

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Ciências
ULisboa**

**Impactos das alterações do uso do solo nos fluxos de CO₂ na
União Soviética entre 1940 e 1960**

Érico Aboo Gani dos Reis

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Célia Marina Pedroso Gouveia (DEGGE-FCUL)
Ana Filipa Ferreira Bastos (LSCE/CEA)

2017

Agradecimentos

Apesar de não ser um grande apreciador de demonstrações formais de gratidão, deixo umas quantas linhas a algumas pessoas importantes na realização desta dissertação. O que não ficar aqui escrito será decerto exprimido em contextos, em minha opinião, mais apropriados. Em primeiro lugar, à Ana e à Célia por todo o apoio, conhecimento e auxílio que me ofereceram durante todo o processo da realização desta dissertação e ao longo da minha formação académica. Ao Prof. Carlos da Camara por me ter ajudado a encontrar a motivação e a visão necessária para ser bem-sucedido no meu progresso académico. Ao Prof. Miguel Brito pela compreensão e apoio em todos os momentos em que precisei do seu auxílio ou aconselhamento. Por fim, a todas as restantes pessoas com as quais me cruzei durante a minha formação académica na FCUL, independentemente do momento ou razão do nosso encontro. Qualquer uma dessas pessoas teve importância no meu percurso e, conseqüentemente, na realização desta dissertação.

Resumo

Dados observacionais de alta resolução temporal da concentração de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, obtidos através de ar aprisionado em gelo da Antártida, indicam uma estabilização dessa concentração ao longo da década de 1940, sugerindo um equilíbrio entre fontes e sumidouros de CO₂ durante esse período. No entanto, as mais recentes reconstruções dos diversos termos do balanço de carbono não permitem reconstruir essa mesma estabilização. Trabalhos recentes indicam que as estimativas do sequestro terrestre de CO₂ possam estar a ser subestimadas durante esse período (Bastos *et al.*, 2016). Entre outras razões, esta discrepância pode estar associada a alterações no uso e coberto do solo (*Land Use and Land Cover Change*, LULCC) não totalmente contabilizadas nas mesmas reconstruções.

A década de 1940 foi marcada pela 2ª Guerra Mundial e por drásticas alterações socio-económicas. Novos dados indicam um abandono substancial de áreas agrícolas em zonas de conflito na União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) que não foi considerado por Hurtt *et al.* (2011). Esta dissertação pretende avaliar a contribuição do abandono dos campos agrícolas indicado pelos novos dados para os fluxos de CO₂ entre atmosfera e biosfera. Em particular, pretende-se estimar o impacto dos dados em falta para o sumidouro terrestre necessário para explicar a estabilização de CO₂ atmosférico da década de 40. Para tal, procedeu-se à atualização dos dados de LULCC de Hurtt *et al.* (2011) utilizando os novos dados de área agrícola na URSS. Foram definidos diferentes cenários de transições ecológicas após abandono agrícola, e os fluxos de CO₂ nos ecossistemas serão calculados utilizando o modelo dinâmico de vegetação, ORCHIDEE-MICT (Zhu *et al.* 2015).

O cenário correspondente a um aumento do sequestro de carbono corresponde à substituição de áreas agrícolas por floresta. A diferença média anual que esse cenário apresenta face aos dados de referência para a década de 1940 é de 0.024 PgC/ano, sendo que a diferença máxima na mesma década é de 0.24 PgC/ano em 1941. Ao longo da década de 1940, este cenário conduz a emissões de CO₂ por LULCC 24 Tg/ano inferiores às estimadas usando os dados de Hurtt *et al.* (2011). Este valor corresponde a cerca de 6% do sumidouro terrestre adicional necessário para explicar o *plateau* de CO₂ atmosférico, indicando a necessidade de reconstruções mais detalhadas de LULCC a nível global de forma a caracterizar correctamente as emissões de CO₂ devido a LULCC.

Palavras-Chave: LULCC, URSS, 2ª Guerra Mundial, ORCHIDEE-MICT, sequestro de carbono.

Abstract

High resolution observational data of atmospheric carbon dioxide (CO₂), obtained from air entrapped in ice cores from Antarctica, indicate a stabilization of CO₂ concentration during the 1940s, suggesting a balance between sources and sinks of CO₂ during that period. The inability to reconstruct those observations using state-of-the-art reconstructions of the different terms of the carbon budget is likely due to the underestimation of the terrestrial CO₂ sink (Bastos *et al.*, 2016). Amongst other reasons, this difference may be associated with land use and land cover change (LULCC) processes not fully represented in those reconstructions.

The 1940s were marked by World War II, and dramatic socio-economic changes. A new dataset of crop area in the Union of the Soviet Socialist Republics (USSR) indicates strong abandonment of agricultural areas located on conflict regions, which is not taken into account on the commonly used

LULCC reconstruction by Hurtt *et al.* (2011). The aim of this dissertation is to assess the contribution of this reported cropland abandonment on CO₂ fluxes between atmosphere and biosphere during that period. For that purpose, Hurtt *et al.* (2011) data were updated using the new crop area information, and different post-abandonment scenarios defined. The corresponding CO₂ fluxes were evaluated using ORCHIDEE-MICT (Zhu *et al.*, 2015).

The scenario presenting a larger increase in CO₂ uptake was the one where most agricultural area was substituted with forest. The mean annual difference between that scenario and the reference data is 0.024 PgC/yr for the 1940s, with a maximum difference of 0.24 PgC/yr in 1941. During the 1940s, the average difference between this scenario and the one using Hurtt *et al.* (2011) data amounts to 24TgC/yr, which could explain about 6% of the additional terrestrial sink required to explain the plateau (Bastos *et al.*, 2016). These results highlight the need for more detailed datasets of LULCC in order to better represent CO₂ emissions from LULCC.

Keywords: LULCC, USSR, 2nd World War, ORCHIDEE-MICT, carbon sink.

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas.....	vii
Simbologia e Notações.....	viii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	5
2.1. O balanço de carbono global	5
2.2. Fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres.....	6
2.3. Avaliação de emissões por LULCC	8
2.4. Simulações dos fluxos de CO ₂ com um modelo de vegetação.....	11
Capítulo 3 – Dados.....	14
3.1. LUH/HYDE.....	14
3.2. Recolha bibliográfica de dados para a URSS.....	16
Capítulo 4 – Metodologia.....	18
4.1. Interpolação e atualização de dados agrícolas.....	18
4.2. Atualização de dados de floresta e herbáceas.....	20
4.3. Simulação dos fluxos de CO ₂ usando ORCHIDEE-MICT	21
Capítulo 5 – Resultados e Discussão.....	24
5.1. Atualização dos dados agrícolas.....	24
5.2. Atualização de dados de floresta e herbáceas.....	27
5.3. Simulação de fluxos de CO ₂ utilizando o ORCHIDEE-MICT	28
5.3.1. GPP e Respiração	29
5.3.2. Incêndios e Colheita Agrícola	30
5.3.3. NBP e Stocks C no solo	32
5.3.4. Análise espacial de NBP	33
5.4. Discussão e refinamento das simulações.....	35
Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	40
Referências Bibliográficas	42
Anexos.....	51

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Concentração atmosférica de CO ₂ medida em ar aprisionado em gelo de Law Dome (Antártida) e respectivas incertezas. O período correspondente ao <i>plateau</i> está salientado entre as linhas verticais cinzentas. (Bastos <i>et al.</i> , 2016)	3
Figura 2.1 – Representação esquemática dos principais processos biofísicos e biogeoquímicos nos ecossistemas terrestres (Bonan, 2008).....	7
Figura 2.2 – Comparação entre simulações de F _{LULCC} líquido por diferentes estudos (Hansis <i>et al.</i> 2015).....	9
Figura 2.3 – Ilustração das diferenças entre <i>net</i> e <i>gross</i> LULCC segundo (a) Stocker <i>et al.</i> 2014 e (b) Fuchs <i>et al.</i> 2015.	10
Figura 3.1 – Diagrama esquemático dos <i>inputs</i> , <i>outputs</i> e decisões do modelo utilizado na construção dos dados LUH/HYDE (Adaptado de Hurr <i>et al.</i> 2011).	15
Figura 3.2 – Dados de área agrícola total para o território da URSS entre 1913 e 1961, provenientes das bases de dados LUH/HYDE (a preto) e Anna Peregon (pontos verdes).....	16
Figura 3.3 – Comparação entre a variação (em % relativa ao ano de 1940) dos dados de população, produto interno bruto e área agrícola na URSS entre 1913 e 1961, a partir de diferentes fontes (Harrison, 2000; Bolt & van Zanden, 2014).....	17
Figura 4.1 – Mapa do território ocupado pela URSS no ano de 1941, destacando as áreas ocupadas pelos países atuais. A linha a negro indica o meridiano de 50°E, que limita a leste a zona da URSS onde se realizaram as atualizações aos dados LUH/HYDE (zona a Oeste da linha).	18
Figura 4.2 – Fluxograma ilustrativo da metodologia utilizada na atualização dos dados agrícolas LUH/HYDE através dos dados de Anna Peregon.	19
Figura 4.3 – Esquema ilustrativo da atualização dos dados agrícolas em cada pixel.....	20
Figura 4.4 – Esquema ilustrativo dos três cenários considerados para a reposição (por floresta e herbáceas) das áreas agrícolas retiradas na atualização. São consideradas <i>net</i> LULCC.	20
Figura 4.5 – Evolução temporal da concentração atmosférica global de CO ₂ utilizada como forçamento para o modelo ORCHIDEE-MICT.....	22
Figura 5.1 – Comparação da diferença das áreas agrícolas totais para o território da URSS entre dados LUH/HYDE e dados AP (<i>ΔCROP</i>) com a área agrícola total presente na URSS a Oeste de 50°E. Nos anos em que <i>ΔCROP</i> é superior à área presente nessa zona, a atualização dos dados estendeu-se ao restante território da URSS.....	24
Figura 5.2 – Distribuição espacial da área agrícola a retirar dos dados LUH/HYDE, em fração da área de cada pixel, para o ano de 1940.	25
Figura 5.3 – Distribuição espacial de área agrícola (em fração da área de cada pixel) na URSS antes (à esquerda) e depois (à direita) da atualização dos dados LUH/HYDE, para o ano de 1940.	25
Figura 5.4 - Distribuição espacial de área agrícola de tipo C3, em fração da área de cada pixel, na URSS antes (à esquerda) e depois (à direita) da atualização dos dados LUH/HYDE, para o ano de 1940.....	26
Figura 5.5 – Comparação entre áreas agrícolas totais para o território da Rússia (à esquerda) e Bielorrússia (à direita) atuais através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregon (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).	26
Figura 5.6 – Distribuição espacial das áreas de floresta (à esquerda) e herbáceas (à direita) adicionadas em cada cenário (C1, C2 e C3, de cima para baixo), em unidades de fração face à área representada por cada pixel, para o ano de 1940.	27
Figura 5.7- Áreas totais ocupadas por florestas, herbáceas e agricultura nos mapas considerados nas simulações do modelo ORCHIDEE-MICT.....	28
Figura 5.8- Evolução temporal da produção primária bruta e respiração total (em cima) dos ecossistemas terrestres simulados pelo modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX. Valores médios das diferenças anuais entre as diferentes simulações e a referência para produção primária bruta (à esquerda, em baixo) e respiração total (à direita, em baixo), para o período 1940-1950.....	30
Figura 5.9- Evolução temporal das emissões para a atmosfera a partir de incêndios (em cima) e dos fluxos associados a colheitas agrícolas (em baixo), simulados pelo modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX.	31

Figura 5.10- Evolução temporal de NBP e dos <i>stocks</i> de carbono no solo (em cima) a partir das simulações do modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX. Valores médios das diferenças anuais entre as diferentes simulações e a referência para NBP (à esquerda, em baixo) e <i>stocks</i> de carbono no solo (à direita, em baixo), para o período 1940-1950.....	32
Figura 5.11- Distribuição espacial da acumulação de NBP para S0 (à esquerda) e da diferença entre acumulação entre S1 e S0 (à direita), entre 1901 e 1961 (em kgC/m ²).....	34
Figura 5.12- Distribuição espacial da diferença entre a acumulação de NBP entre as diferentes simulações e S0, entre 1901 e 1961 (em kgC/m ²).....	35
Figura 5.13- Evolução dos fluxos por área associados a colheitas agrícolas (em cima) e da respetiva produção de cereais (em baixo) para os dois grupos de valores atribuídos a V _{c_{max}25} , durante o séc. XX, comparando com outras fontes (Nove, 1982; Sapir, 1989).	38
Figura 5.14- Evoluções temporais de NBP e dos <i>stocks</i> de carbono no solo para todo o séc. XX (em cima) e diferenças entre esses valores e os valores de S0 entre 1940 e 1960 (em baixo), para os diferentes valores de V _{c_{max}25} utilizados.	39
Figura A.1 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual da Arménia, Azerbaijão e Geórgia através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregon (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).	51
Figura A.2 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual da Estónia, Letónia, Lituânia, Moldávia e Ucrânia através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregon (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).	52
Figura A.3 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual do Cazaquistão, Quirguistão, Tajiquistão, Turquemenistão e Usbequistão através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregon (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).....	53

Índice de Tabelas

Tabela 2.1– Lista de <i>Plant Functional Types</i> (PFTs) utilizadas no modelo ORCHIDEE.	13
Tabela 4.1 – Lista de simulações realizadas neste estudo e suas características, (S) para módulo ativado e (N) para módulo desativado.....	22
Tabela 5.1- Valores de V _{c_{max}25} atribuídos a cada PFT em cada configuração testada. A coluna à esquerda apresenta os valores iniciais utilizados pelo modelo (V _{c_{max}25}) e a coluna à direita apresenta os novos valores definidos (V _{c_{max}25} *).	37

Simbologia e Notações

C_{atm}	Concentração atmosférica de CO ₂
G_{ATM}	Taxa de crescimento de CO ₂ atmosférico
F_{fossil}	Fluxo emitido pela queima de combustíveis fósseis
$F_{ocean-atm}$	Fluxo trocado entre reservatório oceânico e atmosfera
$F_{land-atm}$	Fluxo trocado entre reservatório terrestre e atmosfera
F_{LULCC}	Fluxo resultante de alterações no uso e coberto do solo
$F_{residual}$	Fluxo referente ao sequestro de carbono dos ecossistemas terrestres
E_{FF}	Emissões atmosféricas pela queima de combustíveis fósseis
E_{LULCC}	Emissões atmosféricas por alterações no uso e coberto do solo
S_{OCEAN}	Sumidouro oceânico de carbono
S_{LAND}	Sumidouro terrestre de carbono
NBP	Produtividade Líquida do Bioma, do inglês <i>Net Biome Production</i>
NEP	Produtividade Líquida do Ecossistema, do inglês <i>Net Ecosystem Production</i>
E_{pert}	Emissões atmosféricas resultantes de perturbações
NPP	Produtividade Primária Líquida, do inglês <i>Net Primary Production</i>
GPP	Produtividade Primária Bruta, do inglês <i>Gross Primary Production</i>
R_a	Respiração autotrófica
R_h	Respiração heterotrófica
$\Delta CROP$	Diferença entre a área agrícola total da URSS entre os dados LUH/HYDE e AP
$crop_ratio^{pixel}$	Fração da área agrícola, em cada pixel, face à sua totalidade na zona de atualização dos dados
$\Delta crop^{pixel}$	Área agrícola excedente nos dados LUH/HYDE em cada pixel
A_{PFT}^{pixel}	Área ocupada por dado PFT por pixel
F_{PFT}^{pixel}	Fração de um dado pixel ocupada por dado PFT
ΔF_{PFT}^{pixel}	Diferença entre as frações ocupadas por dado PFT antes e depois da atualização dos dados
Vc_{max}	Taxa máxima de atividade da carboxilase da enzima RuBisCo
Vc_{max25}	Vc_{max} de referência (a 25° C)
C	Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono

CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
LULCC	Alterações do uso e coberto do solo, do inglês <i>Land-use and Land Cover Change</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
GOSAT	<i>Greenhouse Gases Observing SATellite</i>
OCO – 2	<i>Orbiting Carbon Observatory-2</i>
GCP	<i>Global Carbon Project</i>
CDIAC	<i>Carbon Dioxide Information Analysis Center</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
DoE	<i>U.S. Department of Energy</i>
pCO ₂	Pressão de CO ₂ à superfície
DGVM	Modelos Dinâmicos de Vegetação Global, do inglês <i>Dynamic Global Vegetation Models</i>
ESM	Modelos do Sistema Terrestre, do inglês <i>Earth System Models</i>
GCM	Modelos de Circulação Global, do inglês <i>Global Circulation Models</i>
SVAT	Transferências Superfície-Vegetação-Atmosfera, do inglês <i>Surface-Vegetation-Atmosphere</i>
ORCHIDEE	<i>ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms</i>
LMD	<i>Laboratoire de Météorologie Dynamique</i>
STOMATE	<i>Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems</i>
LPJ	<i>Lund-Potsdam-Jena</i>
PFT	Tipos Funcionais de Plantas, do inglês <i>Plant Functional Types</i>
LUH	<i>Land Use Harmonization</i>
GLM	<i>Global Land-use Model</i>
AP	Dados elaborados por Anna Peregon
LSCE	<i>Laboratoire des Sciences du Climat et de L'Environnement</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
IGBP	<i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>
RuBisCo	Ribulose-1.5-difosfato carboxilase oxigenase

Capítulo 1 – Introdução

A concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera tem aumentado consideravelmente nos últimos dois séculos e meio, apresentando valores de aproximadamente 278 partes por milhão (ppm) em 1750 (Ciais *et al.*, 2013) e ultrapassando 400 ppm em 2015 (Le Quéré *et al.*, 2015). A avaliação precisa das emissões antropogénicas de dióxido de carbono e da sua redistribuição pela atmosfera e pelos reservatórios oceânico e terrestre é importante para uma melhor compreensão do ciclo de carbono e consequente melhoria das projeções de alterações climáticas, bem como para o desenvolvimento de políticas climáticas (Le Quéré *et al.*, 2015). Nas décadas recentes, o esforço da comunidade científica para contabilizar esses termos tem aumentado, com a implementação de vários projetos de quantificação de emissões de CO₂ ou de inter-comparação de modelos.

Inicialmente, as emissões antropogénicas de CO₂ deveram-se maioritariamente à desflorestação e a outras atividades de alterações de uso e coberto do solo (LULCC, do inglês *Land-Use and Land Cover Change*) (Ruddiman, 2003, 2007; Pongratz *et al.*, 2009; Ciais *et al.*, 2013). Até cerca de 1950, as emissões por LULCC e queima de combustíveis fósseis contribuíram em aproximadamente partes iguais para as emissões antropogénicas de CO₂ para a atmosfera (IPCC, 2013). De entre todos os fluxos que influenciam o balanço de carbono global em escalas de tempo médias (décadas a séculos), aquele que apresenta maior incerteza é o fluxo de LULCC (Houghton *et al.*, 2012; Pongratz *et al.*, 2014). O uso do solo refere-se à gestão de um tipo de coberto do solo (e.g. a silvicultura), enquanto as alterações do coberto vegetal se referem à conversão de um tipo de coberto noutro tipo distinto (e.g. a conversão de floresta em área agrícola). Atualmente, a maior parte das emissões por LULCC estão associadas à desflorestação (Houghton *et al.*, 2012) e entre 1990 e 2010 o fluxo líquido de carbono associado a LULCC representou 12.5% das emissões antropogénicas de carbono (Houghton *et al.*, 2012).

As incertezas na estimativa deste fluxo estão relacionadas com: i) lacunas nos dados disponíveis de alterações do coberto do solo; ii) inconsistências nas metodologias utilizadas; iii) diferentes definições e métodos associados ao cálculo dos fluxos de carbono referentes a LULCC; e iv) a incapacidade dos modelos de simular a totalidade dos processos biológicos envolvidos (Pongratz *et al.*, 2014). Neste contexto, os dados de LULCC são de extrema importância, dado que servem de base para os diversos modelos que simulam os fluxos de carbono entre a atmosfera e o reservatório terrestre. A incerteza associada a estes dados reside maioritariamente na informação referente às taxas de desflorestação e reflorestação, bem como às densidades de carbono em zonas em processo de alteração (Houghton *et al.*, 2012; Pongratz *et al.*, 2014). As diferenças nos dados de *input* e nos processos incluídos nos modelos estão associadas a 50% da incerteza nas estimativas de alterações no uso do solo (Houghton *et al.*, 2012), o que demonstra a importância de uma boa estimativa *a priori* das LULCC, de forma a fornecer o *input* mais preciso possível.

Neste contexto, a URSS é um caso de estudo relevante, dada a sua dimensão e as transformações económicas que aí ocorreram durante parte do século XX. Um dos períodos potencialmente relevantes coincide com os eventos da 1ª Guerra Mundial (1914-1917) e da Guerra Civil Russa (1918-1921) que lhe sucedeu, sendo períodos caracterizados por uma diminuição da população e da produção agrícola (Nove, 1982) resultantes do conflito armado e da perda de territórios. Acresce que durante o período da Guerra Civil Russa, o território controlado pelos Bolcheviques vivia um período conhecido por regime comunista de guerra que, sumariamente se caracterizava por políticas de nacionalização da economia e introdução de gestão centralizada no Estado, que levaram à diminuição da produção agrícola (Nove, 1982). Entre estas medidas podem mencionar-se a aplicação de uma taxa agrícola

(*prodrazvestka*), que se traduzia na expropriação da produção agrícola dos camponeses por um preço nominal fixo (bastante baixo), o controlo estatal das trocas externas, a proibição de trocas privadas e o racionamento de alimentos (e da maioria das mercadorias), com distribuição centralizada nos centros urbanos. Estas políticas tiveram consequências drásticas na qualidade de vida de uma grande parte da população. Por exemplo, os camponeses não recebiam o suficiente pela sua produção, o que fomentou o aparecimento de mercados negros para comida e/ou redução das produções até níveis de subsistência, o que, por sua vez, conduziu à criação de mecanismos estatais de expropriação mais duros, com base no argumento de que os camponeses estariam a armazenar e a esconder produtos agrícolas do Estado. Este argumento e o decréscimo da produção agrícola declarada ao Estado resultou em decréscimos na atribuição de rações por pessoa e, conseqüentemente, em fome da população em várias regiões russas (Nove, 1982). De salientar que este tipo de situações podem ser uma das razões por detrás da distorção dos dados agrícolas na URSS, neste período. Adicionalmente, este período foi caracterizado pela ocorrência de eventos de seca em várias regiões russas a par de sistemas de distribuição fracos que, combinados com as dinâmicas sociais e políticas descritas, exacerbaram o decréscimo da produção agrícola, o aumento da fome e o decréscimo populacional (Nove, 1982).

Durante o período da 2ª Guerra Mundial, a produção agrícola sofreu danos mais graves que no período da 1ª Guerra Mundial e da Guerra Civil, principalmente nas zonas de produção mais ricas, devido em grande medida à perda de território (as regiões a Oeste do Volga). Por exemplo, a primeira vaga de invasões alemãs na fronteira oeste resultou na perda de 38% da área arável soviética (Gatrell & Harrison, 1993). Nessa altura, a produção agrícola na URSS estava organizada numa forma bastante similar ao período da Guerra Civil, resultado do movimento de coletivização da agricultura (criação de quintas coletivas e do Estado) desenvolvido por Estaline e pelo seu governo a partir de meados de 1929-1930, como parte dos planos quinquenais. De uma forma geral, este movimento de coletivização da agricultura tinha como principal objetivo o aumento do investimento do Estado no setor industrial do país, para o qual era necessário um aumento do capital do Estado, tal como um maior controlo dos diferentes meios de produção por parte do mesmo (Nove, 1982). As principais semelhanças entre os sistemas desses dois períodos consistiam na existência de uma taxa agrícola como a *prodrazvestka*, que obrigava os camponeses a vender as suas produções ao Estado a baixos preços, o racionamento dos produtos alimentares e a proibição de trocas privadas, cujas consequências já descritas se repetiram. No entanto, desta vez as proporções foram mais trágicas (mesmo fora da época de guerra), devido a taxas agrícolas demasiado elevadas que não evidenciavam qualquer preocupação face ao que sobraria para a subsistência dos camponeses. De salientar que o processo de coletivização da agricultura na URSS foi marcado pela repetida propaganda do governo com o intuito de mascarar o forte carácter coercivo das medidas impostas pelo Estado, criando a ilusão de voluntarismo da população nesse processo (Nove, 1982). Este fator, aliado às metas muitas vezes irrealistas propostas nos diferentes planos quinquenais estabelecidos e a implementação de certos mecanismos estatísticos imprecisos na estimativa das colheitas agrícolas (Nove, 1982) podem ter sido das principais razões para a manipulação e/ou omissão de dados agrícolas (e de outros tipos) neste período, por um lado para forçar os camponeses a produzir as maiores quantidades possíveis (e, assim, aumentar as taxas de vendas ao Estado) e, por outro, para tentar fazer transparecer um sucesso do regime soviético (comunista) face às restantes nações do planeta (na sua maioria, capitalistas).

Recentemente, Bastos *et al.* (2016) recorreram às reconstruções mais atuais dos diversos termos do balanço de carbono global para avaliar a estabilização da concentração de CO₂ atmosférico na década de 1940 (apelidado de *plateau* em Bastos *et al.* (2016), mostrado na Figura 1.1), observada através da composição atmosférica de ar aprisionado em gelo de Law Dome (Antártida), cuja origem ainda não é clara, dado que não há indícios de que tenha havido redução das emissões antropogénicas de CO₂ (Le Quéré *et al.*, 2015). Bastos *et al.* (2016) mostraram que as diversas fontes de dados não permitem

reconstruir o referido *plateau* e que a discrepância no balanço anual de CO₂ durante a década de 1940 entre as reconstruções e as observações é de 0.9-2 PgC/ano. Se bem que a variabilidade natural do reservatório oceânico possa explicar uma parte do sequestro adicional esperado (0.5 PgC/ano), os autores mostram que é necessária uma maior capacidade de fixação de CO₂ por parte do reservatório terrestre para explicar a estabilização de CO₂.

