumento da poluição ambiental, pela finitude destes recursos naturais, pela contaminação de alimentos, entre outros fatores.

Para melhorar a eficiência de exploração dos recursos do ambiente natural é necessário o conhecimento da potencialidade de produção biológica do mesmo. Isso pode ser alcançado com a avaliação da produção de biomassa da vegetação natural, a qual é a variável que melhor expressa a eficiência de uso dos recursos naturais de produção biológica. A produção de biomassa integra a complexidade de todos os fatores ambientais, numa condição de equilíbrio dinâmico. As relações entre a produtividade do ambiente natural e dos cultivos agrícolas permitem estabelecer uma

¹ Pesquisador da Embrapa Trigo. Rodovia BR 285, km 294, 99001-970, Passo Fundo, RS. E-mail: dalmago@cnpt.embrapa.br; cunha@cnpt.embrapa.br; anderson@cnpt.embrapa.br; pires@cnpt.embrapa.br.

² Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Passo Fundo. Bolsista de Iniciação Científica PIBIC/CNPq.

visão do efeito humano sobre o meio físico, através das definições da capacidade de apropriação humana desta produtividade primária.

Devido à diversidade do ambiente natural, há grande variabilidade em termos de produção de biomassa pela vegetação natural. Os casos extremos são as florestas e os desertos, nos quais se encontram a máxima e a mínima produção líquida. Entre esses extremos há grandes variações de tipos de vegetação, decorrente dos diversos fatores que contribuíram para sua formação. O conhecimento de quanto cada ambiente pode produzir de biomassa, em determinado tempo, pode ser obtido por meio de medições diretas, as quais são caras e demandam muito tempo, ou por meio de modelos de estimativa, que são mais simples de operacionalizar a busca desses dados.

A consideração das relações entre a produtividade primária líquida do ambiente natural com a produção agropecuária é importante para o planejamento e orientação adequada de políticas de uso e manejo de agroecossistemas, porque as mesmas integram, de forma eficiente, as interações entre os recursos naturais e os sistemas de produção agrícola. Para a condição do ambiente do Sul do Brasil, e do ambiente brasileiro como um todo, as relações entre a produção natural e dos sistemas de produção são escassas e fragmentadas. Também, pouco se conhece sobre a capacidade de apropriação humana da produtividade primária líquida do ambiente natural, por meio dos sistemas de produção agrícolas. A essência do entendimento dessas relações é a compreensão da pressão exercida pelos sistemas de produção agrícola sobre o ambiente.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sobre o tema da produtividade primária líquida do ambiente natural e sobre a capacidade de apropriação humana da mesma, por meio de sistemas de produção agrícola.

Produtividade Primária Líquida (PPL) do ambiente natural

A produtividade primária líquida (PPL) do ambiente natural (não antropizado) é definida como a diferença entre a fotossíntese e a respiração autotrófica da vegetação natural, por unidade de tempo e espaço (Field et al., 1995; Sun et al., 2004; Feng et al., 2007). É também conceituada como a quantidade de energia solar, convertida pelas plantas, em matéria orgânica pela fotossíntese (Imhoff et al., 2004). Através do processo de fotossíntese as plantas assimilam carbono da atmosfera, inserindo-o na sua biomassa e liberam parte do mesmo para a atmosfera quando respiram. Assim, a fotossíntese e a respiração são os dois processos mais importantes no ciclo biogeoquímico do carbono (Cao et al., 2004) e do balanço entre ambos, deriva a produção dos vegetais e o fluxo de energia nos ecossistemas (Haberl & Geissler, 2000).

A PPL é o principal indicador de “saúde” do ecossistema, de utilização dos recursos e do fluxo de carbono na biosfera, sendo de grande importância para estudos e para o equilíbrio ecológico (Cao et al., 2004). A acumulação de carbono pelas plantas (PPL) proporciona a energia que alimenta muitos processos bióticos no planeta, como microorganismos e outros animais, bem como a diversidade de organismos numa determinada zona ecológica (Potter et al., 2003). Em grande parte dos ecossistemas terrestres, a vegetação é responsável por grande parte das trocas de energia, matéria e momentum (quantidade de movimento) entre a superfície e a atmosfera (Sun et al., 2004).