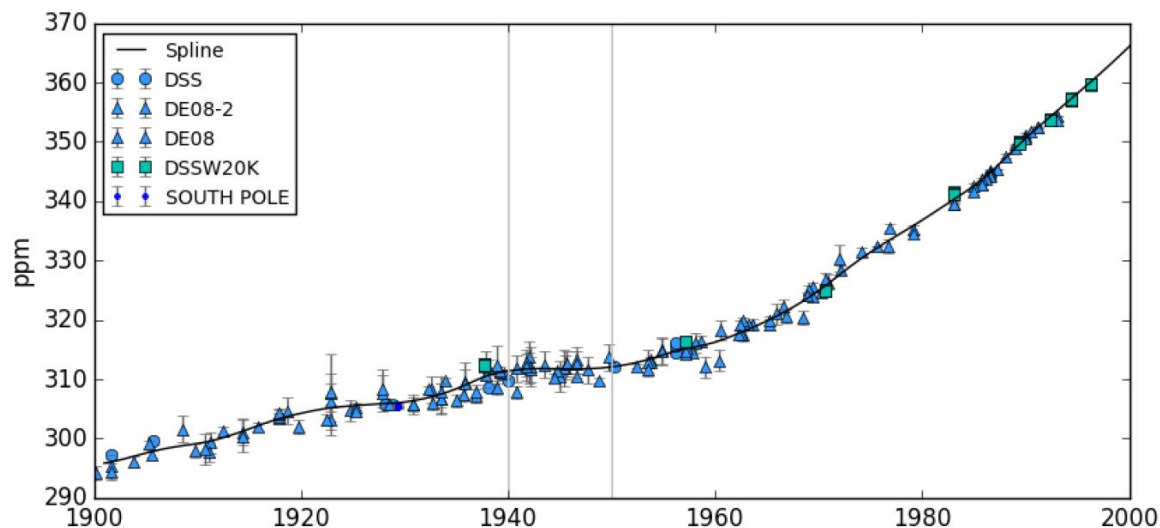


Figura 1.1 – Concentração atmosférica de CO₂ medida em ar aprisionado em gelo de Law Dome (Antártida) e respetivas incertezas. O período correspondente ao *plateau* está salientado entre as linhas verticais cinzentas. (Bastos *et al.*, 2016)

Dado que as emissões de LULCC são o termo que apresenta maior incerteza, os autores sugerem que mudanças socioeconómicas drásticas durante a 2ª Guerra Mundial poderão ter produzido LULCC presentemente não incorporadas nas fontes de dados habitualmente utilizadas. Os autores sugerem ainda que estas mudanças poderão contribuir parcialmente para o sumidouro adicional necessário para explicar o *plateau* dos anos 40. Aquele evento poderá ter originado um abandono relevante de campos agrícolas nas regiões afetadas pela guerra, maioritariamente associado ao decréscimo populacional resultante da elevada mortalidade e/ou mobilização para a guerra, ao conflito armado e consequente mobilização populacional. Este abandono agrícola teria produzido alterações do coberto do solo (e.g. expansão de floresta e/ou vegetação herbácea) com consequências no fluxo líquido de carbono para a atmosfera. Na verdade, durante a história da União Soviética existem vários períodos cujos eventos ocorridos poderão ter produzido LULCC análogas. A título de exemplo, refira-se que Vuichard *et al.* (2008) estudaram a influência do fim da União Soviética e consequente colapso das suas estruturas agrícolas, no início da década de 1990, na dinâmica de armazenamento de carbono no solo. Esse estudo foca-se no grande abandono de áreas de cultivo após este colapso, que foram substituídas por plantas herbáceas, tendo originado uma mudança no uso e coberto dos solos em cerca de 200 mil km². O mesmo estudo simula os fluxos de CO₂ correspondentes a essas alterações, responsáveis por um sumidouro médio anual de 46.7 gC/m².ano. Adicionalmente, na União Soviética durante o período da 2ª Guerra Mundial (e não só) há evidência de manipulação e/ou omissão de dados de produção agrícola, maioritariamente por motivações políticas (Nove, 1982), pelo que não é claro se os dados utilizados atualmente (e.g. em Hurtt *et al.*, 2011) correspondem à realidade.

Neste trabalho utiliza-se uma nova base de dados de área agrícola entre 1913 e 1961 para a URSS, desenvolvida por Anna Peregon (cf. Secção 3.2) com base em recolha de informação detalhada para cada um dos países que anteriormente compunham a URSS proveniente de diferentes fontes estatísticas. A partir desses dados desenvolvem-se diferentes mapas de ocupação e uso do solo segundo diversos cenários de reconversão da área agrícola. Pretende-se avaliar a hipótese de Bastos *et*

al. (2016), analisando o impacto do uso desta nova fonte de informação nas emissões decorrentes de LULCC durante a década de 1940. Os novos mapas são utilizados como elemento forçador de um modelo de dinâmica da vegetação (ORCHIDEE-MICT, cf. Secção 2.2, Krinner *et al.*, 2005, Zhu *et al.*, 2015) para estimar os fluxos de carbono resultantes.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

No presente capítulo resumem-se os principais conceitos teóricos relacionados com o balanço e fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres, os processos de LULCC, a incerteza no estudo desses processos e as metodologias habitualmente utilizadas, bem como as características e funcionamento do modelo utilizado para estimar os fluxos de CO₂ envolvidos.

2.1. O balanço de carbono global

A partir de 1957, a concentração atmosférica de CO₂ passou a ser medida direta e sistematicamente no vulcão de Mauna Loa, Havai (Pales & Keeling, 1965; Keeling *et al.*, 1976). Para períodos anteriores a essa data, esta concentração pode ser calculada através da análise da composição atmosférica de ar aprisionado em bolhas no gelo dos pólos (Francey *et al.*, 1999; Ferretti *et al.*, 2005; McFarling Meure *et al.*, 2006; Ahn *et al.*, 2012; Ciais *et al.*, 2013), tomando em consideração o facto de que cada bolha é composta por ar de diferentes idades e de que o gelo mais profundo retém informação mais antiga (devido à progressiva acumulação de gelo). Nos últimos anos, foi lançado um novo conjunto de satélites cujo objetivo é a quantificação de CO₂ na coluna atmosférica: o GOSAT (do inglês, *Greenhouse gases Observing SATellite*) e o OCO-2 (do inglês, *Orbiting Carbon Observatory-2*), (Crisp *et al.*, 2004; Hamazaki *et al.*, 2008; Yokota *et al.*, 2009; Eldering *et al.*, 2012; Hammerling *et al.*, 2012), permitindo uma monitorização global e contínua dos fluxos e concentração de CO₂ com resolução espacial moderada.

A taxa de crescimento de CO₂ atmosférico (G_{ATM} , do inglês *atmospheric growth rate*) corresponde à taxa temporal da concentração, que, nas escalas de tempo consideradas neste trabalho, depende dos fluxos entre os diversos reservatórios:

$$G_{ATM} = \frac{dC_{atm}}{dt} = F_{fossil} - F_{ocean-atm} - F_{land-atm} \quad (2.1)$$

onde F_{fossil} , $F_{ocean-atm}$ e $F_{land-atm}$ correspondem, respetivamente, aos fluxos de carbono emitidos pela queima de combustíveis fósseis, e aos trocados entre os reservatórios oceânico e terrestre e a atmosfera.

$F_{land-atm}$ pode, por sua vez, ser decomposto em dois fluxos, em geral opostos: o fluxo resultante de alterações no uso e coberto do solo (F_{LULCC}) e o fluxo associado ao sequestro efetuado pelos ecossistemas terrestres ($F_{residual}$), denominado de “residual” devido ao facto de ser habitualmente calculado a partir dos restantes termos do balanço de carbono estimados mais diretamente (Pongratz *et al.*, 2014):

$$\begin{aligned} G_{ATM} &= F_{fossil} - F_{ocean-atm} - (F_{LULCC} - F_{residual}) \\ &= E_{FF} + E_{LULCC} - S_{OCEAN} - S_{LAND} \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde E_{FF} , E_{LULCC} , S_{OCEAN} e S_{LAND} correspondem, respetivamente, às emissões pela queima de combustíveis fósseis, por atividades LULCC e aos sumidouros oceânicos e terrestres. De salientar que na Equação 2.2, F_{fossil} e F_{LULCC} são definidos como positivos quando “entram” na atmosfera, enquanto $F_{ocean-atm}$, $F_{land-atm}$ e $F_{residual}$ são definidos como positivos quando saem da atmosfera.

O Global Carbon Project (GCP), implementado em 2001, é um projeto que periodicamente documenta a evolução das emissões antropogênicas de CO₂, bem como os fluxos de CO₂ nos reservatórios oceânico e terrestre (Le Quéré *et al.*, 2015). As análises do GCP limitam-se às últimas décadas do século XX, em que estão disponíveis dados obtidos através de observações diretas, sendo que para períodos anteriores os únicos registros existentes provêm de ar aprisionado nas calotes polares. No entanto, o cálculo dos fluxos presentes no balanço de carbono terrestre para esses períodos apresenta grande incerteza (Bastos *et al.*, 2016).

As emissões de CO₂ por parte da queima de combustíveis fósseis e da indústria (E_{FF} , do inglês *fossil fuels*) são usualmente baseadas em estatísticas de energia e dados de produção de cimento, provenientes de diferentes organizações, e.g. *Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)*, *International Energy Agency (IEA)*, *United States Department of Energy (DoE)*, tendo-se que as estimativas do CDIAC são as únicas que fornecem dados desde 1751 (Boden *et al.*, 2009; Le Quéré *et al.*, 2013; Le Quéré *et al.*, 2015). As emissões por alterações no uso e coberto do solo (E_{LULCC}) têm sido dominadas pela desflorestação nas últimas décadas (Houghton *et al.*, 2012; Le Quéré *et al.*, 2015). Em geral são baseadas em dados estatísticos e/ou de satélite (quando disponíveis) de alterações de ocupação e uso do solo e calculadas utilizando diversos tipos de modelos (cf. Seção 2.3, Houghton *et al.*, 2012; Pongratz *et al.*, 2014; Hansis *et al.*, 2015; Le Quéré *et al.*, 2015), sendo esses dados atualmente combinados com informação sobre incêndios (relacionados com a intervenção humana), normalmente provenientes de satélites (van der Werf *et al.*, 2010; Giglio *et al.*, 2013).

As observações dos fluxos de CO₂ no oceano (S_{OCEAN}) iniciaram-se a partir da década de 1970, através de medições da pressão de CO₂ (pCO_2) à superfície (Takahashi *et al.*, 2009). Porém, estas observações correspondem a medições pontuais nos oceanos, o que significa que não é necessariamente conhecido o sequestro global. É por esta razão que as anomalias e tendências anuais do sumidouro oceânico global são usualmente estimadas através de modelos oceânicos (como por exemplo no GCP).

Relativamente aos fluxos de CO₂ nos ecossistemas terrestres, as únicas medições diretas existentes são dados pontuais de fluxos verticais turbulentos de gases na atmosfera (*eddy-covariance flux*), estando disponíveis para períodos longos e localizações com topografia homogênea (Law *et al.*, 2000; Tuzet *et al.*, 2003). Estas medições existem há algumas décadas (desde a década de 1990, de forma sistemática) e estão organizadas em redes continentais e globais como o FLUXNET, o que possibilita a avaliação global e regional das trocas de CO₂ (Baldocchi *et al.*, 2001).

2.2. Fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres

Para compreender os factores que influenciam as E_{LULCC} , é preciso considerar os diferentes processos biogeofísicos, biogeoquímicos e ecológicos que ocorrem em diversas escalas temporais e afetam os fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres.

Em escalas temporais curtas, os ecossistemas trocam energia, momento, humidade e compostos químicos como CO₂, metano (CH₄) e óxido nítrico (N₂O) (Figura 2.1A, 2.1B e 2.1C), sendo estas trocas reguladas por processos físicos e ecológicos a escalas temporais da ordem do dia ou da estação (Bonan, 2008). As permutas de energia e humidade são maioritariamente influenciadas por características da vegetação ou do solo, como o albedo ou a disponibilidade de água no solo, dado que o primeiro regula as quantidades de energia solar absorvida e refletida pela superfície terrestre e a segunda regula o ciclo hidrológico e os fluxos de calor latente (Bonan, 2008). Os processos radiativos e hidrológicos têm, portanto, um papel fundamental no funcionamento dos ecossistemas terrestres

(através de variáveis como a temperatura, a precipitação, a evapotranspiração e o perfil de água nos solos). As trocas de momento estão associadas à energia transportada pelo vento, cujo comportamento influencia a evapotranspiração do solo e das plantas. Os fluxos de CO₂ estão maioritariamente relacionados com a fotossíntese, respiração e decomposição de matéria orgânica, e são condicionadas em grande parte por outros processos físicos. Exemplos de fatores que influenciam os diversos processos acima mencionados são a variabilidade sazonal da radiação solar, da hidrologia local, da absorção e mineralização de nutrientes, ou da fenologia da vegetação e alocação de recursos (Bonan, 2008).

Em períodos superiores a um ano, os processos ecológicos afetam a estrutura e composição dos ecossistemas que, por sua vez, controlam o funcionamento a curto prazo (Figura 2.1D), como por exemplo a competição entre diferentes tipos de vegetação, a deposição de nutrientes e as perturbações de regime (e.g., fogos, secas, pestes). As atividades humanas (Figura 2.1E e 2.1F) também interferem na estrutura e funcionamento dos ecossistemas terrestres, através de LULCC, gestão do solo e das florestas, ou adição de nutrientes aos ecossistemas (Bonan, 2008).

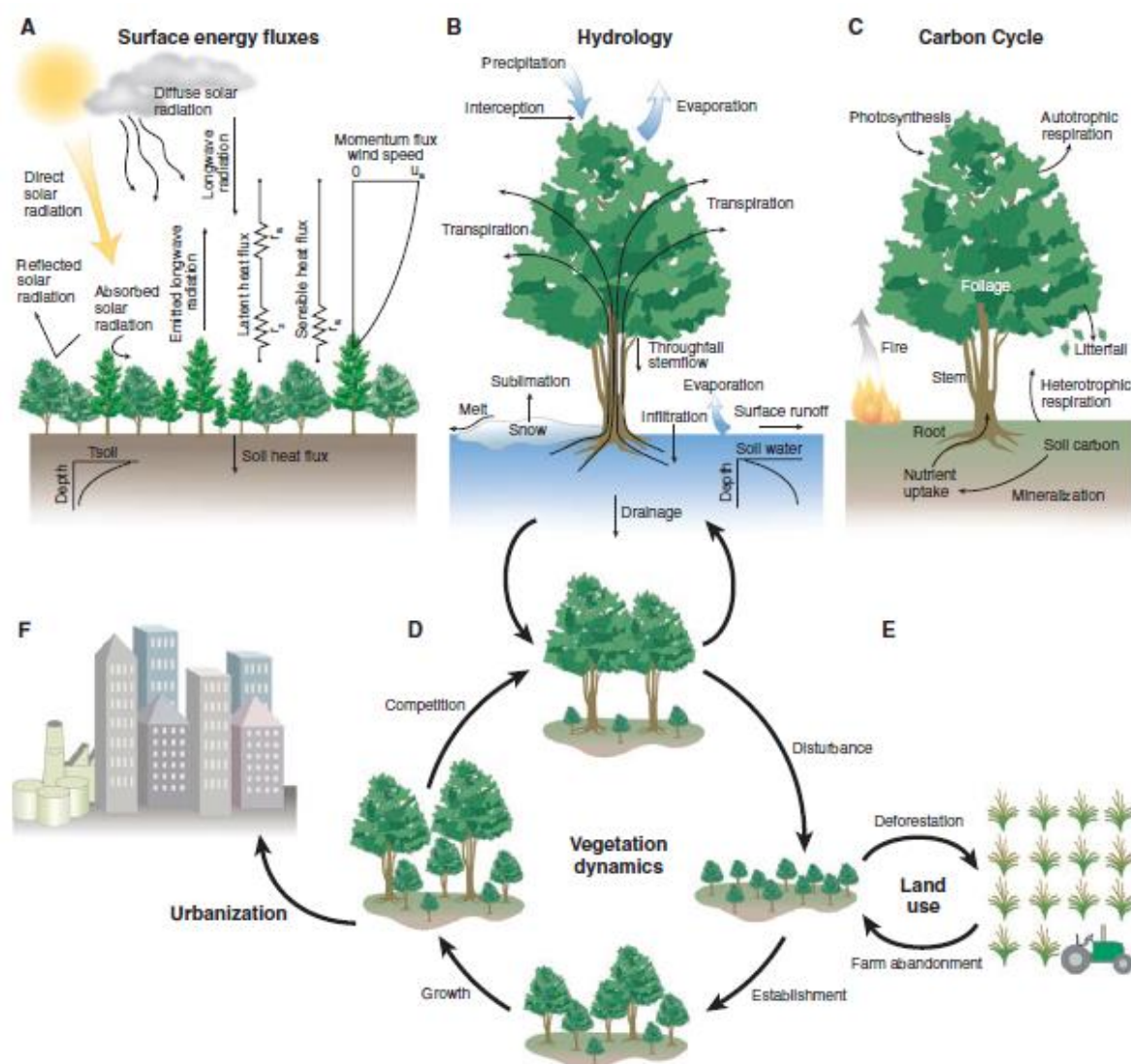


Figura 2.1 – Representação esquemática dos principais processos biofísicos e biogeoquímicos nos ecossistemas terrestres (Bonan, 2008).

Todos os processos referidos influenciam direta ou indiretamente o sequestro de carbono líquido dos ecossistemas (*NBP*, do inglês *Net Biome Productivity*):

$$NBP = NEP - E_{pert} - E_{LULCC} \quad (2.3)$$

onde E_{pert} corresponde a emissões de CO₂ durante perturbações como fogos, E_{LULCC} a emissões devido a LULCC como desflorestação, e onde a fixação líquida nos ecossistemas, NEP (do inglês, *Net Ecosystem Production*) vem dada por:

$$NEP = NPP - R_h \quad (2.4)$$

onde NPP é produção primária líquida (do inglês *Net Primary Productivity*), ou seja, a quantidade líquida de carbono fixado pela vegetação nos seus tecidos. Parte deste carbono é posteriormente transportado para o solo sob a forma de resíduos, onde é decomposto por organismos heterotróficos e libertado para a atmosfera como CO₂ através da respiração heterotrófica (R_h). A produção primária líquida corresponde ao balanço entre a produção primária bruta GPP (do inglês, *Gross Primary Productivity*), i.e. o sequestro de CO₂ durante a fotossíntese e R_a a respiração autotrófica, i.e. a libertação de CO₂ como resultado da atividade metabólica e crescimento da planta:

$$NPP = GPP - R_a \quad (2.5)$$

A integração temporal dos valores de NBP é um bom indicador da evolução dos *stocks* terrestres de carbono (Schulze *et al.*, 1999; Hyvönen *et al.*, 2007), sendo esta evolução muito relevante na análise dos fluxos associados a LULCC dado que as emissões dependem dos *stocks* de carbono pré-existent. A razão entre a quantidade de massa de carbono presente num dado reservatório e a taxa de troca de carbono nesse reservatório é denominado de tempo de *turnover* (Zilversmit *et al.*, 1942), e é uma característica dependente do tipo de vegetação em causa.

2.3. Avaliação de emissões por LULCC

As LULCC desempenham um papel relevante no balanço de carbono terrestre, pois influenciam diretamente a quantidade de emissões totais de CO₂ e, de forma indireta, a capacidade de sequestro de carbono dos ecossistemas terrestres. Acresce que o fluxo líquido resultante de LULCC (representado por $F_{land-atm}$ na Equação 2.1) é o fluxo com maior incerteza na sua estimativa de todos os termos presentes no balanço do carbono terrestre, tal como ilustrado na Figura 2.2 (de Hansis *et al.*, 2015), onde se comparam E_{LULCC} estimadas por diferentes modelos. Estas diferenças advêm principalmente de divergências nas bases de dados de LULCC utilizadas pelos diferentes modelos (destacando-se a inclusão das transições de uso e coberto do solo líquidas ou brutas, descritas abaixo) e de diferenças nos pressupostos de alocação de tipos de coberto vegetal aquando de uma alteração (Hansis *et al.*, 2015).

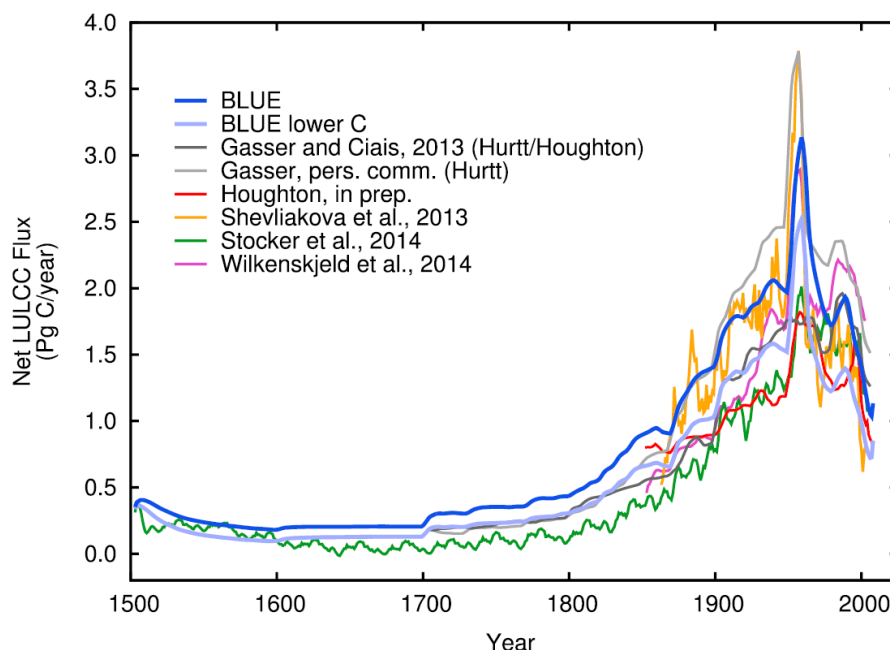


Figura 2.2 – Comparação entre simulações de F_{LULCC} líquido por diferentes estudos (Hansis *et al.* 2015).

Têm sido utilizadas diversas abordagens para quantificar as emissões de CO₂ decorrentes de LULCC. As divergências metodológicas na estimativa de E_{LULCC} estão relacionadas com diversos fatores, entre eles (i) as diferenças na simulação da evolução temporal dos *stocks* de carbono, (ii) a consideração (ou não) de fluxos anteriores ao período que se pretende simular (o que influencia o estado dos *stocks* de carbono no início desse período), (iii) o tratamento das mudanças ambientais, e.g., inclusão de atividades de gestão adicionais e (iv) a identificação ou quantificação das áreas que sofreram alterações (Pongratz *et al.*, 2014, Hansis *et al.*, 2015).

Muitas reconstruções focam-se nas diferenças de área de certo tipo de coberto do solo sem considerar a distribuição espacial dessas diferenças (LULCC líquidas, do inglês *net LULCC*), enquanto outras têm em conta as variações nessa distribuição, acabando por considerar quantidades superiores de áreas afetadas em algumas situações (LULCC brutas, do inglês *gross LULCC*). Por exemplo, se numa dada área se desflorestar uma dada sub-área e plantar a mesma quantidade de floresta noutra local dentro da área principal, a quantidade líquida de floresta nessa área não muda. No entanto, é evidente que esta alteração influenciará os *stocks* locais de C (ver Figura 2.3), pois a transição de um tipo de coberto vegetal para outro (seja de floresta para campos agrícolas, plantação de floresta ou abandono de terrenos agrícolas) resulta sempre em consequências nos tempos de *turnover* dos solos onde essa transição ocorreu, mesmo que a área ocupada pelos diferentes cobertos se mantenha inalterada. Em escalas espaciais elevadas, as duas abordagens podem apresentar desvios significativos face à área considerada como afetada por dada atividade de LULCC. Por exemplo, Fuchs *et al.* (2015) compararam as estimativas de LULCC pelas duas abordagens para a Europa durante o séc. XX e início do séc. XXI e concluíram que, considerando as LULCC brutas, ocorreu uma alteração em 56% da área considerada, o dobro da área considerada por LULCC líquidas. Estas disparidades incrementam os erros na avaliação da evolução espacial dos *stocks* de carbono que, em última análise, se propagam na estimativa de E_{LULCC} .

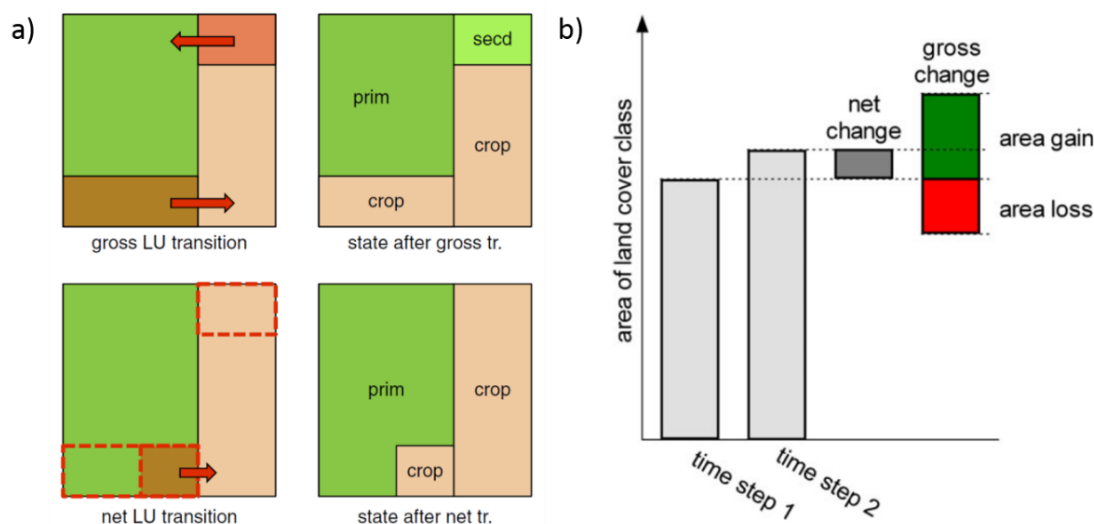


Figura 2.3 – Ilustração das diferenças entre *net* e *gross* LULCC segundo (a) Stocker *et al.* 2014 e (b) Fuchs *et al.* 2015.

Outra fonte de incerteza reside nas diferenças terminológicas na definição de E_{LULCC} . Pongratz *et al.* (2014) afirmam que vários estudos publicados se baseiam em pelo menos 9 diferentes definições para um dado fluxo. Estas definições diferem maioritariamente na consideração e/ou definição de fluxos diretos, indiretos ou da sua combinação, das alterações nas condições ambientais e dos tipos de coberto vegetal (naturais, geridos pelo ser humano ou uma combinação). Algumas destas diferenças são parcialmente pré-determinadas pelo tipo de modelo utilizado e influenciam os resultados produzidos, dado que cada modelo calcula o mesmo fluxo com definições distintas, aumentando a incerteza desses resultados. Essas diferenças terminológicas assentam, maioritariamente, em dois processos: i) fluxos de *legacy* (recrescimento e decomposição) e ii) a perda da capacidade de remoção de CO₂ (*missing sink capacity*) (Pongratz *et al.*, 2014).

- (i) Os fluxos de *legacy* estão associados ao reajustamento dos *stocks* de carbono ao novo tipo de vegetação presente (após LULCC) e/ou ao tipo e intensidade de gestão do uso do solo e do seu coberto. Incluem respiração de resíduos das plantas, perturbações na matéria orgânica do solo e recuperação de *stocks* de carbono vivo. Estes fluxos diferem dos fluxos associados à atividade LULCC propriamente dita, normalmente denominados de fluxos instantâneos (e.g., queimadas de limpeza para fins agrícolas), cujas escalas temporais são mais rápidas, levando ao desfasamento temporal de fluxos de carbono por parte dos ecossistemas que sofreram alterações. As incertezas associadas a estes fenómenos prendem-se com a fraca distinção que normalmente é feita entre fluxos instantâneos e de *legacy*, sendo os últimos muitas vezes omitidos nas simulações intermédias dos modelos ou considerados como fluxos instantâneos.
- (ii) A perda de capacidade de remoção de CO₂ pelos ecossistemas após LULCC deve-se aos diferentes tempos de *turnover* associados aos diferentes tipos de vegetação, como por exemplo, florestas não perturbadas possuem tempos de *turnover* mais elevados do que a vegetação que normalmente a substitui como resultado da ação humana (pastagens ou campos agrícolas). Ou seja, com a ocorrência de desflorestação seguida de atividades agrícolas, para além de haver emissões diretas de carbono para a atmosfera, o potencial de sequestro do ecossistema é diminuído, visto que uma dada área ocupada por florestas possuiria uma capacidade de sequestro de carbono superior a essa mesma área de campos agrícolas.

Uma das abordagens mais simples para estimar E_{LULCC} , ignora a dinâmica temporal dos processos com desfaseamento temporal e assume que os *stocks* de carbono antes e depois da alteração no coberto do solo estão em equilíbrio, o que é irrealista. Com esta abordagem o fluxo pode ser derivado apenas a partir da informação dos *stocks* de carbono de cada estado de uso do solo e a mudança na área (Hansis *et al.*, 2015). Abordagens mais complexas recorrem a modelos utilizados para simular a permuta de CO₂ entre biosfera e atmosfera, existindo três tipos (Pongratz *et al.*, 2014, Hansis *et al.*, 2015):

- *Bookkeeping*: avaliam as mudanças nos *stocks* de carbono de áreas onde se verificam alterações no uso do solo utilizando curvas de aumento e decaimento do carbono no solo e na vegetação. Na abordagem original, as densidades de carbono são baseadas em inventários e não respondem às mudanças de CO₂ e climáticas (Houghton *et al.*, 1983). Nas abordagens mais recentes é inserido um fator de modificação que depende da concentração atmosférica de CO₂ (e.g. Gitz & Ciais, 2003).
- *Dynamic global vegetation models* (DGVMs): simulam os *stocks* de carbono através de processos do solo e da vegetação (como a decomposição e a fotossíntese) e a resposta a mudanças climáticas e nos níveis de CO₂. No modelo, as condições ambientais não são influenciadas pela atividade da biosfera. Uma desvantagem é o facto de não se conseguir atribuir os fluxos de carbono resultantes a um evento de alteração de uso do solo individual, devido a constrangimentos computacionais. O fluxo de carbono líquido decorrente é determinado em comparação a um caso de referência que exclui as LULCC, isto é, o fluxo é determinado através da diferença:

$$E_{LULCC} = F_{LULCC} - F_{noLULCC} \quad (2.6)$$

onde F_{LULCC} e $F_{noLULCC}$ correspondem a $F_{land-atm}$ (ver Equação 2.1) na simulação com a perturbação LULCC e sem essa perturbação, respetivamente. Desta forma, é possível estimar-se a contribuição específica das atividades de LULCC consideradas.

- *Earth system models* (ESMs): os DGVMs integram a modelação do ciclo do carbono com a modelação climática, tendo a capacidade de quantificar os *feedbacks* mediados pelo clima e/ou pelo CO₂ que não podem ser representados por simulações de DGVMs desacopladas (e.g. LULCC emite CO₂, causa mudanças biogeofísicas no albedo e no fluxo de calor latente que, por sua vez, afetam as taxas de crescimento e decomposição dos ecossistemas que, por fim, voltam a afetar os fluxos de LULCC).

2.4. Simulações dos fluxos de CO₂ com um modelo de vegetação

A simulação dos processos climáticos globais, ou de um dos seus componentes, pode ser útil para testar hipóteses e aumentar o conhecimento sobre as interações entre os diversos processos que ocorrem no sistema terrestre. Nos modelos de circulação geral (GCMs, do inglês *global circulation models*), utilizam-se modelos de transferência superfície-vegetação-atmosfera (SVATs, do inglês *surface-vegetation-atmosphere transfer*) para simular trocas de calor sensível, calor latente e energia cinética à superfície. No entanto, é igualmente importante que os modelos consigam integrar os processos biosféricos de modo a simular a vegetação transiente, os fluxos de carbono e as interações entre o clima e a vegetação (IPCC, 2013). Por esta razão, têm sido desenvolvidos modelos globais de dinâmica de vegetação (DGVMs), que são capazes de simular as mudanças estruturais do coberto da

vegetação em resposta a mudanças climáticas, ao modelar explicitamente fenômenos de competição e perturbação. (Krinner *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2015)

O ORCHIDEE (*ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms*) é um modelo de superfície terrestre que consiste no acoplamento de um SVAT a um modelo biogeoquímico e biogeográfico dinâmico (Krinner *et al.*, 2005). Este modelo simula explicitamente os fenômenos terrestres do ciclo de carbono que estão relacionados com os processos da vegetação e de decomposição do solo, para além de alterações na composição da vegetação em resposta a alterações climáticas. O ORCHIDEE faz ainda parte do modelo de circulação geral atmosfera-oceano-vegetação IPSL-CM4 (Krinner *et al.*, 2005).

O modelo referido é baseado em três modelos associados a diferentes processos:

- 1) O SVAT SECHIBA, desenvolvido como um conjunto de parametrizações à superfície para modelos de circulação geral atmosférica do LMD (*Laboratoire de Météorologie Dynamique*, Paris). Descreve trocas de energia e vapor de água entre a atmosfera e a biosfera, tal como o balanço de água do solo. Na sua versão *standard*, o modelo não contém parametrização da fotossíntese. O *timestep* deste módulo é da ordem de 30 min.
- 2) O STOMATE (*Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems*), que simula as dinâmicas do carbono e da fenologia da biosfera terrestre (e.g. processos como a fotossíntese, a alocação de carbono, a decomposição de resíduos, a dinâmica do carbono no solo e a respiração). O *timestep* do modelo é de 1 dia.
- 3) O DGVM utilizado no modelo *Lund-Potsdam-Jena* (LPJ) (Sitch *et al.*, 2003), donde se retiraram as parametrizações associadas à dinâmica da vegetação (e.g., incêndios, competição por luz, mortalidade de árvores e critérios climáticos para a introdução ou eliminação de tipos funcionais de plantas (PFTs, do inglês *plant functional types*). O *timestep* destas parametrizações é de 1 ano.

O SVAT SECHIBA também é denominado “módulo hidrológico”, enquanto ao conjunto entre o DGVM LPJ e STOMATE se dá o nome de “módulo do carbono”. O ORCHIDEE pode ser utilizado com diferentes configurações dos três módulos principais, tendo em conta o tipo de problema em causa.

O ORCHIDEE utiliza o conceito de PFT, atrás referido, para descrever a distribuição da vegetação. Este conceito possibilita o agrupamento de espécies com características funcionais similares de forma a melhorar a previsão das respostas da vegetação real em função da diversidade real de espécies (Smith *et al.*, 1997). O ORCHIDEE inclui 12 PFTs distintos (10 são naturais e 2 são agrícolas, cf. Tabela 2.1). Os diferentes PFTs podem coexistir em cada elemento de uma grelha, sendo que as frações que cada PFT ocupa em cada célula são calculadas (variáveis no tempo) ou prescritas (quando o modelo LPJ está desativado). As resistências dos estomas e os reservatórios de água são calculados separadamente para cada PFT (incluindo para o solo nu). Por motivos de simplificação na parametrização de vários processos (e.g., fotossíntese, transpiração e competição por luz), o ORCHIDEE considera que as herbáceas não crescem por debaixo de árvores.

A dinâmica do carbono é descrita através de trocas entre a atmosfera e os diferentes reservatórios de carbono em plantas e solos. Existem oito reservatórios em biomassa: folhas, raízes, alburno acima ou abaixo da superfície, cerne acima ou abaixo da superfície, frutos ou flores (partes da planta com funções reprodutivas) e a reserva de hidratos de carbono da planta; quatro reservatórios em resíduos: resíduos estruturais e metabólicos, acima e abaixo da superfície; e três reservatórios no solo: ativo, lento e passivo, com tempos de *turnover* distintos. O tempo de *turnover* para os reservatórios de

resíduos e do solo depende ainda da temperatura e da humidade. Estes reservatórios são tratados separadamente em parte natural e agrícola em cada célula da grelha, dadas as grandes diferenças nas dinâmicas de carbono no solo em cobertos naturais ou agrícolas. A quantidade de colheitas agrícolas é estimada considerando que representa sempre 40% da biomassa total dos PFTs agrícolas. As parametrizações para a decomposição de resíduos e dinâmica do carbono no solo são essencialmente baseadas no trabalho de Parton *et al.* (1988). A ocorrência e dinâmica do fogo são representadas através da inclusão do modelo SPITFIRE (Yue *et al.*, 2014, 2015). Neste trabalho utiliza-se a versão ORCHIDEE-MICT, desenvolvida especialmente para latitudes elevadas, tendo em conta a zona do globo que se pretende estudar (Peng *et al.*, 2015, Zhu *et al.*, 2015). Esta nova versão inclui processos adicionais relacionados com a mortalidade de árvores (e.g. causada pela ocorrência de geada durante a Primavera ou de dias extremamente frios), para além de limitações de temperatura na extensão da vegetação durante a fase de crescimento (Zhu *et al.*, 2015).

Tabela 2.1– Lista de *Plant Functional Types* (PFTs) utilizadas no modelo ORCHIDEE.

	PFT
Floresta	Tropical de folha perene larga
	Tropical húmida de folha larga
	Temperada conífera de folha perene
	Temperada de folha perene larga
	Temperada de folha caduca larga
	Boreal conífera de folha perene
	Boreal de folha caduca larga
	Boreal conífera de folha caduca
Herbáceas	Via fotossintética C3
	Via fotossintética C4
Campos Agrícolas	Via fotossintética C3
	Via fotossintética C4

Capítulo 3 – Dados

Este capítulo tem como objetivo apresentar os dados de LULCC que se pretende atualizar (LUH/HYDE, Hurtt *et al.*, 2011), bem como os dados utilizados como base para a atualização, referentes às quantidades de área agrícola na URSS existente durante cerca de metade do século passado recolhidos por Anna Peregon (LSCE).

3.1. LUH/HYDE

Recorreu-se à base de dados de uso do solo LUH/HYDE que é comumente utilizada para forçar os modelos de emissões por LULCC acima referidos (Thomson *et al.*, 2011; Rihai *et al.*, 2011; IPCC, 2013; Dufresne *et al.*, 2013).

A base de dados LUH (de *land use harmonization*) foi produzida por Hurtt *et al.* (2011), utilizando o *Global Land-use Model* (GLM) para se estimar os padrões anuais de uso do solo, entre 1500-2100, com a resolução espacial de 0.5°x0.5° lat/lon. Esse trabalho foi principalmente motivado pela necessidade de harmonizar os dados históricos com informação de cenários futuros. Cada pixel de GLM representa o estado da superfície do solo, num dado ano em função da condição no mesmo pixel no ano anterior, definindo a taxa de transição de uso do solo, como mostrado na Equação 3.1:

$$l(x, t + 1) = A(x, t).l(x, t); \quad (3.1)$$

onde l é o vetor que representa as frações da área de cada categoria de uso do solo e A é a matriz que representa as taxas de transição de alterações no uso do solo, ambos para cada pixel x e cada ano t . O GLM resolve, em cada ano, a equação apresentada em função a A , para o período entre 1500 e 2100, restringendo o sistema com reconstruções históricas e projeções futuras de i) uso do solo, ii) corte de madeira e iii) potencial de biomassa e taxas de recuperação. Outros pressupostos necessários estão relacionados com iv) a prioridade de solo primário ou secundário para cortes de madeira e conversão agrícola, v) inclusão de estatísticas de cortes de madeira, vi) o padrão espacial desses cortes de madeira e vii) o tempo de residência do solo em uso agrícola. As reconstruções históricas utilizadas para a construção desta base de dados provêm de diversas fontes (Hurtt *et al.*, 2011).

A distribuição global das diferentes categorias de uso do solo foi caracterizada utilizando a base de dados HYDE v3.1 (Goldewijk *et al.*, 2011), principalmente para informações relacionadas com população, área e produção agrícolas, área de pastagem, áreas urbanas e de água/gelo. A criação desta base de dados teve como principal objetivo desenhar um cenário plausível para o aumento populacional humano, as atividades agrícolas associadas e os consequentes efeitos nos ecossistemas terrestres nos últimos 12000 anos. Para a criação do HYDE v3.1, os autores recorreram às estatísticas anuais da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) de alterações de área agrícola até 2012 (Le Quéré *et al.*, 2015), a dados estatísticos históricos e de censos e mapas de uso do solo, obtidos a partir de dados de satélite, como o mapa de classificação IGBP (*International Geosphere-Biosphere Programme*, Loveland *et al.* 2000) e o Land Cover 2000 (Bartholome *et al.*, 2002). Estes dados foram combinados com diferentes algoritmos de alocação e com mapas dinâmicos com variáveis ponderadas, de modo a criar cartas de áreas agrícolas e pastagens com uma resolução espacial de 5'x5' lat/lon. Os mapas com variáveis ponderadas foram definidos através de informação de satélites para o período atual tendo em conta vários fatores como densidade populacional, adaptação do solo, distância aos recursos hídricos e biomas específicos para o passado. A Figura 3.1

apresenta um diagrama que esquematiza a operação do modelo utilizado na criação dos dados LUH/HYDE.

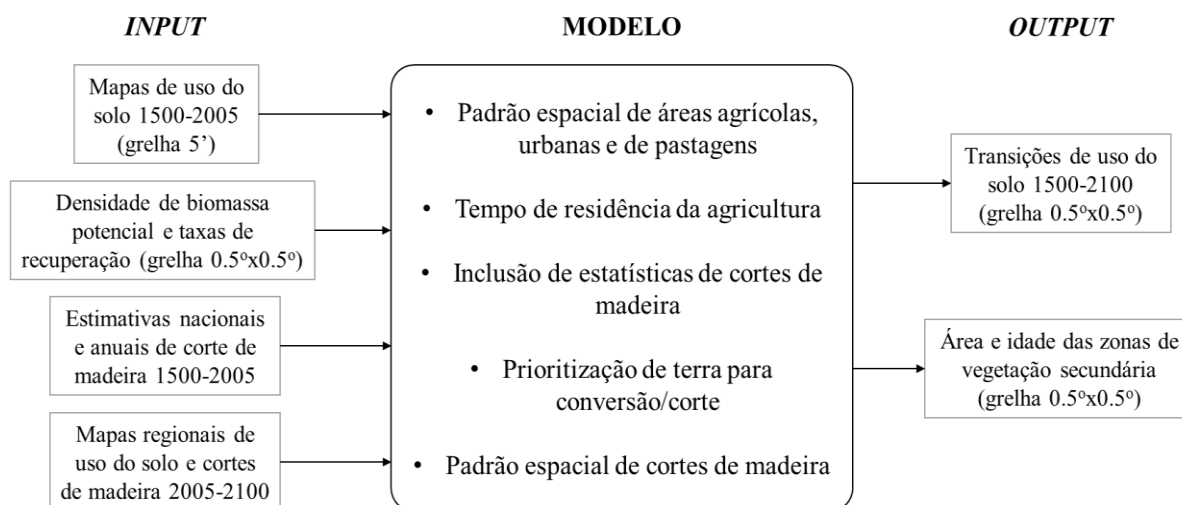


Figura 3.1 – Diagrama esquemático dos *inputs*, *outputs* e decisões do modelo utilizado na construção dos dados LUH/HYDE (Adaptado de Hurtt *et al.* 2011).

Neste trabalho foram utilizados os dados referentes às áreas ocupadas pelas diferentes categorias de uso do solo de HYDE 3.1 (Hurtt *et al.*, 2011) a cada 10 anos, entre 1500 e 2000, bem como o ano de 2005. Hurtt *et al.* alteraram a resolução dos dados para 0.5°x0.5° e converteram os valores de cada célula da grelha de área absoluta para fração da área total da célula, interpolando os valores de cada célula de modo a se obterem mapas anuais de frações de campos agrícolas, pastagens e áreas urbanas (Hurtt *et al.*, 2011). Hurtt *et al.* consideraram as frações de água e gelo constantes ao longo do tempo e obtiveram as frações de vegetação natural, quer primária (vegetação sem perturbações) quer secundária (vegetação perturbada pelo ser humano), pela subtração entre a área total de cada célula e as frações somadas de água/gelo, campos agrícolas, pastagens e áreas urbanas.

Os dados referentes aos cortes de madeira utilizados para construir a base de dados foram obtidos utilizando diferentes fontes para diferentes intervalos de tempo. Entre 1961-2005, os dados provêm de estatísticas da FAO, que fornecem o volume total de madeira cortada a nível nacional. Para anos anteriores a 1961, os dados foram estimados através da multiplicação da taxa nacional de corte de madeira *per capita* pela população nacional. A população nacional foi obtida através de dados de população do HYDE. A taxa nacional de corte de madeira *per capita* para o ano de 1920 foi extraída do trabalho de Zon & Sparhawk (1923), recorrendo-se de seguida a uma interpolação tendo em conta os valores de 1920 e de 1961 e os dados de população do HYDE v3.1. Antes de 1920, considerou-se a taxa nacional de corte de madeira *per capita* constante e igual ao valor considerado para esse ano. Aos valores de volume total de madeira cortada finais são acrescentados 30% desses valores de modo a contabilizar perdas de madeira pelas florestas que não foi “colhida” durante o processo de corte (Hurtt *et al.*, 2006).

A densidade de biomassa e a respetiva taxa de recuperação foram avaliadas através da distribuição dos *stocks* de carbono à superfície e extensão de floresta. Para tal, Hurtt *et al.* recorreram a um modelo de ecossistemas (Miami – LU) que é baseado empiricamente num modelo de produção primária líquida (Leith, 1975), associado a submodelos de mortalidade natural de vegetação, perturbações por incêndios e decomposição de matéria orgânica (Hurtt *et al.*, 2011), tendo produzido resultados satisfatórios (Meeson *et al.*, 1995; Sellers *et al.*, 1995; Hurtt *et al.*, 2011).

Convém salientar alguns pressupostos utilizados para constranger o sistema resolvido pelo GLM (eq. 3.1). O primeiro está associado ao facto de ser necessário escolher entre uma zona de vegetação primária ou secundária sempre que se pretende iniciar uma atividade agrícola ou de corte de madeira. Esta escolha influencia a quantidade resultante de vegetação intacta e vegetação secundária, o seu tempo de recuperação e biomassa. O segundo está associado à inclusão (ou exclusão) de processos de rotação de culturas: o solo é limpo, cultivado durante um dado número de anos (até deixar de ser produtivo) e abandonado, possibilitando o recrescimento de outros tipos de vegetação enquanto uma área de solo próxima é limpa com o mesmo objetivo. No presente trabalho, esta questão não é relevante pelo facto da versão do modelo ORCHIDEE-MICT utilizada não representar a evolução da produtividade primária com a idade da vegetação e não considerar *gross* LULCC. O terceiro pressuposto está relacionado com as estatísticas de cortes de madeira e o respetivo padrão espacial. É incerto se, aquando de atividades de desflorestação para substituição por campos agrícolas, a madeira cortada é contabilizada nas estatísticas nacionais de cortes de madeira. O padrão espacial do corte influencia os padrões e estrutura resultantes das florestas secundárias. Nos dados LUH/HYDE, o padrão espacial de corte foi distribuído de forma igual para todas as áreas florestais de cada país. No entanto, na versão utilizada, o ORCHIDEE-MICT não simula explicitamente fluxos decorrentes de corte de madeira.

Neste trabalho, as categorias de ocupação do solo dos dados LUH/HYDE foram previamente convertidas nos 12 PFTs considerados pelo modelo ORCHIDEE para as simulações apresentadas em Le Quéré *et al.* (2015) (cf. Secção 2.3, Tabela 1).

3.2. Recolha bibliográfica de dados para a URSS

Como base para a atualização dos dados descritos na Secção 3.1, utilizaram-se dados de área agrícola na URSS, compilados por Anna Peregon (estes dados serão simplesmente referidos como AP), no *Laboratoire des Sciences du Climat et de L'Environnement* (LSCE).

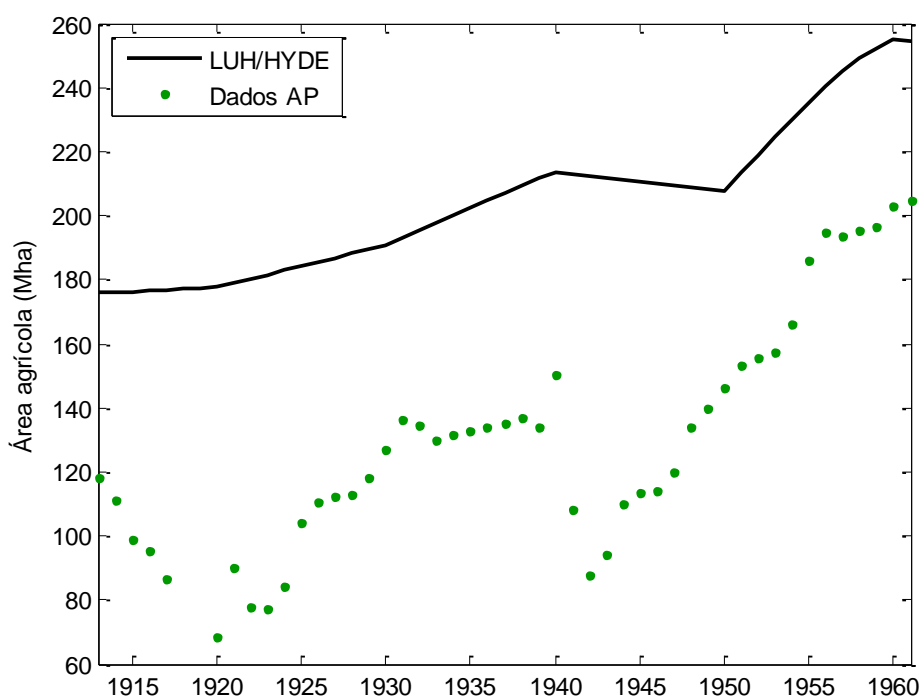


Figura 3.2 – Dados de área agrícola total para o território da URSS entre 1913 e 1961, provenientes das bases de dados LUH/HYDE (a preto) e Anna Peregon (pontos verdes).

Tal como apresentado na Figura 3.2, estes dados estão disponíveis para todos os anos no período entre 1913 e 1961, excetuando os anos 1918 e 1919 e apresentam valores bastante diferentes dos obtidos através da base de dados LUH/HYDE.

Os dados AP (Bastos *et al. in prep.*) são baseados em estatísticas nacionais da URSS para o período 1917-1961 e do Império Russo nos anos anteriores. Os dados do Império Russo são referentes à área delimitada pelas fronteiras desse período (diferentes das fronteiras da URSS) e foram originalmente derivados em unidades russas de área (nomeadamente, o dessiatina, 1 Des=1.09 ha) já obsoletas. Para o período da URSS, os dados fornecem informação relativa à área agrícola total (URSS agregada), bem como à área agrícola para cada uma das 15 Repúblicas Federais que constituíram a URSS. Os dados contêm ainda informação detalhada sobre as diferentes culturas produzidas como por exemplo, cereais de Inverno e Verão, culturas industriais, vegetais e culturas forrageiras, sendo estes ainda subdivididos em função da quantidade de área disponibilizada para diferentes produtos agrícolas (trigo, centeio, milho, cevada, aveia, etc.).

Para avaliar a representatividade dos dados agrícolas compilados por Anna Peregon, comparou-se a variação na área agrícola com outras fontes de dados sobre diversos indicadores socio-económicos (Figura 3.3), tais como população e PIB da URSS, entre eles Harrison (2000) e Bolt & Zanden (2014). As variações (em % relativa ao ano de 1940) de população, produto interno bruto (PIB) e área agrícola fornecida por AP têm, como seria de esperar, comportamentos muito similares. Dado que a sua variação temporal é mais compatível com a mortalidade e alterações socio-económicas que ocorreram na URSS durante o período considerado, os dados AP parecem ser, à partida, mais realistas do que os dados LUH/HYDE.