A PPL é altamente variável no espaço e no tempo. A variação espacial está relacionada aos fatores de clima, distribuição da vegetação e uso do solo em uma região. Já as mudanças temporais estão relacionadas à variabilidade diurna e sazonal das condições de tempo e, em consequência, das respostas fisiológicas, bem como

das mudanças da composição da atmosfera, das mudanças climáticas e redistribuição dos ecossistemas (Cao et al., 2004). Mudanças no uso do solo, também alteram a produção ecológica dos ecossistemas terrestres, reduzindo ou aumentando a PPL dos mesmos (Haberl et al., 2004a). Entretanto, uma variabilidade interanual da PPL é esperada em todos os biomas (coeficiente de variação > 10%), decorrente das variações da taxa de fotossíntese, densidade de plantas, extensão espacial que a vegetação ocupa, tipo e idade da vegetação (Zhou et al., 2002; Mohamed et al., 2004). De acordo com Nemani et al. (2003) a PPL é capaz de integrar esses e outros fatores climáticos, ecológicos, geoquímicos e de influência humana sobre o planeta. Assim, a PPL se credencia como umas das principais variáveis para análise e avaliação de impactos e/ou de pressão sobre o meio natural, promovida pela ação antrópica, como a agricultura, em um determinado ambiente.

Fatores que determinam a Produtividade Primária Líquida (PPL) do ambiente natural

A PPL dos ambientes naturais depende de muitos fatores como a disponibilidade de nutrientes, tipo de clima, tipo de vegetação, alteração da concentração de poluentes atmosféricos, ações antrópicas, diversidade de fauna herbívora, entre outros (Field et al., 1995). No entanto, os mais importantes são os elementos climáticos, por seu efeito direto sobre a fisiologia das plantas, favorecendo ou restringindo as trocas gasosas e a assimilação do CO₂ atmosférico, ou por efeito indireto, afetando, por exemplo, ciclos de disponibilização de nutrientes, como o nitrogênio. De acordo com Field et al. (1995), essa afirmação é verdadeira, pois, num longo intervalo de tempo, todos esses fatores se ajustam em resposta ao clima, e tem sido assim há milênios, definindo o conceito de vegetação natural controlada pelo clima (Woodward, 1987, citado por Field et al., 1995).

Entre os elementos climáticos, os mais importantes, que determinam a produção da vegetação natural, são a temperatura do ar e a precipitação pluvial (Kercher & Chambers, 2001; Mohamed et al., 2004; Running et al., 2004) e, com menor destaque, a disponibilidade de radiação solar (Nemani et al., 2003). Segundo estudos realizados por Nemani et al. (2003) a disponibilidade hídrica limita o crescimento da vegetação em cerca de 40% da superfície terrestre, enquanto a temperatura do ar e a disponibilidade de radiação solar controlam o crescimento da vegetação em 33% e 27%, respectivamente, da superfície terrestre. Com relação a PPL, Knapp & Smith (2001), avaliando, no mínimo, 10 anos de PPL de 11 locais, encontraram variabilidade interanual da PPL de 20% a 30%, como resposta da vegetação a variação interanual da precipitação pluvial e da temperatura do ar.

No Hemisfério Norte, estudos, com imagens de satélite, que avaliaram a variação temporal da PPL, mostraram, durante o período avaliado, que a mesma apresentou correlação positiva com a temperatura do ar em latitudes elevadas (acima de 50°N), mas não em latitudes médias (20°-50°N). Nestas, a PPL esteve positivamente correlacionada com a precipitação (Cao et al., 2004). As correlações positivas entre temperatura e precipitação sugerem que, enquanto o aumento da precipitação indica condições favoráveis para crescimento da vegetação, a associação com temperatura elevada pode diminuir a eficiência de uso da água pela elevação da evapotranspiração e causar impactos negativos sobre o crescimento da vegetação (Mohamed et al., 2004). Segundo Epstein et al. (1997), quando a variável precipitação pluvial foi mantida constante houve uma relação negativa entre temperatura do ar e PPL para o caso de áreas naturais de campo. De acordo com Nemani et al. (2003), os elementos meteorológicos tendem a ser colimitantes. Enquanto os invernos frios e os verões quentes limitam o crescimento da vegetação nas elevadas latitudes do Hemisfério