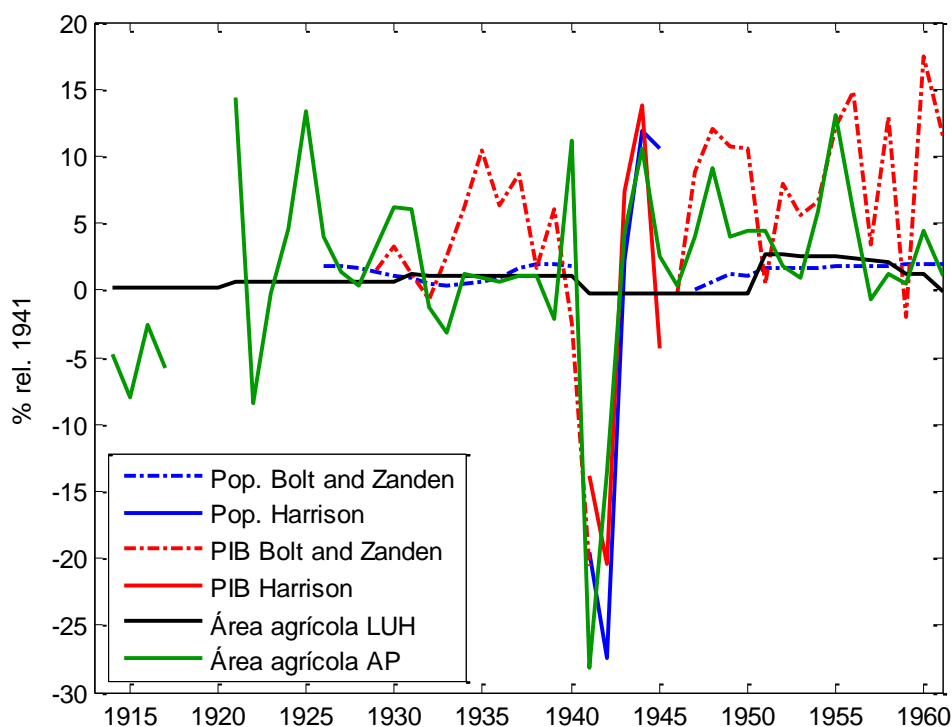


Figura 3.3 – Comparação entre a variação (em % relativa ao ano de 1940) dos dados de população, produto interno bruto e área agrícola na URSS entre 1913 e 1961, a partir de diferentes fontes (Harrison, 2000; Bolt & van Zanden, 2014).

Adicionalmente, foram utilizados valores de produção agrícola por área compilados por Nove (1982) e de produção total de cereais (Nove, 1982; Sapir, 1989) para a URSS, como base de validação de alguns resultados produzidos no presente trabalho.

Capítulo 4 – Metodologia

A metodologia utilizada para a atualização de mapas de LULCC na URSS divide-se em três fases: (i) a interpolação dos dados fornecidos por Anna Peregon para os anos em falta; (ii) a atualização dos dados agrícolas e (iii) a atualização dos mapas de florestas e pastagens para diversos cenários de transições possíveis. Posteriormente, os fluxos de CO₂ correspondentes são calculados utilizando os mapas de LULCC atualizados como *input* para o modelo ORCHIDEE-MICT.

4.1. Interpolação e atualização de dados agrícolas

A atualização dos dados agrícolas foi feita para o intervalo de anos entre 1913 e 1961, que corresponde ao período dos dados de área agrícola na URSS de AP. Inicialmente procedeu-se a uma interpolação linear para completar as lacunas em 1918 e 1919 dos dados fornecidos por AP para o total da URSS.

Para se atualizar os dados LUH/HYDE (Hurtt *et al.*, 2011) de área agrícola calculou-se inicialmente a diferença para a área total (segundo os dados AP, $\Delta CROP$) na URSS. Como se pode ver na Figura 3.2, a área agrícola estimada por AP é sempre inferior aos valores em Hurtt *et al.* (2011), pelo que se conclui que é sempre necessário remover área agrícola. A correção foi aplicada às zonas a Oeste do rio Volga, mais especificamente a oeste de 50°E (Figura 4.1), tendo em conta que a frente de guerra e os territórios ocupados pelos alemães se localizaram principalmente nessa zona (destacando-se as zonas mais ricas na produção de cereais, na Ucrânia e Norte do Cáucaso) e tendo-se verificado uma deslocalização das áreas agrícolas e da indústria para regiões mais a Este (Voznesensky, 1949; Nove, 1982; Gatrell & Harrison, 1993). Em alguns anos, a diferença de área agrícola para as 2 bases de dados, $\Delta CROP$, toma valores superiores à área agrícola total na região selecionada a Oeste do rio Volga, o que implica um excesso de área agrícola a ser retirado. Nestes casos, começa-se por retirar toda a área agrícola que existe na região a Oeste do Volga, sendo o excesso retirado com a mesma metodologia na região da URSS a Este do rio Volga.

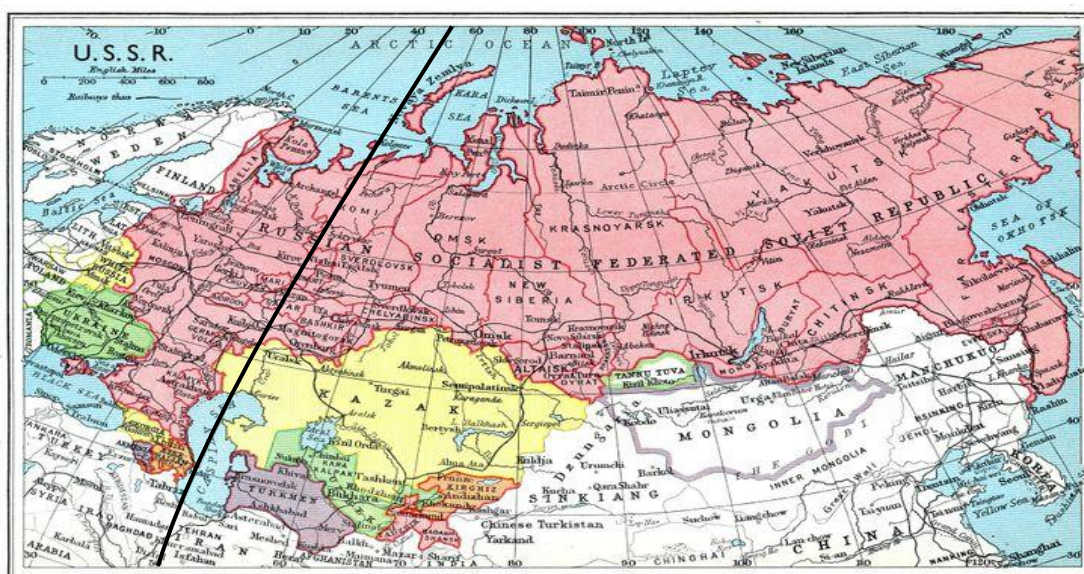


Figura 4.1 – Mapa do território ocupado pela URSS no ano de 1941, destacando as áreas ocupadas pelos países atuais. A linha a negro indica o meridiano de 50°E, que limita a leste a zona da URSS onde se realizaram as atualizações aos dados LUH/HYDE (zona a Oeste da linha).

A metodologia utilizada é resumida na Figura 4.2, através de um fluxograma, e detalhada nos parágrafos seguintes.

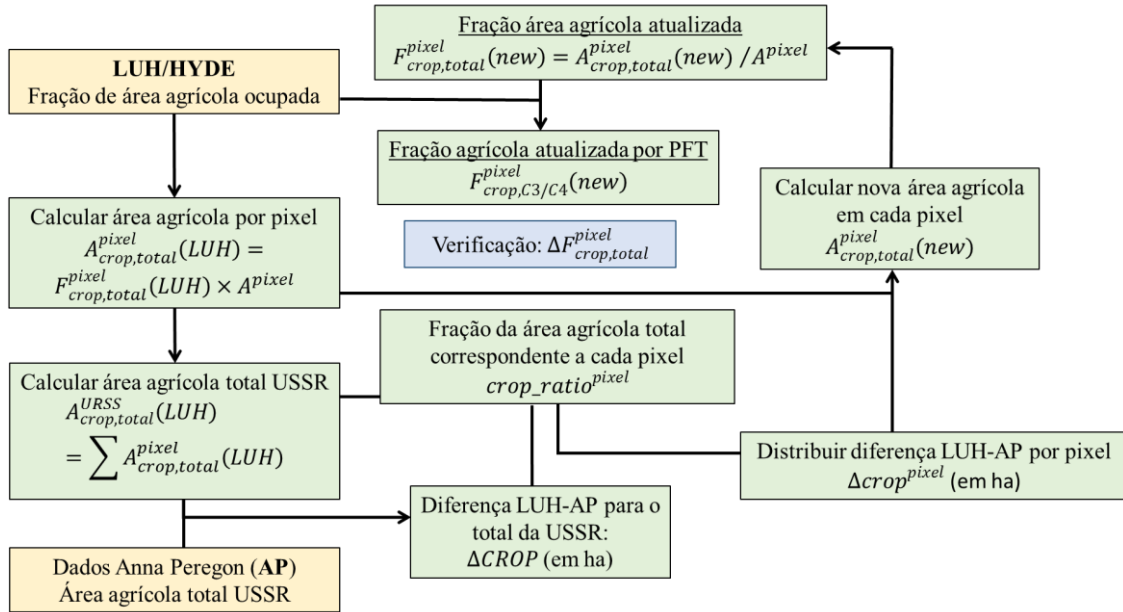


Figura 4.2 – Fluxograma ilustrativo da metodologia utilizada na atualização dos dados agrícolas LUH/HYDE através dos dados de Anna Peregon.

Calculou-se a diferença das áreas agrícolas (agregadas para a URSS) entre os dados LUH/HYDE e os dados AP ($\Delta CROP$, Equação 4.1). Pretende-se remover área agrícola em cada pixel de forma a manter a distribuição espacial da mesma. Assim, calculou-se a fração de área agrícola em cada pixel em relação à área total da zona em que se pretende atualizar os dados ($crop_ratio^{pixel}$, Equação 4.2). De salientar que a fração de área agrícola por pixel corresponde à soma dos dois PFTs agrícolas considerados (C3 e C4 segundo o modelo ORCHIDEE).

$$\Delta CROP = A_{crop,total}^{URSS}(LUH) - A_{crop,total}^{URSS}(AP) \quad (4.1)$$

$$crop_ratio^{pixel} = \frac{A_{crop,total}^{pixel}(LUH)}{A_{zona,total}^{pixel}(LUH)} \quad (4.2)$$

Através da multiplicação entre $\Delta CROP$ e $crop_ratio^{pixel}$, obtém-se a área agrícola excedente em cada pixel ($\Delta crop^{pixel}$, Equação 4.3), que é de seguida retirada à área agrícola dos dados LUH/HYDE, resultando em novos valores de área agrícola após a correção ($A_{crop,total}^{pixel}(new)$, Equação 4.4).

$$\Delta crop^{pixel} = \Delta CROP \times crop_ratio^{pixel} \quad (4.3)$$

$$A_{crop,total}^{pixel}(new) = A_{crop,total}^{pixel}(LUH) - \Delta crop^{pixel} \quad (4.4)$$

Estes valores são transformados em frações de áreas respetivas a partir da divisão pela área do pixel (variável). A distribuição dessas novas frações pelos dois PFTs de campos agrícolas considerados ($F_{crop,C1/C2}^{pixel}(new)$), pelos dados LUH/HYDE é feita proporcionalmente à distribuição dos 2 PFTs antes da correção (Equação 4.5).

$$F_{crop,C3/C4}^{pixel}(new) = F_{crop,total}^{pixel}(new) \times \frac{F_{crop,C3/C4}^{pixel}(LUH)}{F_{crop,total}^{pixel}(LUH)} \quad (4.5)$$

A diferença entre a quantidade de área agrícola total antes e depois da correção ($\Delta F_{crop,total}^{pixel}$, Equação 4.6) deve ser igual à quantidade representada por $\Delta crop^{pixel}$, o que se verifica.

$$\Delta F_{crop,total}^{pixel} = F_{crop,total}^{pixel}(LUH) - F_{crop,total}^{pixel}(new) \quad (4.6)$$

Após a atualização dos dados, testou-se a validade dos pressupostos utilizados acerca da distribuição espacial das correções através dos dados de áreas agrícolas totais das Repúblicas Federais pertencentes à URSS fornecidos por Anna Peregon. Essa verificação consistiu no cálculo das áreas agrícolas totais associadas a cada República Federal a partir dos dados atualizados, com o intuito de comparar com os valores de Anna Peregon e avaliar a distribuição das áreas agrícolas obtida com a atualização.

4.2. Atualização de dados de floresta e herbáceas

A correção efetuada do mapa de vegetação implicou retirar área agrícola em todos os pixels da zona escolhida (representada por $\Delta F_{crop,total}^{pixel}$). Assim, é necessário definir cenários para o tipo de vegetação que terá sucedido ao abandono de área agrícola (Figura 4.3).

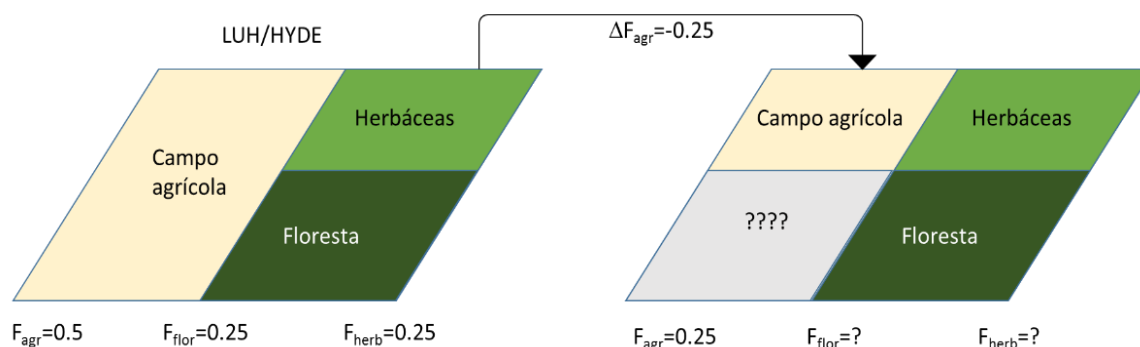


Figura 4.3 – Esquema ilustrativo da atualização dos dados agrícolas em cada pixel.

Foram definidos três cenários distintos (cf. Figura 4.4) para avaliar a influência das diferentes trajetórias de sucessão possíveis. Consideraram-se cenários em que o abandono levou a i) preferencialmente crescimento de floresta (C1); ii) preferencialmente crescimento de herbáceas (C2) e iii) uma combinação de ambos os cenários anteriores, em partes iguais (C3). Limitou-se a substituição por algum tipo de floresta ou herbáceas apenas aos pixels onde esse tipo de coberto do solo já existia antes da correção (nos dados LUH/HYDE). Deste modo, aplicou-se para cada cenário a estratégia seguinte:

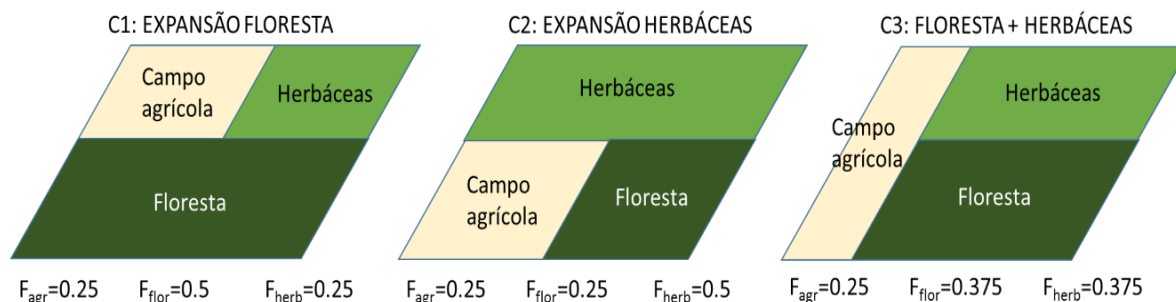


Figura 4.4 – Esquema ilustrativo dos três cenários considerados para a reposição (por floresta e herbáceas) das áreas agrícolas retiradas na atualização. São consideradas *net* LULCC.

C1) A quantidade de floresta adicionada tem em conta a fração de área agrícola sobrestimada ($\Delta F_{crop,total}^{pixel}$) e as frações que cada PFT de floresta apresenta em cada pixel nos dados LUH/HYDE, sendo que a substituição só acontece em pixels onde cada PFT exista originalmente, de forma proporcional à fracção ocupada por cada PFT de floresta, de acordo com a Equação 4.7. A quantidade resultante deste cálculo é somada, pixel a pixel, à fracção original de cada PFT de floresta considerada, resultando nas fracções corrigidas de floresta, por PFT, para cada pixel. No entanto, alguns pixels onde é retirada área agrícola não apresentam nenhum PFT de floresta. Nesses casos considerou-se que a área agrícola é substituída por herbáceas com a mesma metodologia utilizada para a floresta, ou seja, onde não existe possibilidade de expansão de floresta, irá ocorrer preferencialmente expansão de vegetação herbácea.

$$\Delta F_{floresta,tipo}^{pixel} = \Delta F_{crop,total}^{pixel} \times \frac{F_{floresta,tipo}^{pixel}(LUH)}{F_{floresta,total}^{pixel}(LUH)} \quad (4.7)$$

C2) A metodologia utilizada para este cenário é semelhante à descrita para C1, em que a única diferença reside no facto de se dar preferência à expansão de vegetação herbácea, sendo a expansão de floresta o fenómeno que colmata as lacunas dos pixels onde não existe qualquer tipo de herbácea (i.e. a vegetação natural é composta totalmente por floresta). A quantidade de cada PFT de vegetação herbácea (C3 ou C4) adicionada é proporcional à fracção ocupada em cada pixel pelo respetivo PFT nos dados LUH/HYDE, novamente de acordo com a Equação 4.7 (substituindo os índices de floresta por herbáceas).

C3) O terceiro cenário considera a ocorrência de ambos os fenómenos dos cenários anteriores em igual medida (50% expansão de floresta, 50% expansão de herbáceas). O método utilizado é semelhante ao utilizado nos cenários 1 e 2. Neste caso existem igualmente pixels que não possuem nenhuma fracção de floresta ou herbáceas, e nesses casos adiciona-se exclusivamente herbáceas ou florestas, dependendo do tipo de coberto original.

4.3. Simulação dos fluxos de CO₂ usando ORCHIDEE-MICT

Os dados atualizados são utilizados como *input* no modelo ORCHIDEE-MICT (Zhu *et al.*, 2015). As simulações foram forçadas pelos dados climáticos CRU-NCEP (CRU TS3.23; Harris *et al.*, 2015) de acordo com o protocolo definido em Le Quéré *et al.* (2015) com resolução espacial de 2° lat/lon para a área compreendida entre 15°-180°E e entre 30°-90°N, bem como pela concentração atmosférica global de CO₂, entre 1860-2012, apresentadas na Figura 4.5 (Dlugokencky & Tans, 2015). Para que os *stocks* de carbono no solo e na vegetação atingissem o equilíbrio, foi efectuado um *spin-up* de 150 (SECHIBA+STOMATE) + 10000 (STOMATE) + 150 (SECHIBA+STOMATE) anos, usando ciclicamente a variabilidade climática de 1901-1910.

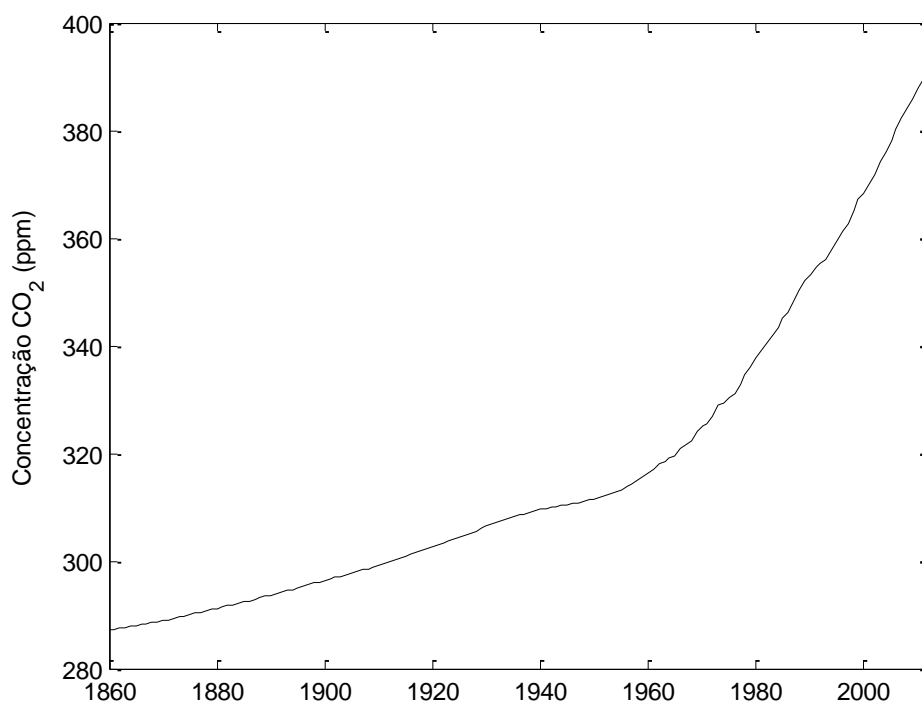


Figura 4.5 – Evolução temporal da concentração atmosférica global de CO₂ utilizada como forçamento para o modelo ORCHIDEE-MICT.

Foram realizadas 8 corridas do modelo para 8 simulações distintas com o objetivo de avaliar a contribuição de diferentes processos relacionados com LULCC. As diferenças entre essas simulações residem nos dados de *input* de LULCC, na consideração dos impactos de incêndios e, por fim, na utilização da componente dinâmica da vegetação (DGVM). As características de cada simulação estão apresentadas na Tabela 4.1. A simulação de referência, S0, utiliza como área agrícola os valores de LUH/HYDE, inclui o efeito de fogos e a composição da vegetação natural é imposta igualmente pelos dados LUH/HYDE.

Tabela 4.1 – Lista de simulações realizadas neste estudo e suas características, (S) para módulo ativado e (N) para módulo desativado.

Simulações	LULCC	DGVM	Incêndios	SX – S0
S0 (ref.)	LUH/HYDE	N	S	-
S1	N	N	S	LULCC
S1.C1	AP – C1	N	S	AP – C1
S1.C2	AP – C2	N	S	AP – C2
S1.C3	AP – C3	N	S	AP – C3
S2	LUH/HYDE	N	N	Incêndios
S3	LUH/HYDE (área agrícola)	S	S	DGVM
S3.C	AP (área agrícola)	S	S	DGVM – AP

A diferença entre as simulações (SX – S0) permite avaliar a contribuição parcial de cada processo. A simulação S1 não inclui eventos de LULCC e utiliza o mapa de coberto do solo de 1901 dos dados LUH/HYDE ao longo de todo o período; as simulações S1.CX (C1, C2 ou C3, dependendo do cenário utilizado) consideram como base os mapas de LULCC produzidos no presente trabalho, através da metodologia descrita anteriormente. A simulação S2 é semelhante à S0, mas não considera eventos de incêndio. Por fim, em S3 e S3.C o módulo de vegetação dinâmica está ativo, i.e. apenas a área agrícola

é prescrita, e o modelo calcula a distribuição de floresta e herbáceas. No primeiro, o modelo usa como área agrícola os dados LUH/HYDE e no segundo, as distribuições dos dois PFTs de áreas agrícola são iguais aos cenários C1, C2 e C3 (resultantes dos dados AP), sendo a distribuição dos restantes PFTs determinada pelo modelo.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão

5.1. Atualização dos dados agrícolas

A base do procedimento de atualização dos dados parte da diferença entre a área total de campos agrícolas na URSS fornecida pelas bases de dados LUH/HYDE e AP, i.e. $\Delta CROP$, apresentada na Figura 5.1.

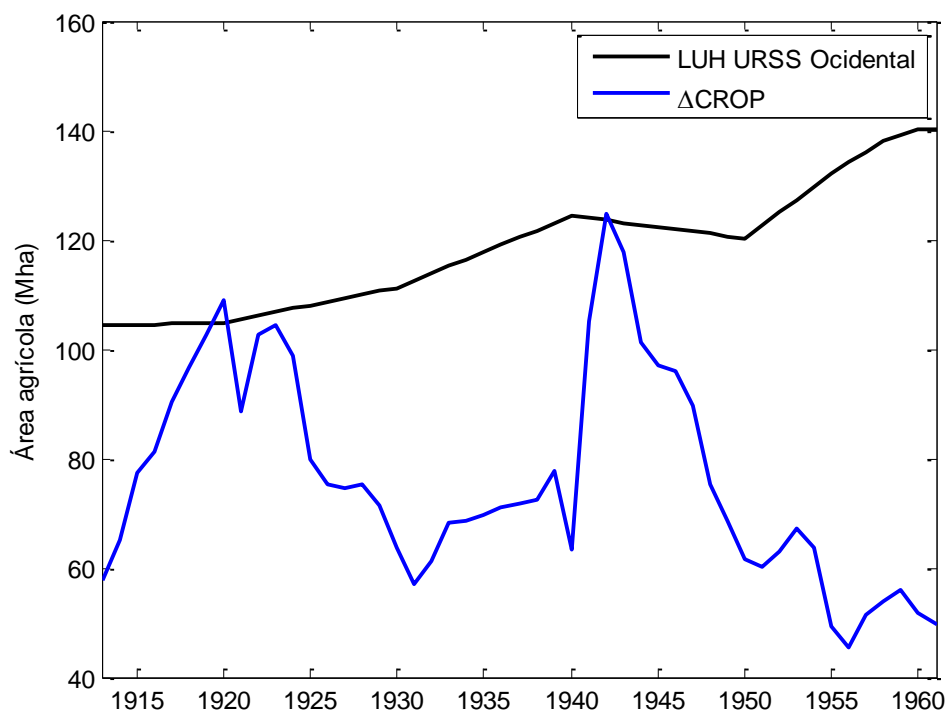


Figura 5.1 – Comparação da diferença das áreas agrícolas totais para o território da URSS entre dados LUH/HYDE e dados AP ($\Delta CROP$) com a área agrícola total presente na URSS a Oeste de 50°E. Nos anos em que $\Delta CROP$ é superior à área presente nessa zona, a atualização dos dados estendeu-se ao restante território da URSS.