Norte, o crescimento vegetal nunca é limitado nas áreas tropicais por temperaturas baixas, mas as áreas tropicais podem apresentar estação seca ou grande quantidade de nuvens que limitam a disponibilidade de radiação solar. O clima favorece uma série de variáveis biogeoquímicas e processos que regulam a disponibilidade de nutrientes para a PPL, mas não possibilita captar os efeitos de alteração antrópica sobre a vegetação natural (Field et al., 1995).

Quantificação da Produtividade Primária Líquida (PPL)

Vários estudos foram realizados, em escala global, para quantificar a PPL e analisar sua distribuição no Globo Terrestre (Vitousek et al., 1986; Melillo et al., 1993; Nemani, et al., 2003; Imhoff et al., 2004; Running et al., 2004). Também, são conhecidos trabalhos que avaliam PPL em escala regional, como aqueles realizados na China (Sun et al., 2004; Feng et al., 2007). Em ambas escalas verifica-se a utilização de modelos semelhantes para a estimativa de PPL e também se mantém o grau de variabilidade da PPL.

Na escala global as taxas anuais de PPL variam muito, em função dos modelos de estimativa utilizados. Porém, as maiores variações correm, principalmente, em consequência dos gradientes de temperatura e disponibilidade de água existente no planeta (Running et al., 2004). Exemplo desta variabilidade é o trabalho de Clark et al. (2001) que estimaram a PPL de florestas tropicais, a qual variou entre 170 a 2.170 gramas de carbono por metro quadrado ao ano ($\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$). Para biomas boreais, Scurlock & Olson (2002) encontraram variação da taxa de acúmulo de PPL anual da ordem de 20 a 1.160 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$. Segundo Running et al. (2004), em trabalhos de monitoramento de longa duração são comuns variações interanuais da PPL entre 20 e 30%, como resposta à variabilidade interanual da temperatura do ar e precipitação pluvial.

Em outro estudo Melillo et al. (1993) simularam a PPL anual, através de um modelo de representa o ecossistema terrestre e obtiveram resultados para diversos tipo de florestas encontradas no planeta. Os valores de PPL variaram entre 0 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ para a tundra, deserto e florestas xeromórficas, e 1.422 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ para florestas tropicais com folhas perenes. No caso de áreas campo, a PPL foi entre 72 e 756 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$, dependendo do porte da vegetação presente. Já para florestas temperadas decíduas e temperadas perenes, os valores variaram entre 81 a 978 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ e entre 322 e 1.001 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Esses resultados indicam alta variabilidade, conforme mencionado por Running et al. (2004), decorrente do fato que respostas globais representam uma mistura de diferentes respostas no nível dos biomas, as quais são complicadas de serem captadas, devido a variabilidade espacial e anomalias climáticas (Mohamed et al., 2004).

No Brasil as informações sobre PPL da vegetação natural são escassas, restringem-se apenas a trabalhos pontuais de pesquisa. A contribuição mais importante sobre o assunto, talvez, seja o trabalho de Britez et al. (2006), que contém uma coletânea de resultados sobre o mesmo. Nele, verifica-se que PPL anual da Floresta Ombrófila Densa secundária é de 507 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ (Ruschel et al., 1999, citado por Britez et al., 2006), enquanto na Floresta Ombrófila Densa de Terras baixas secundária é 1.558 $\text{g C m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ (Pedroni et al., 1998, citado por Britez et al., 2006). Estes são valores próximos daqueles encontrados em florestas com as mesmas características, em outras partes do mundo, considerando a alta variabilidade em informações desta natureza (Running et al., 2004).