Observa-se que $\Delta CROP$ tem valores máximos nos anos de 1920 e 1942, que correspondem a diferenças de 109 e 124.8 Mha, respetivamente. Estes máximos são coincidentes com a ocorrência de eventos com impactos relevantes na população e na produção agrícola, nomeadamente a Guerra Civil Russa (1918-1921) e a 2ª Guerra Mundial da década de 1940 (Nove, 1982; Gatrell & Harrison, 1993). Em ambos os casos, o conflito armado estava principalmente instalado nas regiões ocidentais do território da URSS (destacando-se a Ucrânia, a região do Volga e o Norte do Cáucaso), e resultou num decréscimo populacional e de área agrícola bastante acentuado nessas zonas (em 1940 e provavelmente também em 1918-1921) (Nove, 1982; Linz, 1984), que não é representado nos dados LUH/HYDE. É de salientar que os anos referidos são os anos em que $\Delta CROP$ é superior à quantidade de campos agrícolas existentes na zona a Oeste do Volga (Figura 5.1), i.e., em que se retirou área agrícola a Este do Volga.

Nota-se que o valor mais baixo de $\Delta CROP$ é de 45.6 Mha em 1956, sendo ainda um valor bastante relevante (34% da área agrícola presente na zona a Oeste do Volga apresentada nos dados LUH/HYDE). A acentuada subida a partir de 1940 até ao pico de 1942 está associada à forte queda nas áreas agrícolas reportadas pelos dados AP (62.7 Mha em dois anos, cf. Figura 3.2), não representada nos dados LUH/HYDE dado que estes representam variações sobretudo à escala decadal.

A distribuição espacial de $\Delta CROP$ pelos pixéis da zona a Oeste do Volga para o ano de 1940 é apresentada na Figura 5.2, onde se pode observar a fração de área agrícola sobrestimada em LUH/HYDE em cada pixel ($\Delta crop^{pixel}$). No ano de 1940, o máximo de área agrícola retirada num pixel foi de 0.1 Mha, o que representa cerca de 51% da área total do pixel em causa.

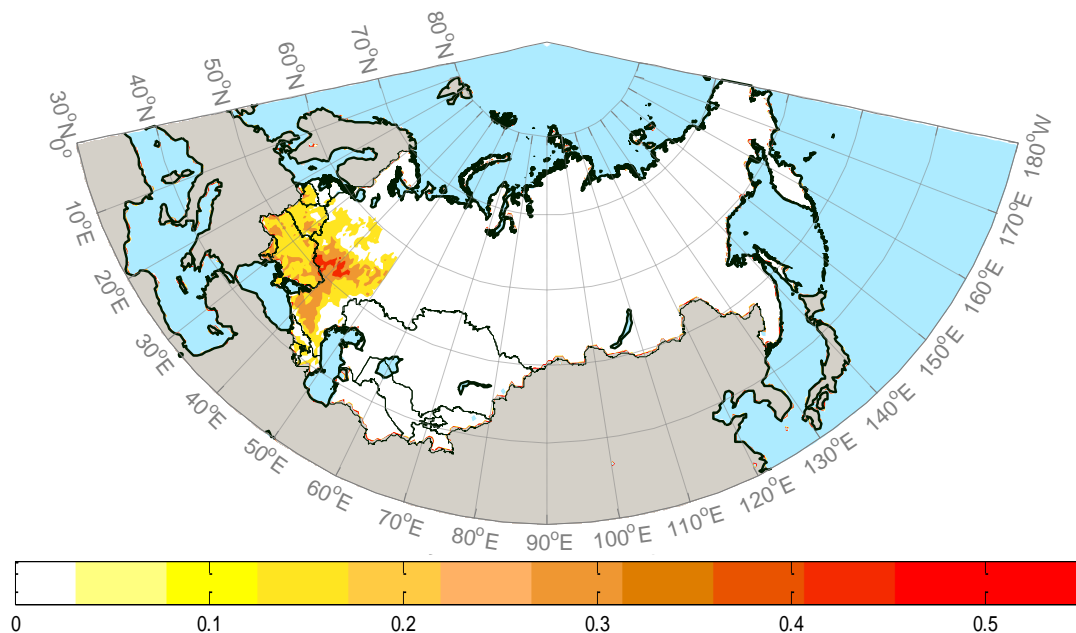


Figura 5.2 – Distribuição espacial da área agrícola a retirar dos dados LUH/HYDE, em fração da área de cada pixel, para o ano de 1940.

A Figura 5.3 mostra os mapas de distribuição espacial das áreas agrícolas para o ano de 1940 antes e depois da atualização e a Figura 5.4 apresenta para o mesmo ano a distribuição espacial de área agrícola de tipo C3, em fração da área de cada pixel, na URSS antes (à esquerda) e depois (à direita) da atualização dos dados LUH/HYDE. No painel à direita da Figura 5.3 é evidente a acentuada redução de área agrícola na região ocidental, afetando sobretudo o PFT agrícola C3, que predomina nas áreas agrícolas selecionadas (Figura 5.4).

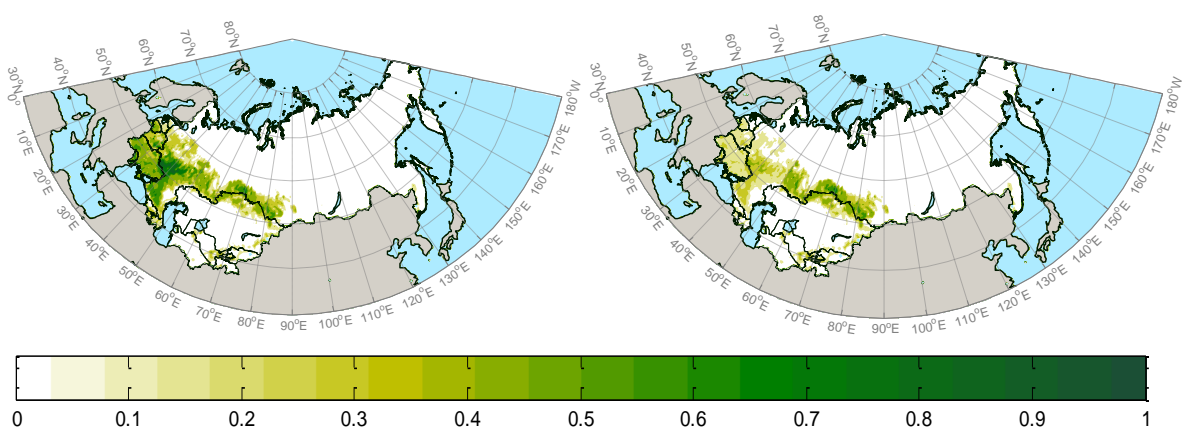


Figura 5.3 – Distribuição espacial de área agrícola (em fração da área de cada pixel) na URSS antes (à esquerda) e depois (à direita) da atualização dos dados LUH/HYDE, para o ano de 1940.

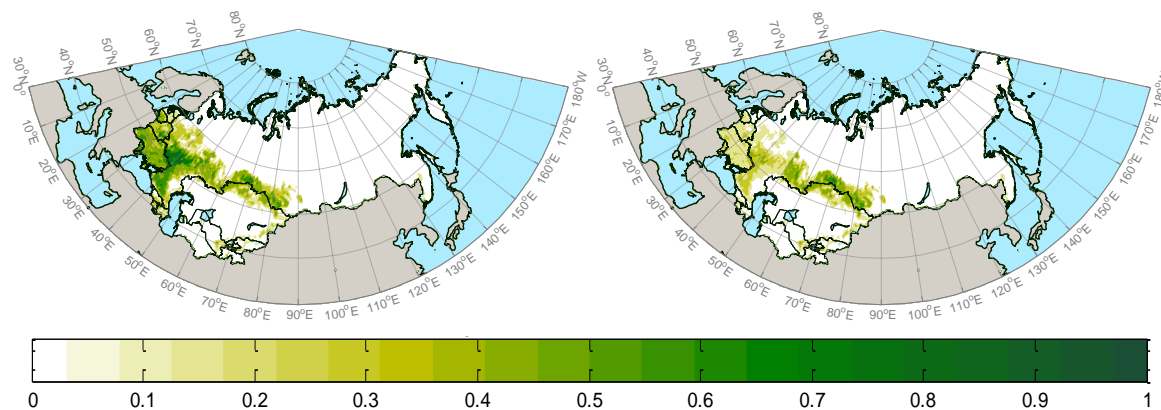


Figura 5.4 - Distribuição espacial de área agrícola de tipo C3, em fração da área de cada pixel, na URSS antes (à esquerda) e depois (à direita) da atualização dos dados LUH/HYDE, para o ano de 1940.

De modo a verificar se os pressupostos utilizados na atualização dos dados LUH/HYDE são consistentes com os dados regionais, procedeu-se à comparação com os valores de áreas agrícolas totais das diferentes Repúblicas Federais que constituíam a URSS. Os resultados referentes a esta análise estão apresentados para a Rússia e a Bielorrússia na Figura 5.5 e para a totalidade dos países em Anexo.

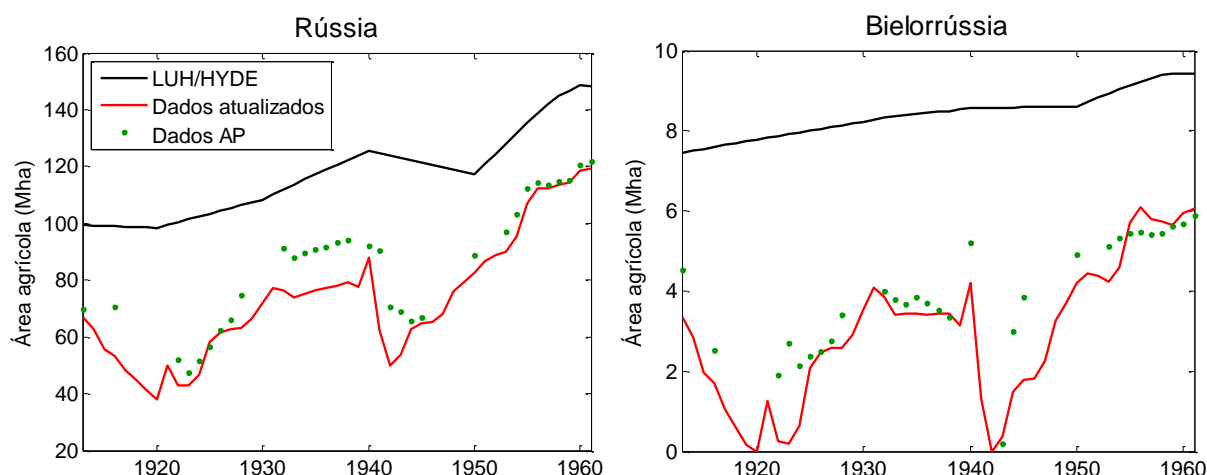


Figura 5.5 – Comparação entre áreas agrícolas totais para o território da Rússia (à esquerda) e Bielorrússia (à direita) atuais através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregón (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).

A Rússia e a Bielorrússia são os países cujos dados atualizados melhor se ajustam aos dados AP, de acordo com a comparação entre valores LUH/HYDE (a preto), Anna Peregón (a verde) e dos dados atualizados (a vermelho) de área agrícola total para ambos os países (Figura 5.5). Os restantes países podem ser divididos em três classes distintas (ver Anexo):

- 1) os dados atualizados apresentam valores de área agrícola próximos dos fornecidos por AP mas com diferente variabilidade temporal (Arménia, Azerbeijão e Geórgia);
- 2) os dados atualizados subestimam os valores de área agrícola face aos dados AP (Estónia, Letónia, Lituânia, Moldávia e Ucrânia);
- 3) os dados atualizados apresentam valores muito aproximados dos dados LUH/HYDE (Cazaquistão, Quirguistão, Tajiquistão, Turquemenistão e Usbequistão).

O comportamento dos países pertencentes à terceira classe pode ser explicado pelo facto de estarem localizados a Este do Volga, isto é, fora da zona donde se retiraram campos agrícolas na

maioria dos anos. É de salientar que a área total do território da antiga URSS ocupado pela Rússia é consideravelmente superior à área ocupada pela soma de todos os outros países (mais de 2/3 do território soviético), o que significa que o facto dos dados atualizados e AP estarem bem ajustados (as diferenças máximas entre estes dados correspondem a aproximadamente 0.6% da área total do atual território russo) para o caso da Rússia indica que o método utilizado é adequado.

5.2. Atualização de dados de floresta e herbáceas

A atualização dos dados de floresta e herbáceas é feita a partir da informação presente na Figura 5.3 de acordo com a Equação 4.7. A Figura 5.6 mostra a distribuição da “expansão” de floresta (à esquerda) e de herbáceas (à direita) para os três cenários considerados, para o ano de 1940, a título de exemplo.

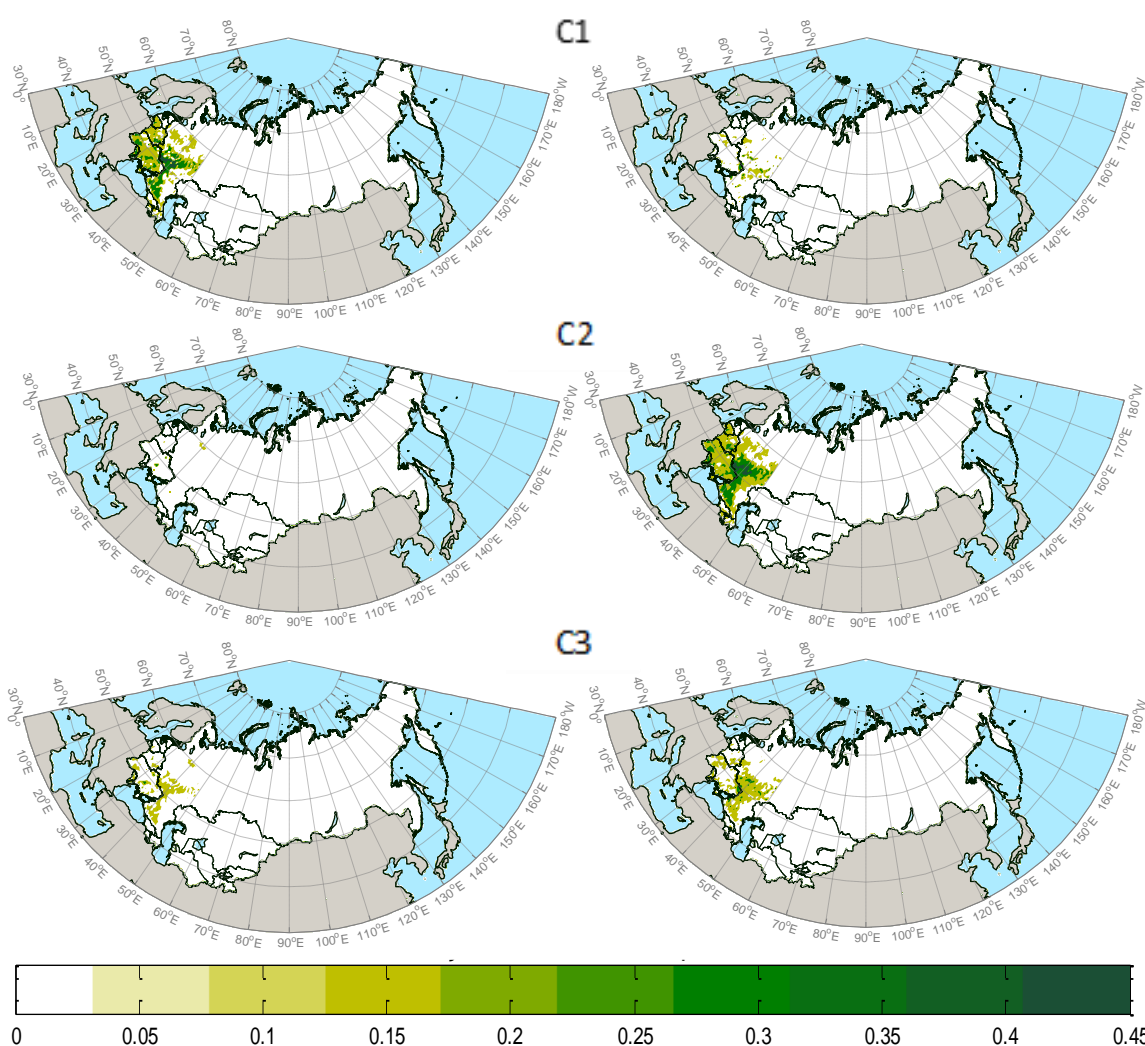


Figura 5.6 – Distribuição espacial das áreas de floresta (à esquerda) e herbáceas (à direita) adicionadas em cada cenário (C1, C2 e C3, de cima para baixo), em unidades de fração face à área representada por cada pixel, para o ano de 1940.

Em qualquer um dos cenários confirmou-se que a soma das áreas de floresta e herbáceas adicionadas iguala a quantidade de área agrícola retirada. Constata-se pela distribuição de herbáceas e floresta nos cenários C1 e C2, respetivamente, que existe um maior número de pixéis sem qualquer PFT de floresta do que pixéis sem qualquer PFT de herbáceas. A área reposta por floresta (herbáceas) foi de 51.8 Mha

(11.6 Mha), 1.9 Mha (61.4 Mha) e 26.9 Mha e (36.5 Mha), respetivamente para os cenários C1, C2 e C3.

5.3. Simulação de fluxos de CO₂ utilizando o ORCHIDEE-MICT

Utilizando as simulações descritas na Tabela 4.1 (cf. Secção 4.4), avaliaram-se os diferentes fluxos de carbono associados aos ecossistemas terrestres, calculados através do modelo ORCHIDEE-MICT. Importa avaliar inicialmente a distribuição dos tipos de vegetação (agregada em florestas, herbáceas e área agrícola) em cada simulação, ao longo do séc. XX (Figura 5.7).

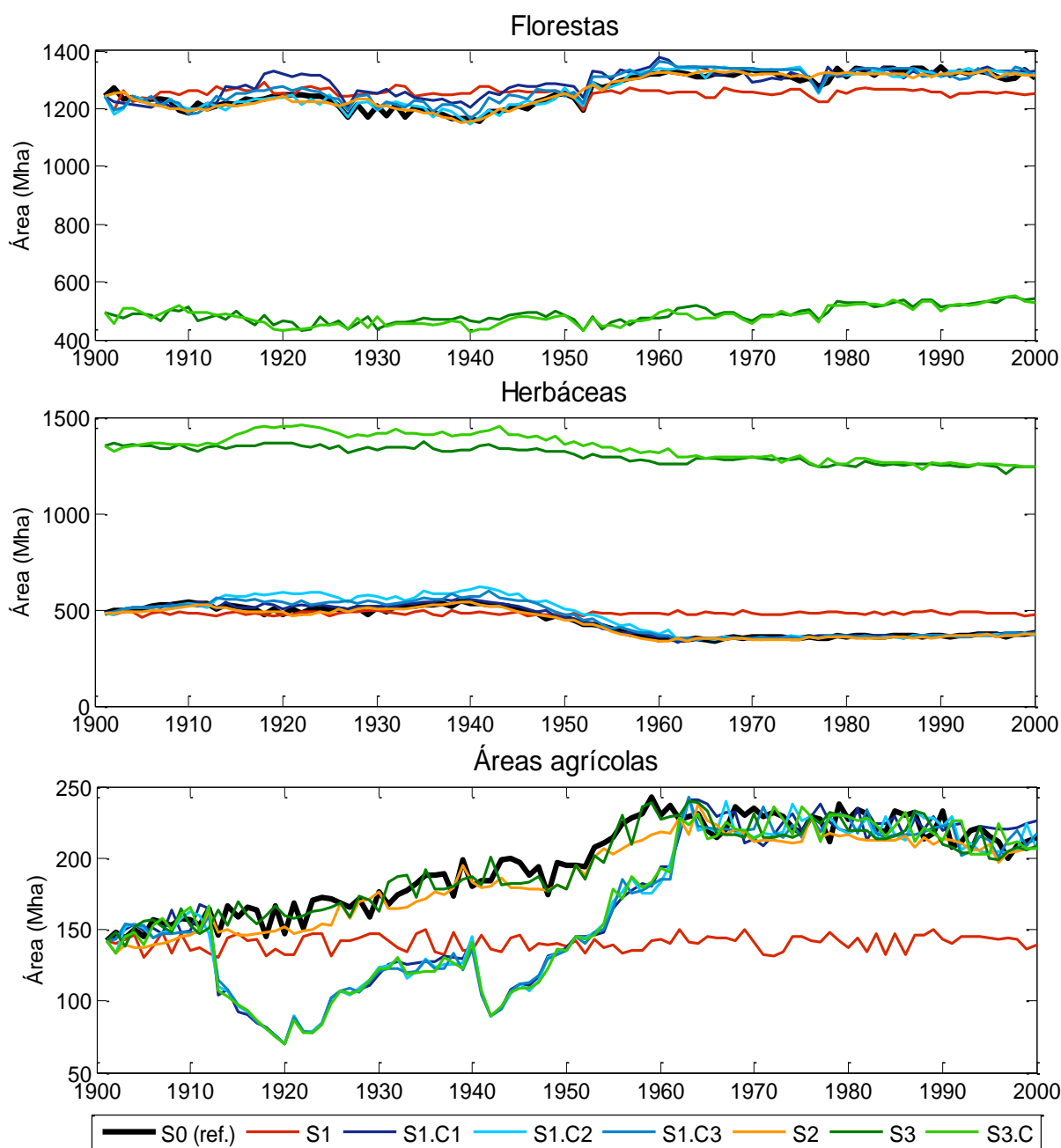


Figura 5.7- Áreas totais ocupadas por florestas, herbáceas e agricultura nos mapas considerados nas simulações do modelo ORCHIDEE-MICT.

Apesar de S1 não incluir eventos de LULCC e utilizar sempre o mesmo mapa de coberto vegetal, verificam-se ligeiras variações na composição dos diferentes tipos de vegetação, o que pode estar associado ao tipo de interpolação utilizado pelo modelo ORCHIDEE-MICT. Todas as simulações com DGVM desativado apresentam valores semelhantes a S0 e consistentes com as simulações para os diferentes cenários definidos (S1.CX). Apesar de apresentarem valores consistentes com S0 (ou S1.C1) para a área agrícola, as simulações com DGVM ativo, S3 e S3.C, sobrestimam as áreas ocupadas por herbáceas (em cerca de 800 Mha) e subestimam as áreas ocupadas por florestas (em cerca de 750 Mha). Isto decorre em parte da distribuição das áreas desses tipos de vegetação simuladas durante o *spin-up*, i.e. as condições iniciais apresentam já excesso de herbáceas e subestimação de área de florestas.

5.3.1. GPP e Respiração

Na Figura 5.8 apresenta-se a produção primária bruta (GPP) e a respiração total (Ra+Rh) ao longo do séc. XX (em cima) e as médias das diferenças anuais entre as várias simulações e a referência (SX-S0, ver Tabela 4.1) em termos de GPP (em baixo, esquerda) e respiração total (em baixo, direita), para a década de 1940.

Em todas as simulações se observa um aumento de GPP e respiração ao longo do séc. XX, que é consistente com o efeito da fertilização do CO₂ (associado ao aumento da concentração atmosférica desse gás), bem como com o aumento na duração da estação de crescimento, como sugerido na literatura (Boisvenue & Running, 2006; Zhuang *et al.*, 2010; Houghton *et al.*, 2012; Fisher *et al.*, 2013). Para além disso, se não se considerarem as décadas mais recentes (a partir de 1980), constata-se que GPP e respiração apresentam valores mais elevados na década de 40, destacando-se a subida acentuada entre 1940-1944, que é representada em todas as simulações. De notar ainda que, em qualquer simulação, os valores de GPP e respiração apresentam variabilidades similares, como seria de esperar, visto que quanto maior for a produção primária bruta (maior crescimento da vegetação), maior será a quantidade de energia utilizada pela vegetação na sua manutenção (ou seja, Ra irá ser proporcionalmente maior) e maior será a quantidade de resíduos produzidos pela vegetação (Rh irá ser também superior), contribuindo para um aumento da respiração total (Janssens *et al.*, 2001; Yuan *et al.*, 2012). As simulações com DGVM ativo apresentam valores de GPP e respiração (Ra+Rh) bastante mais elevados do que as restantes simulações, com valores entre 9-15 PgC/ano e 8.5-13 PgC/ano para GPP e respiração total, respetivamente, enquanto as outras simulações apresentam valores entre 7 a 12.5 PgC/ano e 6.6 a 11 PgC/ano, de GPP e respiração total, respetivamente.

Focando nas diferenças entre as simulações e a simulação de referência para a década de 1940 (Fig. 5.8, painéis em baixo), observa-se que apenas S3 e S3.C apresentaram valores médios de GPP e Ra+Rh superiores a S0 em cerca de 2-2.5 PgC/ano. Todas as outras simulações apresentam valores inferiores à referência, com diferenças médias de menor magnitude (inferiores a 0.5 PgC/ano). Alguns destes comportamentos são incoerentes com a dinâmica esperada, em primeiro lugar, pela discrepância entre S3 e S3.C e as restantes simulações, e, em segundo, pelo facto de S1 (sem LULCC) e S1.CX (menor área agrícola) apresentarem valores de GPP e respiração inferiores à referência. A contribuição das LULCC (avaliada por S1-S0) é normalmente negativa na produtividade (e respiração) da vegetação, pelo que seria expectável que S1-S0 fosse positivo. A situação é idêntica para o impacto da presença de área agrícola (S1.CX-S0), devido à maior capacidade de sequestro de carbono (maior produtividade) das florestas e herbáceas em relação aos campos agrícolas.