Modelos de estimativa da Produtividade Primária Líquida (PPL)

Embora as medições diretas de PPL a campo sejam possíveis de serem feitas e representem o valor mais próximo desta variável são onerosas e exigem grande esforço de trabalho. Normalmente, requerem a destruição de áreas de vegetação superiores a 0,5 ha, cujo material vegetal é pesado e amostras do mesmo são levadas para estufas de secagem para fins de determinação da massa da matéria seca. Este procedimento deve ser feito considerando repetições para efeito estatístico e necessita ser feito, pelo menos, duas vezes no decorrer de um ano. Isso se torna viável apenas para algumas abordagens científicas, principalmente aquelas que visam estabelecer modelos de estimativa. Desta forma, foram desenvolvidos vários modelos que permitem a estimativa da PPL sem a necessidade de coleta de informações a campo, utilizando dados climáticos, pedológicos e/ou de sensoriamento remoto.

A grande variedade de modelos de estimativa da PPL, encontrados na literatura permite que os mesmos sejam classificados em grupos. Uma tentativa foi feita por Ruimy et al. (1994), que os classificou em três grupos: 1) modelos estatísticos; 2) modelos paramétricos; e 3) modelos de processos. Cada um desses grupos tem seus pontos fortes e limitações de acordo com Matsushita et al. (2004). Os modelos estatísticos são mais simples, mas limitados quanto às generalizações. Já os modelos paramétricos têm a vantagem de utilização de dados de sensoriamento remoto, especialmente em grande escala, mas perdem a ligação com alguns processos ecológicos críticos, pelo uso de relações empíricas e constantes. Por sua vez, os modelos de processos são baseados no conhecimento atual dos principais processos ecológicos e biofísicos, mas são altamente complexos, demandam grande capacidade computacional e são difíceis de calibrar (Matsushita et al., 2004).

Outra tentativa de agrupamento de modelos de estimativa de produtividade biológica da vegetação foi feita por Adams et al. (2004). Esses autores consideraram que os respectivos modelos podem ser divididos em dois grupos: os modelos biogeográficos ou correlativos e os modelos biogeoquímicos ou baseados em processo. A diferença entre eles é que os modelos biogeográficos consideram os tipos de plantas presentes em uma área, enquanto os modelos biogeoquímicos assumem uma distribuição constante da vegetação natural, ou seja, sem variação da mesma por efeito do tipo de plantas ou biomas. Ainda, os modelos biogeográficos usam a distribuição espacial de variáveis meteorológicas para definir quais tipos de plantas poderiam estar presentes num determinado *grid* do mapa de distribuição. Por outro lado, os modelos biogeoquímicos simulam processos bioquímicos da vegetação, como a fotossíntese e a respiração, utilizando dados do clima local (Adams et al., 2004), sendo, portanto, mais importantes para estudos detalhados, principalmente, para o entendimento do processo com todos os fatores associados.

Devido a essa diversidade de modelos é natural que se façam estudos no sentido de compará-los sobre uma única base de dados, com a finalidade de avaliação do seu desempenho. Uma comparação entre modelos de estimativa da PPL foi realizada por Cramer et al. (1999), testando 17 modelos de diferente natureza, quanto a sua construção, estratégia de modelagem e dados de entrada. As saídas dos mesmos mostraram alta variação sazonal entre eles, em escala global ou local, fornecendo várias indicações específicas de deficiência em alguns deles. Analisando a mesma saída de dados, Kicklighter et al. (1999) relatam que as diferenças entre estimativas da PPL variaram espacial e localmente, sendo que as maiores diferenças ocorreram durante os meses de verão na floresta boreal e durante a estação seca nas florestas tropicais perenes. As variações foram atribuídas às diferenças nos pressupostos dos modelos, à estrutura da vegetação, à parametrização dos modelos e ao conjunto de dados de entrada (Kicklighter et al., 1999).

Diante dessa diversidade de opções Kercher & Chambers (2001) fornecem um caminho que pode ser seguido. Segundo esses autores, os modelos de estimativa da PPL mais complexos devem ser preferidos quando o objetivo é descrever o tamanho da reserva de biomassa, a ciclagem ou a sazonalidade das trocas gasosas, no caso do carbono, por estimarem essas variáveis de forma mais adequada. Porém, quando o objetivo é estimar a taxa anual de incremento da PPL, os modelos mais simples, como os estatísticos, são eficientes. Isso ocorre porque os controles mais importantes da PPL no planeta são a água (precipitação pluvial) e a temperatura do ar, os quais controlam cerca de 40% e 33%, respectivamente, da PPL global (Running et al., 2004). A precipitação pluvial e a temperatura do ar governam a absorção da radiação fotossinteticamente ativa, que está associada à conversão do gás carbônico em matéria seca e esta, na produtividade primária líquida do planeta (Cramer et al., 1999).