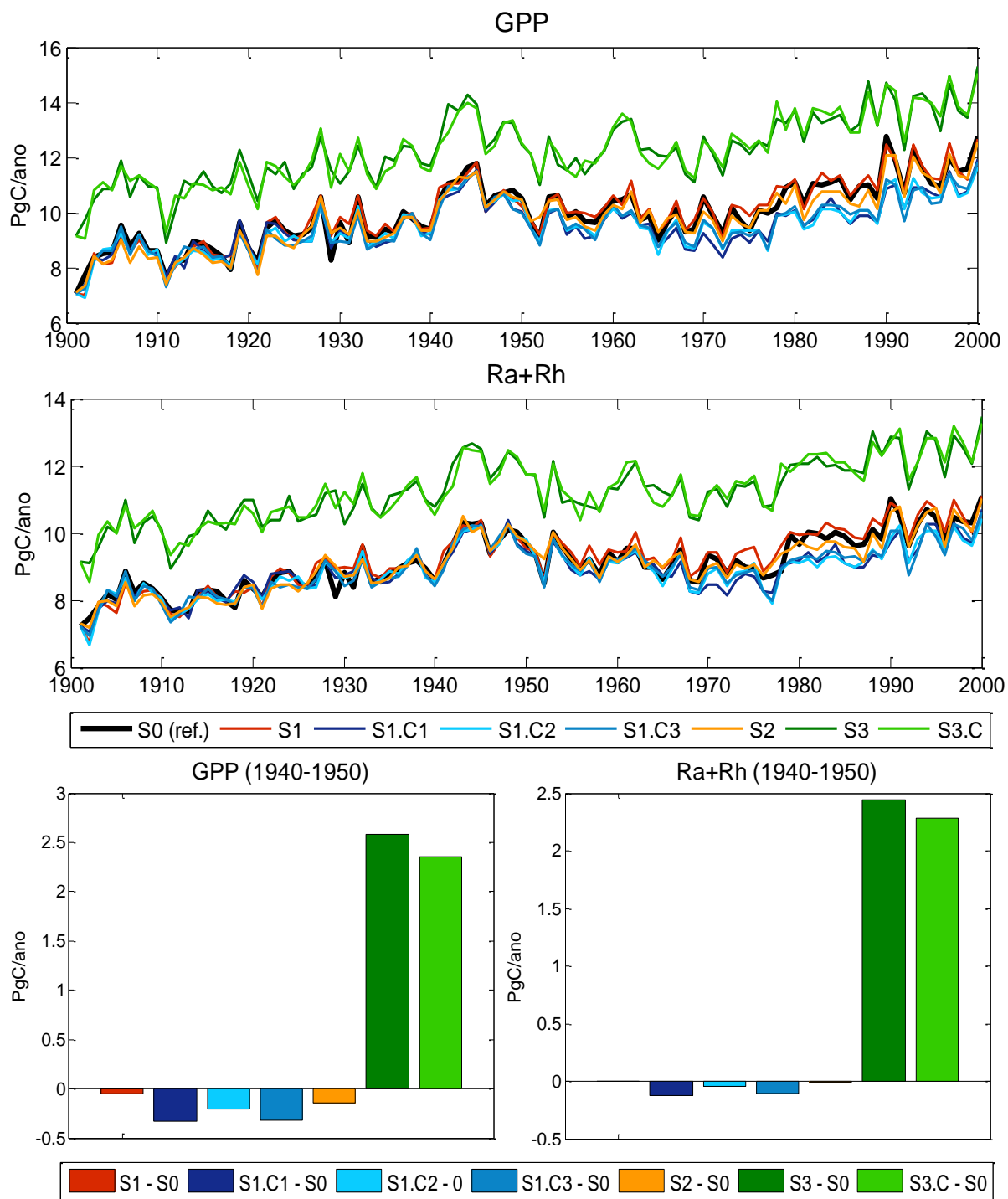


Figura 5.8- Evolução temporal da produção primária bruta e respiração total (em cima) dos ecossistemas terrestres simulados pelo modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX. Valores médios das diferenças anuais entre as diferentes simulações e a referência para produção primária bruta (à esquerda, em baixo) e respiração total (à direita, em baixo), para o período 1940-1950.

5.3.2. Incêndios e Colheita Agrícola

A Figura 5.9 apresenta a evolução temporal das emissões associadas a fogos (em cima), bem como os fluxos de carbono correspondentes a colheitas agrícolas (em baixo). S3 e S3.C apresentam valores mais elevados de emissões de fogos do que os restantes, bem como uma maior variabilidade interanual, o que pode estar associado à quantidade de herbáceas consideradas pelo modelo nestas

simulações (dada a maior inflamabilidade deste tipo de vegetação). Os valores de emissões por incêndio para estas simulações situam-se entre 0.15-1.1 PgC/ano, ao passo que as emissões de incêndios não ultrapassam 0.29 PgC/ano para S0. As simulações S1.CX conduzem emissões por ocorrência de incêndios mais elevadas (em relação a S0) durante 1913-1961, especialmente as simulações que possuem maior quantidade de vegetação herbácea (por ordem decrescente, S1.C2, S1.C3 e S1.C1), pela mesma razão apresentada para o comportamento de S3 e S3.C. A simulação sem LULCC (S1) apresenta emissões de fogos superiores a S0 a partir da década de 40, o que pode ser explicado pelo facto de a partir desse momento a quantidade de vegetação herbácea em S0 ter diminuído enquanto em S1 se manteve relativamente constante (ver Fig. 5.7). As emissões para S1 atingiram o seu valor máximo de 0.37 PgC/ano, em 1992. Até 1960, os valores destas emissões para S0 estão entre 0.045-0.26 PgC/ano, enquanto os valores máximos das simulações S1.CX apresentam valores entre 0.36 e 0.66 PgC/ano. Excetuando S3 e S3.C, todas as simulações apresentam picos de emissões de incêndios nos anos de 1915, 1920, 1936 e 1938.

No que toca às colheitas agrícolas, S0, S2 e S3 apresentam valores similares ao longo de todo o século, compreendidos entre 0.17-0.47 PgC/ano (entre 1901 e 1970). A simulação S1 apresenta uma variabilidade interanual similar a S0, apesar de simular colheitas inferiores, especialmente nas últimas décadas do século XX. As simulações correspondentes a menor área agrícola (S3.C e S1.CX) apresentam fluxos devido a colheitas substancialmente inferiores aos da simulação de referência. A partir do início do período de atualização dos dados (1913), ambas as simulações mostram um decréscimo muito acentuado (cerca de 0.2 PgC até 1920). A partir dessa altura, as simulações S1.CX conduzem a valores e variabilidades muito similares (0.07-0.2 PgC/ano), enquanto S3.C apresenta aumentos acentuados na metade da década de 20, na metade da década de 40 e a partir da década de 50 até atingir a gama de valores de S4.

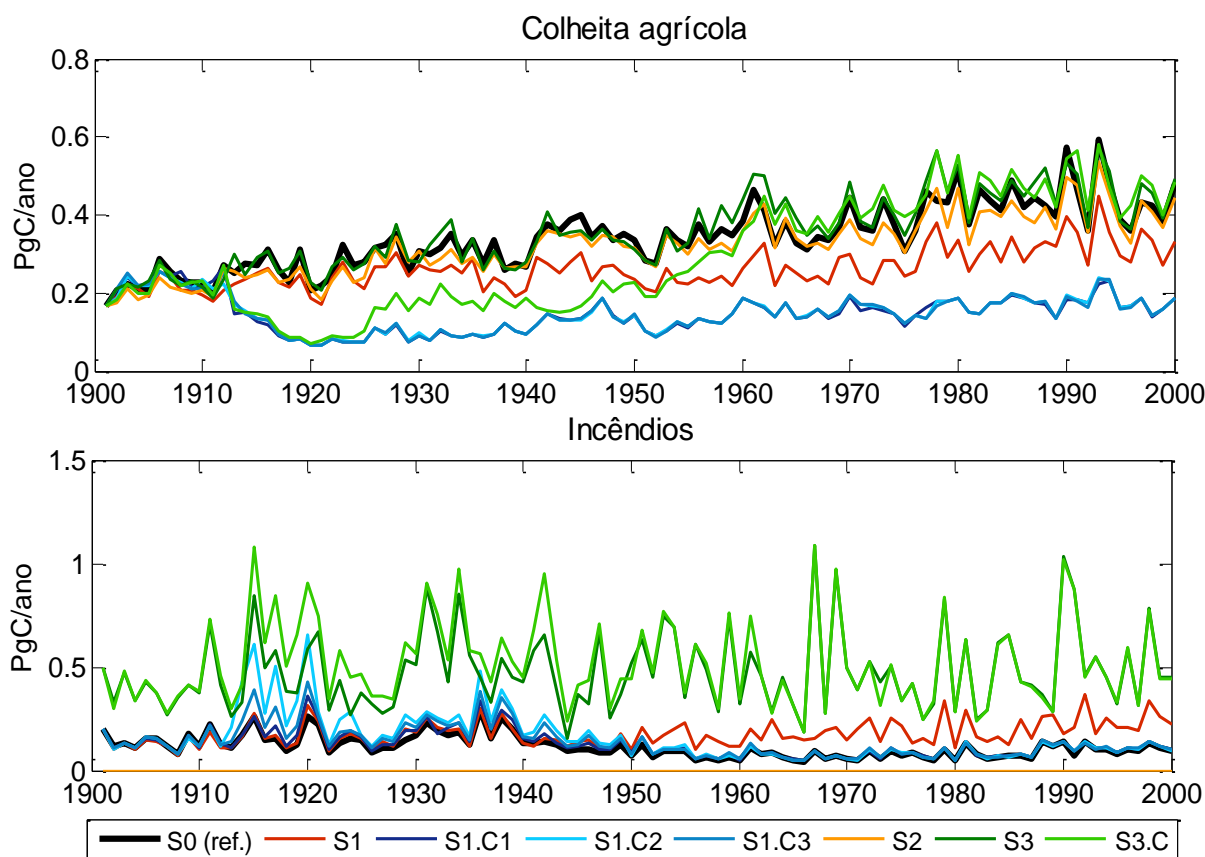


Figura 5.9- Evolução temporal das emissões para a atmosfera a partir de incêndios (em cima) e dos fluxos associados a colheitas agrícolas (em baixo), simulados pelo modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX.

5.3.3. NBP e Stocks C no solo

A Figura 5.10 (em cima) apresenta a variabilidade de NBP e a variação ao longo do tempo dos *stocks* de carbono presentes no solo (apresentado como médias dos valores anuais a cada 5 anos), bem como as diferenças médias anuais, para a década de 1940, entre as várias simulações e a referência (SX-S0, ver Tabela 4.1), para os valores de NBP (em baixo, esquerda) e *stocks* de carbono no solo (em baixo, direita).

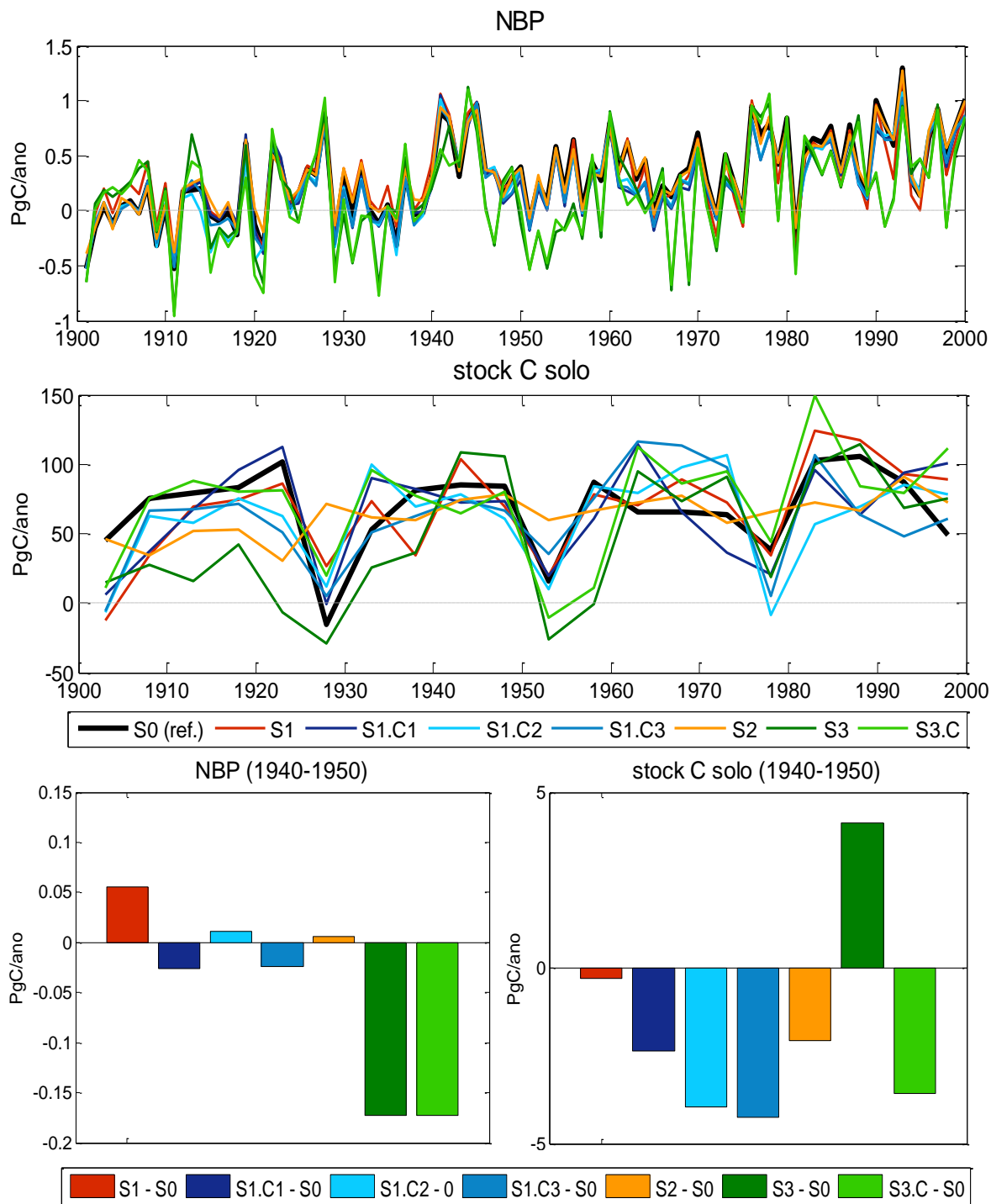


Figura 5.10- Evolução temporal de NBP e dos *stocks* de carbono no solo (em cima) a partir das simulações do modelo ORCHIDEE-MICT, durante o séc. XX. Valores médios das diferenças anuais entre as diferentes simulações e a referência para NBP (à esquerda, em baixo) e *stocks* de carbono no solo (à direita, em baixo), para o período 1940-1950.

Tal como acontece na Figura 5.8 é de destacar a década de 1940, com valores de NBP mais elevados em relação ao resto do século, sendo das poucas décadas em que as simulações S1, S1.C1, S1.C2, S1.C3 e S2 apresentam um sequestro superior à referência (cerca de 1 PgC/ano em comparação com 0.88 PgC/ano para S0, em 1941). Mais uma vez, S3 e S3.C destacam-se por apresentarem uma variabilidade superior, bem como valores bastante inferiores às restantes simulações em alguns anos. Estes comportamentos estão provavelmente relacionados com os valores superiores de emissões por fogos apresentados por estas simulações na Figura 5.9. O valor mais baixo para estas simulações foi de -0.95 PgC/ano em 1911, e o mais elevado foi de 1.12 PgC/ano em 1944. Estas simulações apresentam um comportamento bastante semelhante ao longo do século. As restantes simulações apresentam valores bastante similares à referência, à exceção de S1. Excluindo as décadas mais recentes (a partir da década de 1970), os valores de S0 estão compreendidos entre -0.53 e 0.96 PgC/ano. Em relação aos *stocks* de carbono presentes no solo, observa-se que a simulação de referência apresenta valores mínimos (máximos) nos finais das décadas de 1920 e 1970 (1950) e inícios de 1950 (1920, 1940 e 1980), e que todas as restantes simulações possuem um comportamento similar, à exceção de S2 (simulação que não considera a ocorrência de fogos). Para além disso, verifica-se que, em geral, S3 e S3.C apresentam extremos mais pronunciados que a referência, e as restantes simulações apresentam comportamentos mais irregulares.

Apesar das simulações S1.CX apresentarem valores de NBP superiores em alguns anos da década de 1940, observa-se que apenas S1.C2 apresenta uma diferença média anual positiva face à referência durante essa década. Este resultado não está de acordo com o que seria de esperar, pois sugere que a substituição de área agrícola por vegetação herbácea resultaria num sequestro mais forte em comparação a uma substituição por floresta. A simulação em que não se considerou LULCC (S1) é a que apresenta diferenças positivas mais elevadas face à referência, atingindo aproximadamente 0.05 PgC/ano, o que indica que as LULCC representadas pelos dados de referência tiveram um impacto negativo no sequestro de carbono dos ecossistemas terrestres. S3 e S3.C apresentam diferenças negativas de grande magnitude (cerca de 0.17 PgC/ano), mais uma vez, muito discrepantes face às restantes simulações. Os *stocks* de carbono presentes no solo simulados durante a década de 1940 foram inferiores à referência em todas as simulações, excetuando S3 que apresenta uma diferença positiva de cerca de 4 PgC/ano, não sendo claro quais as razões para estes resultados. De salientar que as simulações S1.CX apresentam diferenças bastante negativas, principalmente as que estão associadas aos cenários que consideram reposição de herbáceas considerável (S1.C2 e S1.C3), o que sugere que a transição de campos agrícolas para vegetação herbácea resulta em impactos bastante significativos na quantidade de carbono presente no solo.

5.3.4. Análise espacial de NBP

Além da análise dos valores agregados de NBP, é importante o conhecimento da sua distribuição espacial. A Figura 5.11 (à esquerda) apresenta a distribuição espacial de NBP acumulado ao longo do período entre 1901 e 1961 (coincidente com o fim do período de atualização dos dados realizada neste trabalho) para a simulação de referência. A simulação S0 estima um sumidouro terrestre de carbono no território soviético ao longo do período, tendo acumulado entre cerca de 0.5 e 5.76 kgC/m² entre 1901 e 1961. Existem algumas zonas que são estimadas como fontes de carbono para a atmosfera, destacando-se uma zona a Este, junto à costa russa e fronteira com a China e a Oeste, e outra zona junto às fronteiras com as atuais Bielorrússia, Letónia e Estónia, onde foram libertados respetivamente entre cerca de 0.31 e 4.4 kgC/m² e 0.52 e 11.9 kgC/m². Na Figura 5.11 (direita) é apresentada a distribuição espacial da diferença entre NBP acumulado calculado em S0 e S1 ao longo do mesmo

período. Esta comparação evidencia as zonas mais afetadas pelas atividades de LULCC durante o período 1901-1961. Observa-se que as principais diferenças residem nas zonas a Este (junto à China) e Oeste (junto à Bielorrússia, Letónia e Estónia), o que é indicador de que essas zonas foram as mais afetadas por atividades de LULCC durante os 60 anos considerados. A magnitude da diferença é similar aos valores de perda de carbono para S0 na zona a Oeste, e um pouco mais baixa a Este, o que parece indicar que a perda de carbono na zona a Oeste está mais relacionada com atividades de LULCC do que na zona Este. Os restantes territórios possuem diferenças na acumulação de carbono abaixo de 1.9 kgC/m².

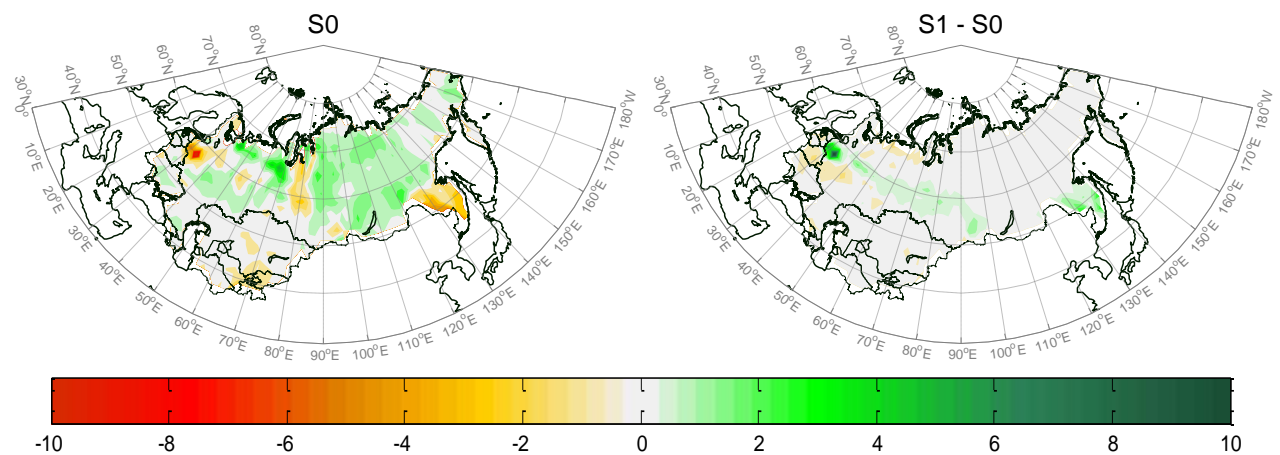


Figura 5.11- Distribuição espacial da acumulação de NBP para S0 (à esquerda) e da diferença entre acumulação entre S1 e S0 (à direita), entre 1901 e 1961 (em kgC/m²).

A Figura 5.12 apresenta resultados similares à Figura 5.11 (esquerda), para as restantes simulações durante o mesmo período de tempo.

Tal como nos resultados anteriores, S3 e S3.C apresentam diferenças superiores às restantes numa área considerável do território da URSS. As duas simulações estimam uma maior quantidade de área com diferenças negativas face a S0, de forma consistente com a informação na Figura 5.8. As simulações S1.CX conduzem a uma perda de carbono em relação a S0, mesmo no caso S1.C1 em que área agrícola é substituída por floresta. Por fim, S2 estima maior acumulação de carbono do que S0 a Norte e menor a Sul, o que significa que a ausência da ocorrência de incêndios aumenta a acumulação de carbono a Norte e diminui a Sul. As zonas que apresentam diferenças negativas (positivas) correspondem às zonas em que o fogo conduz a acumulação (perda) de carbono em S0.

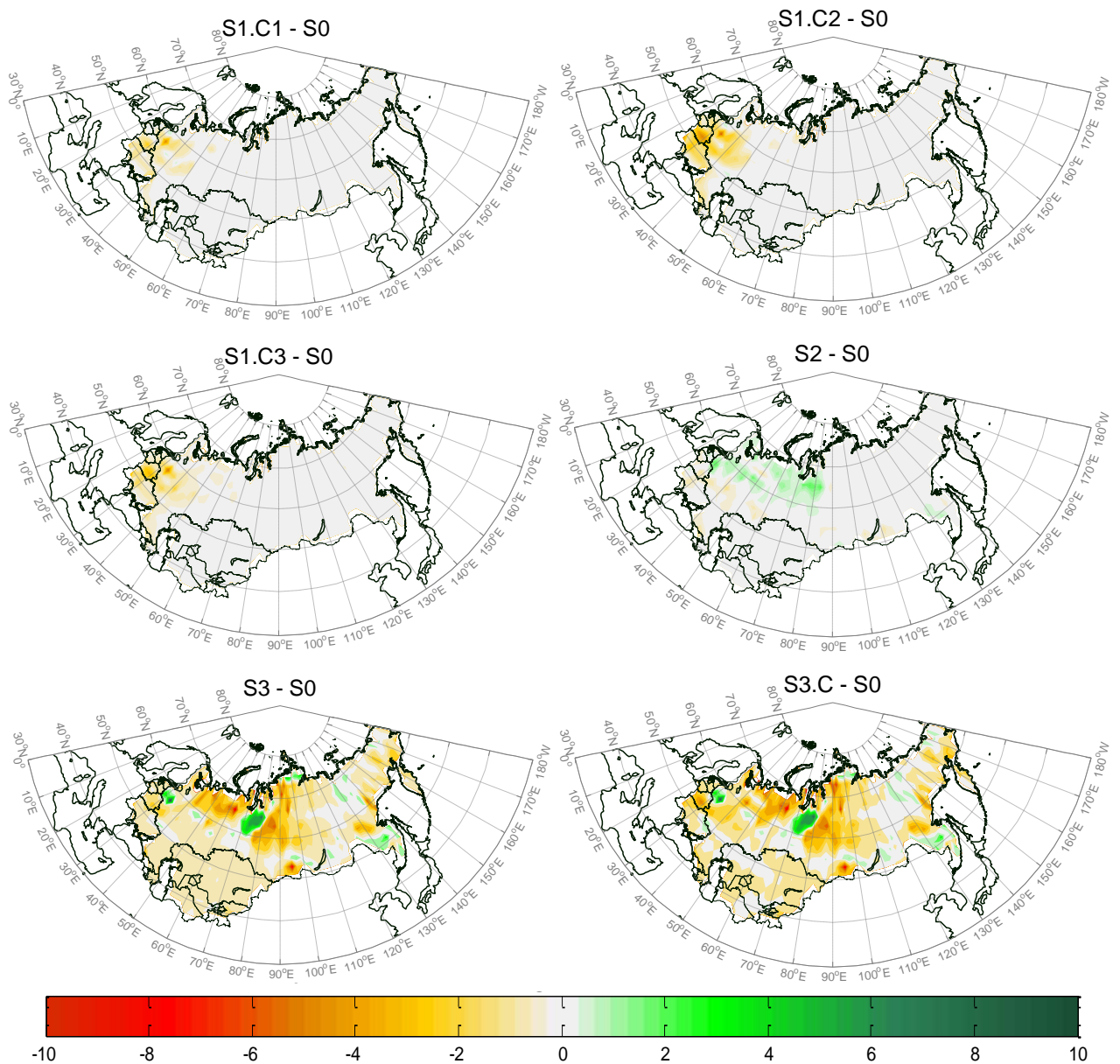


Figura 5.12- Distribuição espacial da diferença entre a acumulação de NBP entre as diferentes simulações e S0, entre 1901 e 1961 (em kgC/m²).

5.4. Discussão e refinamento das simulações

De acordo com a literatura, seria de esperar que a substituição de área agrícola por floresta em C1 produzisse uma maior quantidade de sequestro de carbono atmosférico (e.g. Hansis *et al.*, 2015). No entanto, o modelo simula para esse cenário uma fonte relativa de CO₂ ao contrário do esperado. Adicionalmente, as simulações com DGVM ativo (S3 e S3.C) sobrestimam (subestimam) a quantidade de vegetação herbácea (floresta), apresentando valores de área ocupada por estes tipos de vegetação incoerentes. Estas inconsistências parecem indicar um problema com as parametrizações para a vegetação utilizadas no modelo, mais especificamente parecem indicar uma sobre-produtividade das culturas agrícolas e vegetação herbácea em relação às florestas, provavelmente irrealista.

A assimilação de carbono no ORCHIDEE segue o modelo proposto por Farquhar *et al.* (1980), em que esta é limitada pelos mínimos da taxa de assimilação pela enzima RuBisCo (ribulose-1.5-difosfato carboxilase oxigenase) (A_c), sendo calculada a partir da Equação 5.1 (eq. 2 em Yin *et al.*, 2009):

$$A_c = \frac{(C_c - \Gamma_*)V_{c_{\max}}}{C_c + K_{mC}(1 + O/K_{mO})} - R_d \quad (5.1)$$

onde C_c é a pressão parcial de CO₂ nas áreas de carboxilação da RuBisCo, K_{mC} e K_{mO} são as constantes de Michaelis-Menten da RuBisCo para CO₂ e O₂, respetivamente, e Γ_* é o ponto de compensação do CO₂ na ausência de respiração diurna (R_d).

$V_{c_{\max}}$ é a taxa máxima de atividade da carboxilase da enzima RuBisCo, que regula a taxa de fixação de CO₂ pela RuDP (ribulose difosfato) durante o ciclo de Calvin da fotossíntese (Equação 5.1). No modelo, $V_{c_{\max}}$ é ajustada com a temperatura como descrito na Equação 5.2 (eq. 5 em Yin *et al.*, 2009), em relação à taxa de referência (a 25°C, $V_{c_{\max}25}$):

$$V_{c_{\max}} = V_{c_{\max}25}e^{(T-25)E/[298R(T+273)]} \quad (5.2)$$

onde T é a temperatura da folha, E é a energia de ativação, definindo a resposta de $V_{c_{\max}}$ à temperatura e R é a constante universal dos gases perfeitos. Segundo a Equação 5.1, quanto maior for o valor de $V_{c_{\max}25}$ maior vai ser a quantidade de carbono sequestrado pela planta, logo maior será a produção de açúcares e potencial crescimento da planta. $V_{c_{\max}25}$ não pode ser medido diretamente, mas normalmente é derivado de curvas A/C_i em modelos fotossintéticos de tipos C3 (Farquhar *et al.*, 1982) e C4 (Collatz *et al.*, 1992), onde A é a assimilação de carbono à escala da folha e C_i a pressão parcial de CO₂ presente nos espaços intercelulares da folha (Chang *et al.*, 2016).

A Tabela 5.1 apresenta os valores de $V_{c_{\max}25}$ para cada PFT utilizados em todas as simulações, tal como definidos no *setup* pré-definido do modelo (coluna esquerda). O parâmetro $V_{c_{\max}25}$ para os PFTs de agricultura e herbáceas é substancialmente superior aos valores para as florestas boreais e temperadas, o que pode explicar que S3 e S3.C tenham sobrestimado (subestimado) a quantidade de vegetação herbácea (de floresta), ao “dar prioridade” ao desenvolvimento de vegetação herbácea (mais produtiva) em detrimento de área florestal, explicando assim os valores de área apresentados na Figura 5.7. Durante o período de atualização dos dados LUH/HYDE (1913-1961), a simulação S3.C possui a mesma distribuição agrícola que S1.CX, e determina a distribuição de herbáceas e floresta através do DGVM. Comparando a evolução de S3.C e S3 para as áreas dos diferentes tipos de vegetação durante esse período, nota-se que a diferença de área agrícola entre essas simulações é praticamente reposta por vegetação herbácea em S3.C, comprovando a vantagem dada ao desenvolvimento deste tipo de vegetação face à floresta. Esta vantagem das herbáceas em relação à floresta explica também as frações muito superiores de herbáceas que o modelo simula durante o *spin-up* (onde se parte de solo nu) e a sobrestimação das áreas ocupadas por vegetação herbácea no início das simulações. Adicionalmente, o facto dos valores de GPP e NBP para as simulações S1.CX estarem abaixo dos níveis de S0 também pode ter sido causado pela atribuição de valores elevados de $V_{c_{\max}25}$ aos PFTs agrícolas.

Os valores de $V_{c_{\max}}$ para os PFTs agrícolas e de herbáceas apresentados na Tabela 5.1 são calibrados de acordo com observações nas décadas recentes. No entanto, estes valores são altamente variáveis espacialmente e são influenciados pela disponibilidade de azoto. Acresce que o modelo não simula corretamente estes processos e utiliza o mesmo valor para cada pixel, pelo que os valores podem conduzir a erros consideráveis, como demonstrado em Chang *et al.* (2013). Por exemplo, estimativas

baseadas em observações indicam intervalos de 24–131 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para herbáceas C3 e 15–46 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para C4 (Feng & Dietze, 2013; Verheijen *et al.*, 2013).

Assim, definiram-se novos valores de $V_{c_{\max}}$ para os PFTs herbáceos (Tabela 5.1, coluna direita) de acordo com Chang *et al.* (2016). Da mesma forma, os valores de $V_{c_{\max}}$ para C3 e C4 agrícolas também foram ajustados de acordo com observações em diversos sítios em França, com valores mais reduzidos. Utilizou-se ainda os valores propostos por Chang *et al.* (2016) para a área foliar específica (SLA). Foi então realizada uma segunda simulação com os dados utilizados em S1.C1 e S0 com os novos valores de $V_{c_{\max}}$ e de SLA (simulações S0* e S1.C1*).

Tabela 5.1- Valores de $V_{c_{\max}25}$ atribuídos a cada PFT em cada configuração testada. A coluna à esquerda apresenta os valores iniciais utilizados pelo modelo ($V_{c_{\max}25}$) e a coluna à direita apresenta os novos valores definidos ($V_{c_{\max}25}^*$).

	PFT	$V_{c_{\max}25}$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$V_{c_{\max}25}^*$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Floresta	Tropical de folha perene larga	65	65
	Tropical húmida de folha larga	65	65
	Temperada conífera de folha perene	45	45
	Temperada de folha perene larga	45	45
	Temperada de folha caduca larga	55	55
	Boreal conífera de folha perene	45	45
	Boreal de folha caduca larga	45	45
	Boreal conífera de folha caduca	35	35
Herbáceas	Via fotossintética C3	60	55
	Via fotossintética C4	60	25
Campos Agrícolas	Via fotossintética C3	70	45
	Via fotossintética C4	70	40

De modo a testar a fiabilidade dos novos valores de $V_{c_{\max}25}$ para os PFTs agrícolas, compararam-se os fluxos associados a colheitas agrícolas simuladas em S0 e S1.C1 com S0* e S1.C1* com valores de literatura de produção por unidade de área (Figura 5.13, em cima) e de produção total de cereais na URSS (Figura 5.13, em baixo) (Nove, 1982; Sapir, 1989). A estimativa da produção total de cereais foi feita a partir dos valores de fluxos de carbono referentes a colheita agrícola (Figura 5.13, em cima), tendo em conta a conversão entre massa da biomassa seca em unidades de carbono utilizada em Wolf *et al.* (2015). Ambas as figuras mostram que qualquer uma das simulações em que se atribuiu valores de $V_{c_{\max}25}$ inferiores, os valores de colheita agrícola se aproximam dos valores da literatura. Isto significa que os novos valores de $V_{c_{\max}25}$ atribuídos são mais realistas do que os utilizados nas simulações anteriores. Na simulação S1.C1* os valores estão bastante próximos dos valores da literatura, o que reforça a melhor qualidade dos dados AP.

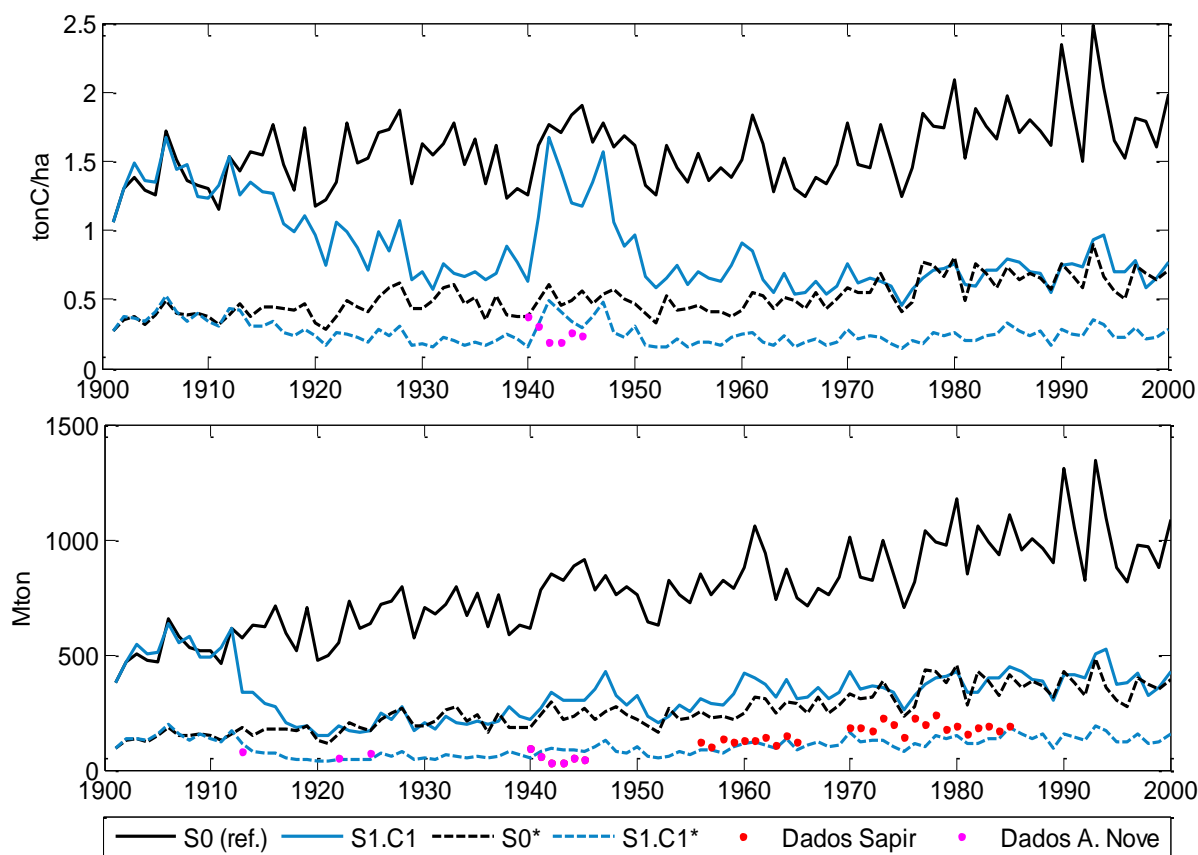


Figura 5.13- Evolução dos fluxos por área associados a colheitas agrícolas (em cima) e da respetiva produção de cereais (em baixo) para os dois grupos de valores atribuídos a $V_{c_{max25}}$, durante o séc. XX, comparando com outras fontes (Nove, 1982; Sapir, 1989).

Tendo isto em conta, comparam-se os valores de NBP e *stocks* de carbono no solo (em cima, média de 5 anos) para S1.C1* e S0* durante todo o séc. XX, para os dois pares de simulações com diferentes valores de $V_{c_{max25}}$, na Figura 5.14. Na mesma figura (em baixo), apresentam-se as mesmas variáveis, mas como diferenças médias anuais entre S1 e S1.C1* e a referência, à semelhança da Figura 5.10.

Verifica-se que não existem valores de NBP para S0* superiores aos valores de S0, o que está associado aos valores mais reduzidos de $V_{c_{max25}}$ atribuídos à vegetação herbácea e agrícola em S0*. No caso das duas simulações para o cenário C1 (conversão de área agrícola em floresta), S1.C1* estima em geral NBP superior a S1.C1, destacando-se novamente a década de 1940. Durante essa década, S1.C1* apresentou valores de NBP em média superiores a S0* (0.024 PgC/ano), ao contrário do que se havia verificado no *default setup* do modelo. O ano em que essa diferença foi máxima foi 1941, sendo 0.24 PgC/ano. De acrescentar que o ano em que S1.C1 apresentou valores mais elevados de NBP (aproximadamente 1 PgC/ano) foi 1942, coincidente com os eventos da 2ª Guerra Mundial e com o ano em que existe a maior diferença entre áreas agrícolas dos dados LUH/HYDE e AP, reforçando a hipótese do presente trabalho. Os *stocks* de carbono no solo em S1.C1* aparentam possuir valores inferiores aos de S1.C1, na maior parte do tempo do séc. XX, no entanto, S1.C1* apresenta valores superiores à respetiva referência (S0*) em certos períodos em que isso não se verifica para S1.C1 e S0, nomeadamente, na primeira metade da década de 1940 e entre meados de 1960 e 1980. Relativamente à década de 1940, esta conclusão está bem ilustrada no gráfico das diferenças médias entre as simulações (em baixo, à direita). Verifica-se que, ao contrário do que acontecia para S1.C1, S1.C1* acumulou uma maior quantidade de carbono no solo face à sua referência (S0*), sendo a diferença entre estas simulações de aproximadamente 2.5 PgC/ano.

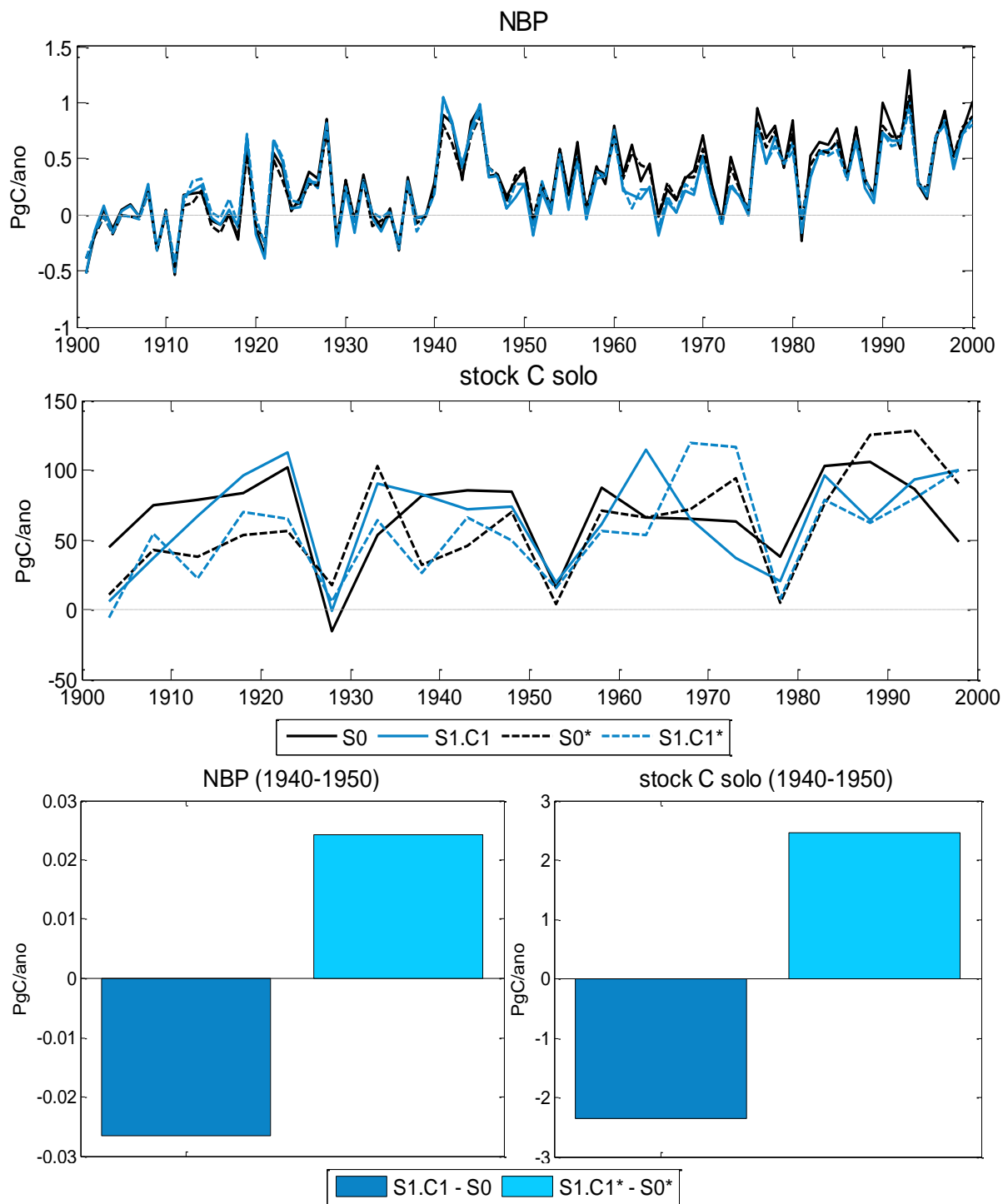


Figura 5.14- Evoluções temporais de NBP e dos stocks de carbono no solo para todo o séc. XX (em cima) e diferenças entre esses valores e os valores de S0 entre 1940 e 1960 (em baixo), para os diferentes valores de $V_{c_{max25}}$ utilizados.

Estes resultados tornam evidente o facto de que atualização dos dados utilizando os novos valores de $V_{c_{max25}}$ conduziu a uma acumulação de carbono resultante da substituição de áreas agrícolas por florestas, o que está de acordo com a literatura (Pongratz *et al.*, 2014; Hansis *et al.*, 2015).

Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O presente trabalho utiliza novos dados de área agrícola na antiga URSS (dados AP) que apontam para uma sobrestimação de área agrícola numa das bases de dados mais comumente utilizadas em estudos de LULCC: a base de dados produzida por Hurtt *et al.* (2011) (LUH/HYDE). As maiores discrepâncias entre as bases de dados são nos períodos 1915-1925 e durante toda a década de 1940, sendo esses períodos coincidentes com a ocorrência de eventos de guerra, nomeadamente, a Guerra Civil Russa e a 2ª Guerra Mundial, respetivamente. Em ambos os casos, o conflito armado resultou num decréscimo populacional e de produção agrícola relevante (sendo este último influenciado por outras razões sociais/políticas, na generalidade relacionadas com os sistemas de organização económica desses períodos). Assim sendo, os novos dados parecem captar de forma mais realista as consequências socio-económicas associadas à 2ª Guerra Mundial, sendo consistentes com os dados demográficos e de PIB soviéticos (Harrison, 2000; Bolt & van Zanden, 2014), ao contrário dos dados LUH/HYDE. Dado que a economia soviética na primeira metade do séc. XX dependia largamente da produção agrícola e a maioria da população era constituída por camponeses (Nove, 1982), os dados AP aparentam ter maior fiabilidade do que os dados LUH/HYDE. No entanto, esta conclusão não implica que os dados LUH/HYDE não possam ser utilizados para certo tipo de estudos, apenas salientam a importância de considerar os pressupostos e objetivos de cada base de dados. Os dados LUH/HYDE, além de terem uma resolução temporal de décadas, pretendem servir como base para forçamento de modelos de clima globais, bem como para avaliar LULCC para períodos muito longos (e.g. escala de séculos). O presente trabalho visa compreender as consequências de eventos relativamente curtos (e.g. 2ª Guerra Mundial), sendo portanto conveniente utilizar dados com maior resolução temporal.

Os fluxos de carbono associados aos ecossistemas terrestres foram simulados usando o modelo ORCHIDEE-MICT e as simulações, em geral, reproduzem o aumento do sumidouro terrestre ao longo do séc. XX, consistente com o efeito de fertilização de carbono e aumento na duração da estação de crescimento (Boisvenue & Running, 2006; Zhuang *et al.*, 2010; Houghton *et al.*, 2012; Fisher *et al.*, 2013). Adicionalmente, a inclusão do cenário que não considera as atividades de LULCC permitiu contabilizar a forte influência deste tipo de fenómenos na dinâmica de trocas de carbono entre atmosfera e ecossistemas terrestres. Durante a década de 1940, o modelo estima uma contribuição de LULCC de aproximadamente 0.05 PgC/ano, um valor bastante superior aos valores das restantes simulações. No entanto, certos resultados apresentam inconsistências com a dinâmica esperada (e.g. Hansis *et al.*, 2015), nomeadamente:

- 1) todas as simulações S1.CX apresentam valores de GPP, NBP e de *stocks* de carbono no solo inferiores à referência (ver Figuras 5.8 e 5.10), incluindo S1.C1, em que a área agrícola é preferencialmente convertida em floresta;
- 2) as simulações S3 e S3.C apresentam grandes discrepâncias em relação a S0 em todos os fluxos, relacionado com a subestimação de área florestal e sobrestimação de ocupação de herbáceas simulada pelo DGVM.

Estas inconsistências estão relacionadas com o facto da taxa máxima de atividade da carboxilase da enzima RuBisCo, $V_{c_{max}25}$ definida no *default setup* do modelo sobrestimar a produtividade dos PFTs de agricultura e herbáceas. Este parâmetro foi corrigido de acordo com a literatura e as simulações comparadas com os valores de produção de cereais da URSS provenientes de diferentes fontes bibliográficas. Após a calibração, a simulação S1.C1 apresenta NBP e *stocks* de carbono no solo superiores à referência, o que está de acordo com a literatura (Hansis *et al.*, 2015), dado que nessa

simulação foi considerada uma substituição de áreas agrícolas maioritariamente por floresta. As discrepâncias entre S1.C1* e S0* conduzem a uma diferença máxima na fixação de carbono terrestre de 0.24 PgC/ano (em 1941) e a uma diferença média anual entre as simulações de 0.024 PgC/ano para a década de 1940, tal como simulado pelo modelo ORCHIDEE-MICT. Assim, este trabalho mostra que o decréscimo da extensão de áreas agrícolas na URSS durante a década de 1940 pode, de facto, ter influenciado o sequestro de carbono terrestre e constituir uma parte do sumidouro ainda não contabilizado nalgumas reconstruções de E_{LULCC} (Bastos *et al.*, 2016). Estas conclusões enfatizam a importância da:

- 1) avaliação dos dados utilizados nos estudos de atividades de LULCC, pois as discrepâncias podem comprometer o estudo desde o início, pondo em causa as hipóteses utilizadas e dificultando a análise dos resultados obtidos;
- 2) correta parametrização do modelo que irá proceder às simulações dos fluxos de carbono, visto que a parametrização imprecisa de um único parâmetro pode ter implicações consideráveis e indesejáveis para o estudo em questão e conduzir a conclusões erróneas;
- 3) validação cruzada dos resultados com diferentes tipos de indicadores e bases de dados (e.g. PIB, produção agrícola, população).

Para investigação futura, trabalhos desta natureza devem ser repetidos para outros países e outras épocas, com eventos históricos similares em que os dados agrícolas possam também apresentar erros consideráveis, e.g. na China (Ausubel *et al.*, 2013), que possui vários eventos de guerras, secas e fomes durante o séc. XX), de modo a aumentar progressivamente a fiabilidade dos dados atuais de LULCC. De forma complementar, devem ser encetados esforços visando a melhoria das parametrizações dos modelos e as calibrações dos seus parâmetros para os períodos menos recentes. Com este objetivo em vista, apresenta-se como crucial a existência de observações empíricas dos diferentes processos envolvidos ou a validação cruzada com outras fontes de dados.

Referências Bibliográficas

- Ahn, J., Brook, E. J., Mitchell, L., Rosen, J., McConnell, J. R., Taylor, K., Etheridge, D., Rubino, M. (2012). Atmospheric CO₂ over the last 1000 years: A high-resolution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2), 1–11. <http://doi.org/10.1029/2011GB004247>.
- Ausubel, J. H., Wernick, I. K., Waggoner, P. E. (2013). Peak Farmland and the Prospect for Land Sparing. *Population and Development Review*, 38, 221-242. doi:10.1111/j.1728-4457.2013.00561.x.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem–Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 2415–2434.
- Bartholome, E., Belward, A. S., Achard, F., Eva, H., Fritz, S., Bartalev, S., & Aux, P. M. A. Y. (2002). GLC 2000: Global Land Cover mapping for the year 2000, Project status November 2002, 62.
- Bastos, A., Ciais, P., Barichivich, J., Bopp, L., Brovkin, V., Gasser, T., Peng S., Pongratz, J., Viovy, N., Trudinger, C. M. (2016). Re-evaluating the 1940s CO₂ plateau. *Biogeosciences Discussions*, (May), 1–35. <http://doi.org/10.5194/bg-2016-171>.
- Boden, T. A., Marland, G., and Andres, R. J. (2009). Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Boisvenue, C., & Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity - Evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12(5), 862–882. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>.
- Bolt, J. & J. L. van Zanden (2014). The Maddison Project: collaborative research on historical national accounts. *The Economic History Review*, 67 (3), 627–651.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449. <http://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Chang, J. F., Viovy, N., Vuichard, N., Ciais, P., Wang, T., Cozic, A., Lardy, R., Graux, A.-I., Klumpp, K., Martin, R., Soussana, J.-F. (2013). Incorporating grassland management in ORCHIDEE: Model description and evaluation at 11 eddy-covariance sites in Europe. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 2165–2181. <http://doi.org/10.5194/gmd-6-2165-2013>.
- Chang, J., Ciais, P., Herrero, M., Havlik, P., Campioli, M., Zhang, X., Bai, Y., Viovy, N., Joiner, J., Wang, X., Peng, S., Yue, C., Piao, S., Wang, T., Hauglustaine, D. A., Soussana, J.-F., Peregon, A., Kosykh, N., Mironycheva-Tokareva, N. (2016). Combining livestock production information in a process-based vegetation model to reconstruct the history of

grassland management. *Biogeosciences*, 13(12), 3757–3776. <http://doi.org/10.5194/bg-13-3757-2016>.