O primeiro modelo empírico, usando uma regressão para relacionar a PPL anual à temperatura média anual e a quantidade de anual de precipitação pluvial foi o modelo Miami (Lieth, 1975, citado por Cramer et al., 1999). Ele é usado como linha base de comparação com outros modelos mais sofisticados e desenvolvidos recentemente. O modelo Miami é uma versão para estimativa da PPL através da temperatura média do ar anual e outra através da soma anual de precipitação pluvial (Lieth, 1973). Em ambos os casos, o modelo Miami assume que a PPL máxima é de $3.000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Esta mesma condição é assumida pelo modelo Montreal (Lieth & Box, 1972; Lieth, 1977), que estima a PPL com base no efeito combinado da temperatura e da precipitação pluvial, calculando a PPL em função da evapotranspiração.

Um aprimoramento destes modelos empíricos mais conhecidos foi proposto por Uchijima & Seino (1985). O mesmo é conhecido com o nome de Chikugo e calcula a PPL em função da radiação solar líquida e de um índice de seca de radiação, o qual representa o efeito combinado da radiação solar sobre a temperatura e evapotranspiração (Jiang et al., 1999). O modelo assume que a PPL na vegetação natural aumenta linearmente com o aumento anual da radiação líquida e que a proporcionalidade entre a radiação líquida e PPL diminui rapidamente com o aumento do valor do índice radiativo de seca. Este índice representa a divisão da radiação líquida pelo produto da precipitação pluvial e do calor latente de evaporação (Uchijima & Seino, 1985). O avanço deste modelo, em relação aos outros é a inclusão do elemento meteorológico da radiação solar, que é a fonte de energia para a produção biológica.

Um modelo alternativo para a estimativa da PPL de ambientes naturais é descrita por Esser et al. (1994), o qual é conhecido como Modelo Biosférico de Alta Resolução (MBAR). O mesmo utiliza o Modelo Miami (Lieth, 1973; Lieth, 1975, citado por Cramer et al., 1999) como sub-modelo e inclui o efeito da fertilidade do solo e da concentração de CO_2 . Do Modelo Miami, o MBAR assume o menor valor entre a PPL estimada com base na temperatura do ar ou com base na precipitação pluvial (Mcguire et al., 1993; Esser et al., 1994). Já, com relação à fertilidade do solo, o mesmo assume um fator, que é função do tipo de solo de acordo com a classificação da FAO (Esser et al., 1994). O diferencial deste modelo em relação aos demais é que o mesmo integra o efeito dos elementos meteorológicos com características químicas do solo, tentando integrar os processos que ocorrem na interface entre esses dois meios. Por esta razão é um dos modelos promissores no estudo da PPL do ambiente natural.

Existem outros modelos com aplicação potencial para estimativa da PPL do ambiente natural e que podem ser utilizados mediante a obtenção de outros conjuntos de dados. É o caso, por exemplo, do C-Fix, que é um modelo paramétrico do tipo Monteith que explora as relações entre radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelas plantas e a produtividade biológica (Chirici et al., 2007). O mesmo é a base de estimativa da PPL disponibilizada pelo Projeto GEOSUCCESS (Global Earth Observation in Support of Climate Change and Environmental Security Studies), que usa imagens do satélite

SPOT-VEGETATION S10 (SPOT VGT S10). Embora tenha uma base física forte e integre todas as alterações que um ambiente pode sofrer, apresenta limitações, como a maioria dos modelos que utilizam imagens de satélite para estimativa da PPL. A principal delas é que esses modelos apenas possibilitam conhecer a PPL de ambientes naturais existentes, mas não possibilitam, por exemplo, estimar a PPL potencial que existiu em um local que já foi completamente modificado pelo homem. Neste caso, os modelos tipo Miami, Montreal, Chikugo e MBRA são mais adequados para realizar estimativas, por possibilitarem estimativas em pontos, atualmente sem vegetação natural, com posterior espacialização das informações geradas.

Apropriação Humana da Produtividade Primária Líquida (PPL)

A estimativa da PPL potencial de um ambiente em estado natural ou já altamente antropizado, possibilita conhecer a capacidade real de produção que o mesmo possui. Muitos dos ambientes atualmente cultivados, certamente apresentam PPL superior ao que o mesmo apresentava naturalmente. Por outro lado, existem locais em que a PPL dos cultivos está bem abaixo do que o ambiente potencializa (Haberl et al., 2004a). A relação entre a produtividade biológica do ambiente natural e aquela produzida pelos diversos cultivos agrícolas fornece uma medida da capacidade que a agricultura tem de se apropriar do potencial produtivo de um local e, ao mesmo tempo, identificar as áreas com diferentes níveis de pressão da atividade agrícola sobre o ambiente. Neste sentido a capacidade de apropriação da PPL dá a idéia do limite do número de pessoas que a Terra ou um determinado local pode suportar, conhecida como capacidade de apropriação humana (Vitousek et al. 1986).

A capacidade de apropriação humana (AHPPL) é definida como a quantidade da PPL que é utilizada pelos seres humanos, como alimento, combustível, fibras, entre outros produtos (Vitousek et al., 1986). A maior ou menor apropriação humana da PPL é definida pelas forças socioeconômicas presentes num local ou de outros locais distantes da produção de alimentos, por exemplo (Haberl & Geissler, 2000). O aumento da AHPPL altera os fluxos de energia e matéria no ecossistema (Haberl & Geissler, 2000), levando a redução da diversidade de espécies nestes locais de alta apropriação (Haberl & Geissler, 2000; Haberl et al., 2004a). Nessas condições o potencial de risco sobre a biodiversidade aumenta podendo levar ao declínio do uso humano da PPL, se a demanda exceder muito a capacidade produtiva (Haberl et al., 2004b). Assim, a AHPPL é um importante indicador do impacto das atividades humanas sobre o ambiente, podendo ser também um orientador para políticas públicas ou ações privadas sobre os recursos naturais.

Estudos da metade da década de 1980, indicam que a apropriação humana dos produtos da fotossíntese, em escala global, é em média 40%, (Vitousek et al. 1986). Isso equivale a, aproximadamente, 40,6 bilhões de toneladas de PPL apropriada anualmente (Postel et al., 1996). Segundo Imhoff et al. (2004) a variabilidade da AHPPL no planeta é alta, com o mínimo de zero e um máximo muitas vezes acima da produção da PPL local.

Por outro lado, estudos mais recentes indicam que a AHPPL é cerca de 20% da PPL com variação entre 14 e 26% (Imhoff et al., 2004), valores abaixo dos encontrados por Rojstaczer et al. (2001), em que o valor médio apresentado pelos últimos autores é de 32%, com variação entre 5% e 55% da PPL. Dos cerca de 20% de AHPPL, apresentados por Imhoff et al. (2004), aproximadamente 13% da PPL é apropriada via utilização de madeira (papel mais combustível) e fibras e 7% na forma de alimentos, sendo 3% na forma de alimentos vegetais, 3,4% na forma de carnes, 0,5% na forma de leite e 0,1% através do consumo de ovos. Esses são números muito importantes, mas devem ser analisados em um contexto de escala regional para melhor visualizar

potenciais impactos, bem como para analisar a sua contribuição na busca da sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Considerações finais

Mesmo que haja alta variabilidade entre modelos de estimativa de PPL, dos valores de PPL e dos valores de AHPPL no planeta, o conhecimento dessa variação é importante que seja conhecida. Com tal conhecimento é provável que se identifiquem espaços para avanços significativos no processo produtivo de alimentos, fibras, energia e outros produtos de aproveitamento humano. Por outro lado, é necessário que se avance sobre bases sólidas de conhecimento, sob pena de intensificar a produção em áreas já sobrecarregadas (intensamente exploradas) ou altamente sensíveis à intervenção. A partir do momento em que a AHPPL é próxima do potencial natural ou mesmo ultrapassar esse limite, a sustentabilidade do sistema de produção agrícola, nas dimensões ambiental, social e econômica é comprometida. Tanto os limites, quando os espaços para se avançar, do ponto de vista do potencial ambiental, ainda são pouco conhecidos.

Referências bibliográficas

- ADAMS, B.; WHITE, A.; LENTON, T. M. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity. **Ecological Modelling**, v. 177, p. 353-391, 2004.
- BRITEZ, R. M. de; BORGIO, M.; TIEPOLO, G.; FERRETI, A.; CALMON, M.; HIGA, R. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na floresta atlântica do sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 165 p.
- CAO, M.; PRINCE, S. D.; SMALL, J.; GOETZ, S. J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial Net Primary Productivity 1981 – 2000. **Ecosystems**, v. 7, p. 233-242, 2004.
- CHIRICI, G.; BARBATI, A.; MASELLI, F. Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. **Forest Ecology and Management**, v. 246, n. 2/3, p. 285-295, 2007.
- CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. R.; NI, J.; HOLLAND, E. A. Net primary production in tropical forest: an evolution and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, p. 371-384, 2001.
- CRAMER, W.; KICKLIGHTER, D. W.; BONDEAU, A.; MOORETTI, B.; CHURKINA, G.; NEMRY, B.; RUIMY, A.; SCHLOSS, A. L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. **Global Change Biology**, v. 5, n. 1, p. 1-15, 1999.
- EPSTEIN, H. E.; LAUENROTH, W. K.; BURKE, I. C. Effects of temperature and soil texture on ANPP in the U.S. Great plains. **Ecology**, v. 78, n. 8, p. 2628-2631, 1997.
- ESSER, G.; HOFFSTADT, J.; MACK, F.; WITTENBERG, U. **High Resolution Biosphere Model (HRBM) - documentation model version 3.00.00**. Giessen: Justus-Liebig-University, 1994. 68 p.
- FENG, X.; LIU, G.; CHEN, J. M.; LIU, J.; JU, W. M.; SUN, R.; ZHOU, W. Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. **Journal of Environmental Management**, v. 85, n. 3, p. 563-573, 2007.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTRÖM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.

HABERL, H.; GEISSLER, S. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. **Ecological Engineering**, v. 16, p. 111-121, 2000.

HABERL, H.; SCHULZ, N. B.; PLUTZAR, C.; ERB, K. H.; KRAUSMANN, F.; LOIBL, W.; MOSER, D.; SAUBERER, N.; WEISZ, H.; ZECHMEISTER, H. G.; ZULKA, P. Human appropriation of net primary production and species diversity in agricultural landscapes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 102, p. 213-218, 2004a.

HABERL, H.; WACKERNAGEL, M.; KRAUSMANN, F.; ERB, K. MONFREDA, C. Ecological footprint and human appropriation of net primary production: a comparison. **Land Use Policy**, v. 21, p. 279-288, 2004b.

IMHOFF, M. L.; BOUNOUA, L.; RICKETTS, T.; LOUCKS, C.; HARRISS, R.; LAWRENCE, W. T. Global patterns in human consumption of net primary production. **Nature**, v. 429, p. 870-873, 2004.

JIANG, H.; APPS, M. J.; ZHANG, Y.; PENG, C.; WOODARD, P. M. Modelling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests. **Ecological Modelling**, v. 112, p. 275-288, 1999.

KERCHER, J. R.; CHAMBERS, J. Q. Parameter estimation for a global model of terrestrial biogeochemical cycling by an iterative method. **Ecological Modelling**, v. 139, p. 137-175, 2001.

KICKLIGHTER, D. W.; BONDEAU, A.; SCHLOSS, A. L.; KADUK, J.; MCGUIRE, A. D. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. **Global Change Biology**, v. 5, n. 1, p. 16-24, 1999.

KNAPP, A. K.; SMITH, M. D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. **Science**, v. 291, p. 481-484, 2001.

LIETH, H. Modeling the primary productivity of the world. In: LIETH, H.; WHITTAKER, R. H. (Ed.). **Primary productivity of the biosphere**. New York: Springer, 1977. p. 237-263.

LIETH, H. Primary production: terrestrial ecosystems. **Human Ecology**, v. 1, n. 4, p. 303-332, 1973.

LIETH, H.; BOX, E. Evapotranspiration and primary productivity. In: THORNTON, W. (Ed.). **Memorial model, publications in climatology**. New Jersey: C. W. Thornthwaite Associates, 1972. p. 37-46.

MATSUSHITA, B.; XU, M.; CHEN, J.; KAMEYAMA, S.; TAMURA, M. Estimation of regional net primary productivity (NPP) using a process-based ecosystem model: How important is the accuracy of climate data? **Ecological Modelling**, v. 178, p. 371-388, 2004.

MCGUIRE, A. D.; JOYCE, L. A.; KICKLIGHTER, D. W.; MELILLO, J. M.; ESSER, G.; VOROSMARTY, C. J. Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: a North American comparison between two global models. **Climatic Change**, v. 24, p. 287-310, 1993.

MELILLO, J. M.; MCGUIRE, A. D.; KICKLIGHTER, D. W.; MOORE III, B.; VOROSMARTY, C. J.; SCHLOSS, A. L. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, v. 363, p. 234-240, 1993.

MOHAMED, M. A. A.; BABIKER, I. S.; CHEN, Z. M.; IKEDA, K.; OHTA, K.; KATO, K. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). **Science of the Total Environment**, v. 332, p. 123-137, 2004.

- NEMANI, R.; LEELING, C. D.; HASHIMOTO, H.; JOLLY, W. M.; PIPER, S. C.; TUCKER, C. J.; MYNENI, R. B.; RUNNING, S. W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **Science**, v. 300, p. 1560-1563, 2003.
- POSTEL, S. L.; DAILY, G. C.; EHRLICH, P. R. Human appropriation of renewable fresh water. **Science**, v. 221, p. 785-788, 1996.
- POTTER, C.; KLOOSTER, S.; STEINBACH, M.; TAN, P.; KUMAR, V.; SHEKHAR, S.; NEMANI, R.; MYNENI, R. Global teleconnections of climate to terrestrial carbon flux. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 1-8, 2003.
- ROJSTACZER, S.; STERLING, S. M.; MOORE, N. J. Human appropriation of photosynthesis productions. **Science**, v. 294, p. 2549-2552, 2001.
- RUIMY, A.; SAUGIER, B.; DEDIEU, G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. **Journal Geophysical Research**, v. 99, n. 3, p. 5263-5383, 1994.
- RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, **BioScience**, v. 54, n. 6, p. 547-560, 2004.
- SCURLOCK, J. M. O.; OLSON, R. J. Terrestrial net primary production - a brief history and a new worldwide database. **Environmental Reviews**, v. 10, p. 91-109, 2002.
- SUN, R.; CHEN, J. M.; ZHU, Q.; ZHOU, Y.; LIU, J.; LI, J.; LIU, S.; YAN, G.; TANG, S. Spatial distribution of net primary productivity and evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve, China, using Landsat ETM+ data. **Canadian Journal Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 731-742, 2004.
- UCHIJIMA, Z.; SEINO, H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. **Journal Agricultural Meteorological**, v. 40, n. 3, p. 343-352, 1985.
- VITOUSEK, P. M.; EHRLICH, P. R.; EHRLICH, A. H.; MATSON, P. A. Human appropriation of the products or photosynthesis. **BioScience**, v. 36, n. 6, p. 368-373, 1986.
- ZHOU, G.; WANG, Y.; JIANG, Y.; YANG, Z. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's *Larix* forests. **Forest Ecology and Management**, v. 169, p. 149-157, 2002.



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: **Leandro Vargas**

Ana Lúcia V. Bonato, José A. Portella, Leila M. Costamilan, Márcia S. Chaves, Paulo Roberto V. da S. Pereira

Expediente

Referências bibliográficas: Maria Regina Martins

Editoração eletrônica: Márcia Barrocas Moreira Pimentel

DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R. da; SANTI, A.; PIRES, J. L. F.; SCHWEIG, E.
Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 11 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 100). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do100.htm>.