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 465–570, doi:10.1017/CBO9781107415324.015.

Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., Berry, J. A. (1992). Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants, *Funct. Plant Biol.*, 19, 519–538.

Crisp, D., Atlas, R. M., Breon, F.-M., Brown, L. R., Burrows, J. P., Ciais, P., Connor, B. J., Doney, S. C., Fung, I. Y., Jacob, D. J., Miller, C. E., O'Brien, D., Pawson, S., Randerson, J. T., Rayner, P., Salawitch, R. J., Sander, S. P., Sen, B., Stephens, G. L., Tans, P. P., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Yung, Y. L., Kuang, Z., Chudasama, B., Sprague, G., Weiss, B., Pollock, R., Kenyon, D., Schroll, S. (2004). The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*, 34(4), 700–709. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>.

Dlugokencky, E. & Tans, P.: Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>.

Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkansky, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.-P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., Lefebvre, F., Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* (Vol. 40). <http://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>.

Eldering, A., Boland, S., Solish, B., Crisp, D., Kahn, P., Gunson, M. (2012). High precision atmospheric CO₂ measurements from space: The design and implementation of OCO-2. 2012 *IEEE Aerospace Conference*, 1–10.

Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. (1980): A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 149, 78-90.

Feng, X., & Dietze, M. (2013). Scale dependence in the effects of leaf ecophysiological traits on photosynthesis: Bayesian parameterization of photosynthesis models. *New Phytologist*, 200(4), 1132–1144. <http://doi.org/10.1111/nph.12454>.

Ferretti, D. F., Miller, J. B., White, J. W. C., Etheridge, D. M., Lassey, K. R., Lowe, D. C., MacFarling Meure, C., Dreier, M. F., Trudinger, C. M., van Ommen, T. D. (2005). Unexpected changes to the global methane budget over the last 2,000 years, *Science*, 309, 1714–1717.

Fisher, J. B., Sikka, M., Sitch, S., Ciais, P., Poulter, B., Galbraith, D., Lee, J.-E., Huntingford, C., Viogy, N., Zeng, N., Ahlström, A., Lomas, M. R., Levy, P. E., Frankenberg, C., Saatchi, S., Malhi, Y. (2013). African tropical rainforest net carbon dioxide fluxes in the twentieth century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 368(1625), 20120376. <http://doi.org/10.1098/rstb.2012.0376>.

Francey, R. J., Allison, C. E., Etheridge, D. M., Trudinger, C. M., Enting, I. G., Leuenberger, M. L., Langenfelds, R. L., Michel, E., Steele, L. P. (1999). A 1000-year high precision record of d13C in atmospheric CO₂, *Tellus*, 51, 170–193.

Fuchs, R., Herold, M., Verburg, P. H., Clevers, J. G. P. W., Eberle, J. (2015). Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900 and 2010. *Global Change Biology*, 21(1), 299–313. <http://doi.org/10.1111/gcb.12714>.

Gatrell, P. & Harrison, M. (1993): The Russian and Soviet economies in two world wars: a comparative view. *The Economic History Review*, 46 (3): 425-452.

Giglio, L., Randerson, J. T., Werf, G. R. Van Der. (2013). Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4), *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118, 317–328. <http://doi.org/10.1002/jgrg.20042>.

Gitz, V., & Ciais, P. (2003). Amplifying effects of land-use change on future atmospheric CO₂ levels. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(1), 1024. <http://doi.org/10.1029/2002GB001963>.

Goldewijk, K., Beusen, A., Van Drecht, G., De Vos, M. (2011). The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 73–86. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00587.x>.

Hamazaki, T., Kaneko, Y., Kuze, A. (2008). Carbon Dioxide Monitoring From the Gosat Satellite, 6–8.

Hammerling, D. M., Michalak, A. M., & Kawa, S. R. (2012). Mapping of CO₂ at high spatiotemporal resolution using satellite observations: Global distributions from OCO-2. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(6), 1–10. <http://doi.org/10.1029/2011JD017015>.

Hansis, E., Davis, S. J., & Pongratz, J. (2015). Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes, *Global Biogeochemical Cycles*, 1–17. <http://doi.org/10.1002/2014GB004997>.

Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H. (2015). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *Int. J. Climatol.*, 34, 623–642.

Harrison, M. (2000). The economics of World War II: six great powers in international comparison. *Cambridge University Press*.

Houghton, R. A., Hobbie, J. E., Melillo, J. M., Moore, B., Peterson, B. J., Shaver, G. R., Woodwell, G. M. (1983): Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecol. Monogr.*, 53, 235–262.

Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Van Der Werf, G. R., Defries, R. S., Hansen, M. C., Le Quéré, C., Ramankutty, N. (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9(12), 5125–5142. <http://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>.

Houghton, R. A., Hobbie, J. E., Melillo, J. M., Moore, B., Peterson, B. J., Woodwell, G. M., & Moore, B. (2016). Changes in the Carbon Content of Terrestrial Biota and Soils between 1860 and 1980: A Net Release of CO₂ to the Atmosphere, *Ecological Society of America*, 53(3), 235–262.

Hurt, G. C., Frohling, S., Fearon, M. G., Moore, B., Shevliakova, E., Malyshev, S., Pacala, S. W., Houghton, R. A. (2006). The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood harvest activity, and resulting secondary lands. *Global Change Biol.*, 12, 1208–1229.

Hurt, G. C., Chini, L. P., Frohling, S., Betts, R. A., Feddema, J., Fischer, G., Fisk, J. P., Hibbard, K., Houghton, R. A., Janetos, A., Jones, C. D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Klein Goldewijk, K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., van Vuuren, D. P., Wang, Y. P. (2011). Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109(1), 117–161. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0153-2>.

Hyvönen, R., Agren, G. I., Linder, S., Persson, T., Cotrufo, M. F., Ekblad, A., Freeman, M., Grelle, A., Janssens, I. A., Jarvis, P. G., Kellomäki, S., Lindroth, A., Loustau, D., Lundmark, T., Norby, R. J., Oren, R., Pilegaard, k., Ryan, M. G., Sigurdsson, B. D., Strömberg, M., van Oijen, M., Wallin, G. (2007). The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytol.*, 173(3), 463–480. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01967.x>.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi:10.1017/CBO9781107415324.

Janssens, I. A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalski, A. S., Buchmann, N., Epron, D., Pilegaard, K., Kutsch, W., Longdoz, B., Grünwald, T., Montagnani, L., Dore, S., Rebmann, C., Moors, E. J., Grelle, A., Rannik, Ü., Morgenstern, K., Oltchev, S., Clement, R., Gudmundsson, J., Minerbi, S., Berbigier, P., Ibrom, A., Moncrieff, J., Aubinet, M., Bernhofer, C., Jensen, N. O., Vesala, T., Granier, A., Schulze, E.-D., Lindroth, A., Dolman, A. J., Jarvis, P. G., Ceulemans, R., Valentini, R. (2001). Productivity overshadows

temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 7(3), 269–278. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00412.x>.

Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl, C. A., Guenther, P. R., Waterman, L. S., Chin, J. F. S. (1976), Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 28: 538–551. doi:10.1111/j.2153-3490.1976.tb00701.x.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1), 1–33. <http://doi.org/10.1029/2003GB002199>.

Law, B. E., Waring, R. H., Anthoni, P. M., Aber, J. D. (2000). Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem, and an evaluation of two generalized models. *Global Change Biology*, 6: 155–168. doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00291.x

Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G. R., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Raupach, M. R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Zaehle, S., and Zeng, N. (2013). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data*, 5(1), 165–185. <http://doi.org/10.5194/essd-5-165-2013>.

Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Friedlingstein, P., Peters, G. P., Andres, R. J., Boden, T. A., Houghton, R. A., House, J. I., Keeling, R. F., Tans, P., Arneeth, A., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Bopp, L., Chang, J., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Fader, M., Feely, R. A., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lima, I. D., Metzl, N., Millero, F., Munro, D. R., Murata, A., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., O'Brien, K., Olsen, A., Ono, T., Pérez, F. F., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Rödenbeck, C., Saito, S., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Vandemark, D., Viovy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., Zeng, N. (2015). Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*, 7(2), 349–396. <http://doi.org/10.5194/essd-7-349-2015>.

Leith, H. & Wittaker, R. H. (1976). Modelling the primary productivity of the world. In: Primary Productivity of the Biosphere. *Springer*, Verlag, Berlin, pp 237–267.

Linz, S. J. (1984): World War II and Soviet Economic Growth, 1940-1953, College of Commerce and Business Administration.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L., & Merchant, J. W. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1303–1330. <http://doi.org/10.1080/014311600210191>.

MacFarling Meure, C., Etheridge, D., Trudinger, C., Steele, P., Langenfelds, R., Van Ommen, T., Smith, A., Elkins, J. (2006). Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP. *Geophysical Research Letters*, 33(14), 2000–2003. <http://doi.org/10.1029/2006GL026152>.

Meeson, B. W., Corprew, F. E., McManus, J. M. P., Myers, D. M., Closs, J. W., Sun, K. J., Sunday, D. J., Sellers, P. J. (1995). ISLSCP Initiative I- global datasets for land-atmosphere models, 1987–1988. *American Geophysical Union*, Washington.

Nove, A. (1992). *An Economic History of the USSR 1917-1991*.

Pales, J. C., & C. D. Keeling (1965), The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 70(24), 6053–6076. doi:10.1029/JZ070i024p06053.

Parton, W. J., Stewart, J. W. B., & Cole, C. V. (1988). Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 5, 109–131. <http://doi.org/10.1007/BF02180320>.

Peng, S., Ciais, P., Krinner, G., Wang, T., Gouttevin, I., McGuire, A. D., Lawrence, D., Burke, E., Chen, X., Decharme, B., Koven, C., MacDougall, A., Rinke, A., Saito, K., Zhang, W., Alkama, R., Bohn, T. J., Delire, C., Hajima, T., Ji, D., Lettenmaier, D. P., Miller, P. A., Moore, J. C., Smith, B., Sueyoshi, T. (2015). Simulated high-latitude soil thermal dynamics during the past four decades. *The Cryosphere Discussions*, 9(2), 2301–2337. <http://doi.org/10.5194/tcd-9-2301-2015>.

Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T., & Claussen, M. (2009). Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4), 1–13. <http://doi.org/10.1029/2009GB003488>.

Pongratz, J., Reick, C. H., Houghton, R. A., & House, J. I. (2014). Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. *Earth System Dynamics*, 5(1), 177–195. <http://doi.org/10.5194/esd-5-177-2014>.

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33–57. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.

Ruddiman, W. F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic change*, 61: 261-293.

Ruddiman, W. F. (2007). The early anthropogenic hypothesis: Challenges and responses, *Rev. Geophys.*, 45, doi:10.1029/2006RG000207.

Sapir, J. (1989): *Les fluctuations économiques en URSS 1941-1985, Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales*, Paris.

Schulze, E.-D., Lloyd, J., Kelliher, F. M., Wirth, C., Reibmann, C., Luhker, B., Mund, M., Knohl, A., Milyukova, I. M., Schulze, W., Ziegler, W., Varlagin, A., Sogachev, A. F., Valentini, R., Dore, S., Grigoriev, S., Kolle, O., Panfyorov, M. I., Tchebakova, N., Vygodskaya, N. N. (1999). Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their

potential to act as a carbon sink - a synthesis. *Global Change Biology*, 5(6), 703–722. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00266.x>.

Sellers, P. J., Meeson, B. W., Closs, J., Collatz, J., Corprew, F., Dazlich, D., Hall, F. G., Kerr, Y., Koster, R., Los, S., Mitchell, K., McManus, J., Myers, D., Sun, K. J., Try, P. (1995). An overview of the ISLSCP-I Global datasets. On: *ISLSCP Initiative I- Global datasets for land-atmosphere models*, 1987–1988. Volumes 1–5.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneeth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K., Venevsky, S. (2003). Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model, *Global Change Biol.*, 9, 161–185

Smith, T., Shugart, H., Woodward, F. (Eds.) (1997), Plant Functional Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change, *Cambridge Univ. Press*, New York.

Stocker, B., Feissli, F., Strassmann, K. (2014). Past and future carbon fluxes from land use change, shifting cultivation and wood harvest. *Tellus*, 1, 1–15. <http://doi.org/10.3402/tellusb.v66.23188>.

Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, P., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, B., Bates, N. R., de Baar, H. J. W. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8–10), 554–577. <http://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>.

Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., Edmonds, J. A. (2011). RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1), 77–94. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>.

Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance , photosynthesis. *Plant, Cell and Environment*, 26, 1097–1116. <http://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x>.

Verheijen, L. M., Brovkin, V., Aerts, R., Bönisch, G., Cornelissen, J. H. C., Kattge, J., Reich, P. B., Wright, L. J., Van Bodegom, P. M. (2013). Impacts of trait variation through observed trait-climate relationships on performance of an Earth system model: A conceptual analysis. *Biogeosciences*, 10(8), 5497–5515. <http://doi.org/10.5194/bg-10-5497-2013>.

Voznesensky, N. A. (1949): Soviet Economy during the Second World War. *International Publishers*, New York.

Vuichard, N., Ciais, P., Beletti, L., Smith, P., Valentini, R. (2008). Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(4), 1–8. <http://doi.org/10.1029/2008GB003212>.

Werf, G. R. Van Der, Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2001, 11707–11735. <http://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>.

Wolf, J., West, T. O., Le Page, Y., Kyle, G. P., Zhang, X., Collatz, G. J., Imhoff, M. L. (2015). Biogenic carbon fluxes from global agricultural production and consumption, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 1617–1639, doi:10.1002/2015GB005119.

Yin, X., & Struik, P. C. (2009). C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(1), 27–38. <http://doi.org/10.1016/j.njas.2009.07.001>.

Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., Maksyutov, S. (2009). Global Concentrations of CO₂ and CH₄. Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results. *Sola*, 5, 160–163. <http://doi.org/10.2151/sola.2009-041>.

Yuan, W., Liang, S., Liu, S., Weng, E., Luo, Y., Hollinger, D., Zhang, H. (2012). Improving model parameter estimation using coupling relationships between vegetation production and ecosystem respiration. *Ecological Modelling*, 240, 29–40. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.04.027>.

Yue, C., Ciais, P., Cadule, P., Thonicke, K., Archibald, S., Poulter, B., Hao, W. M., Hantson, S., Mouillot, F., Friedlingstein, P., Maihnan, F., and Viovy, N. (2014). Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE - Part 1: Simulating historical global burned area and fire regimes. *Geoscientific Model Development*, 7(6), 2747–2767. <http://doi.org/10.5194/gmd-7-2747-2014>.

Yue, C., Ciais, P., Cadule, P., Thonicke, K., Van Leeuwen, T. T. (2015). Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE -Part 2: Carbon emissions and the role of fires in the global carbon balance. *Geoscientific Model Development*, 8(5), 1321–1338. <http://doi.org/10.5194/gmd-8-1321-2015>.

Zilversmit, D. B., Entenman, C., Fishler, M. C. (1943). On the Calculation of “Turnover Time” and “Turnover Rate” From Experiments Involving the Use of Labeling Agents. *The Journal of General Physiology*, 26(3), 325–331. <http://doi.org/10.1085/jgp.26.3.325>.

Zhu, D., Peng, S. S., Ciais, P., Viovy, N., Druel, A., Kageyama, M., Krinner, G., Peylin, P., Otlé, C., Piao, S. L., Poulter, B., Schepaschenko, D., Shvidenko, A. (2015). Improving the dynamics of Northern Hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 2263–2283. <http://doi.org/10.5194/gmd-8-2263-2015>.

Zhuang, Q., He, J., Lu, Y., Ji, L., Xiao, J., & Luo, T. (2010). Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the tibetan plateau during the 20th century: An analysis with a process-based biogeochemical model. *Global Ecology and Biogeography*, 19(5), 649–662. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00559.x>.

Zon, R., & Sparhawk W. N. (1923). Forest Resources of the World, Volume I. McGraw-Hill, NY, p 493.

Anexos

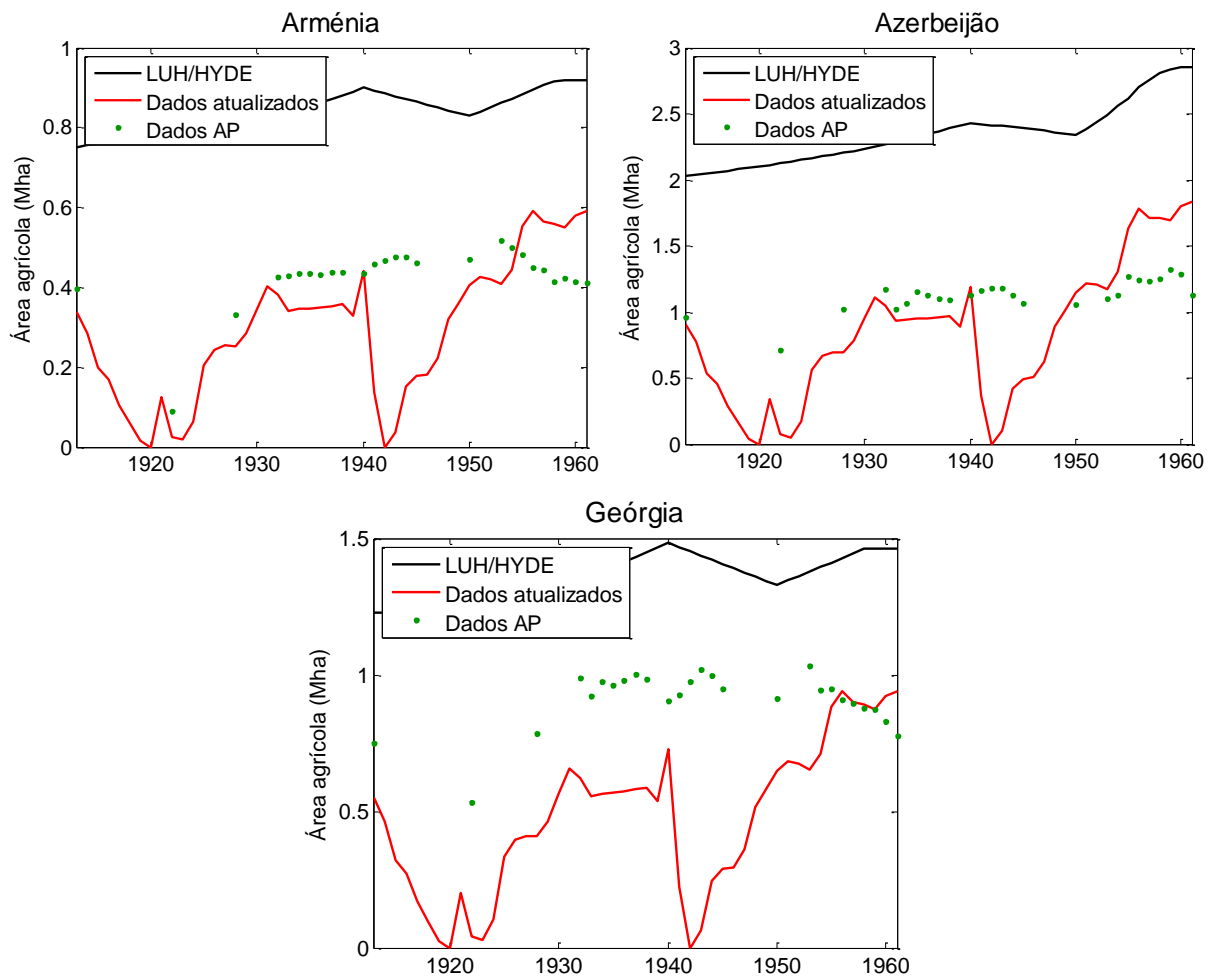
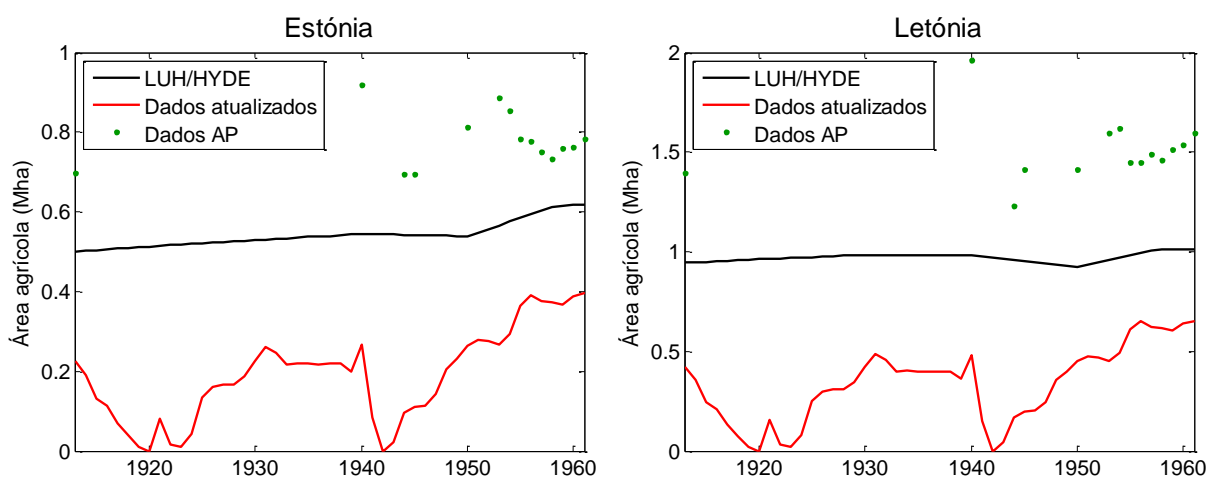


Figura A.1 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual da Arménia, Azerbaijão e Geórgia através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregón (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).



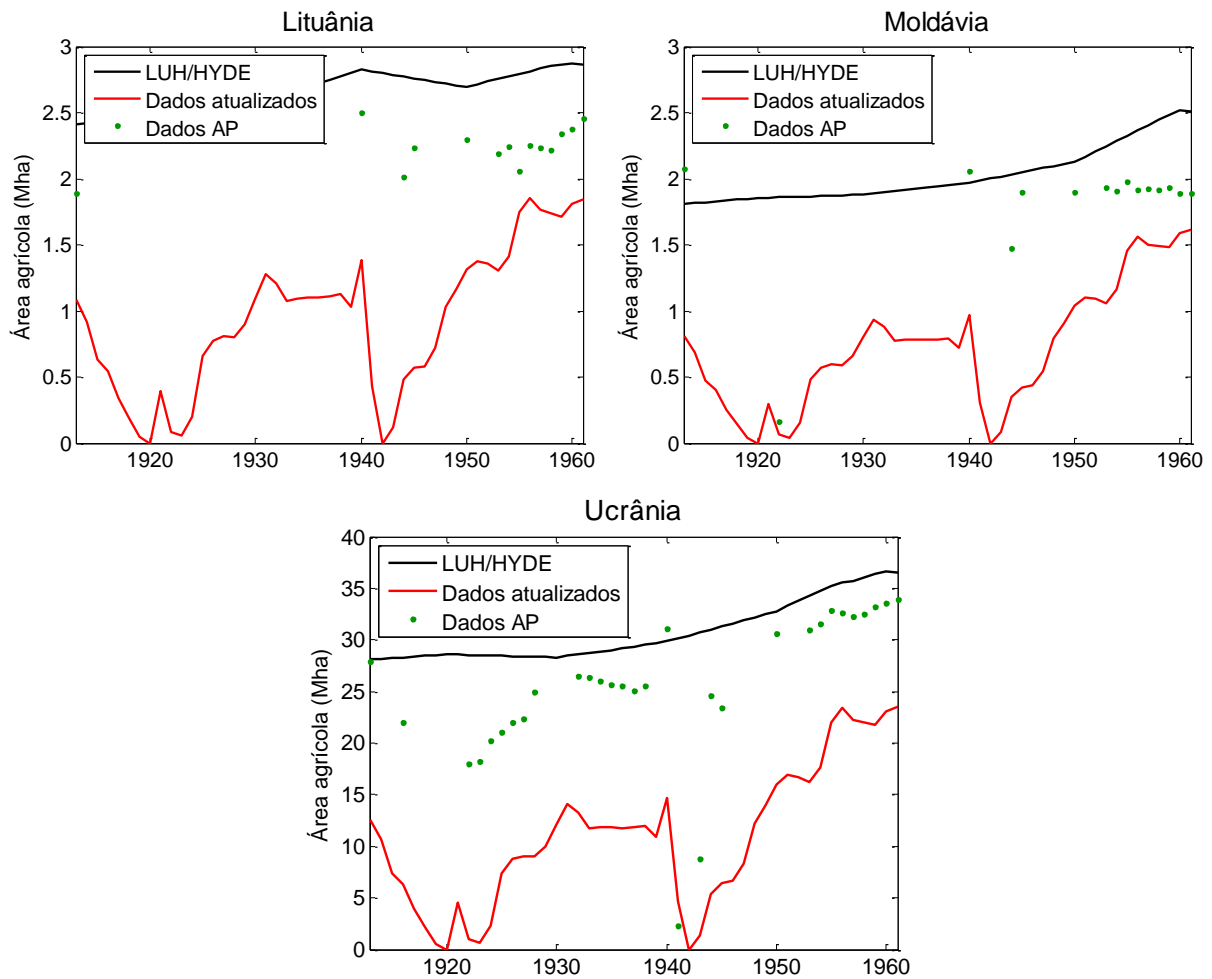
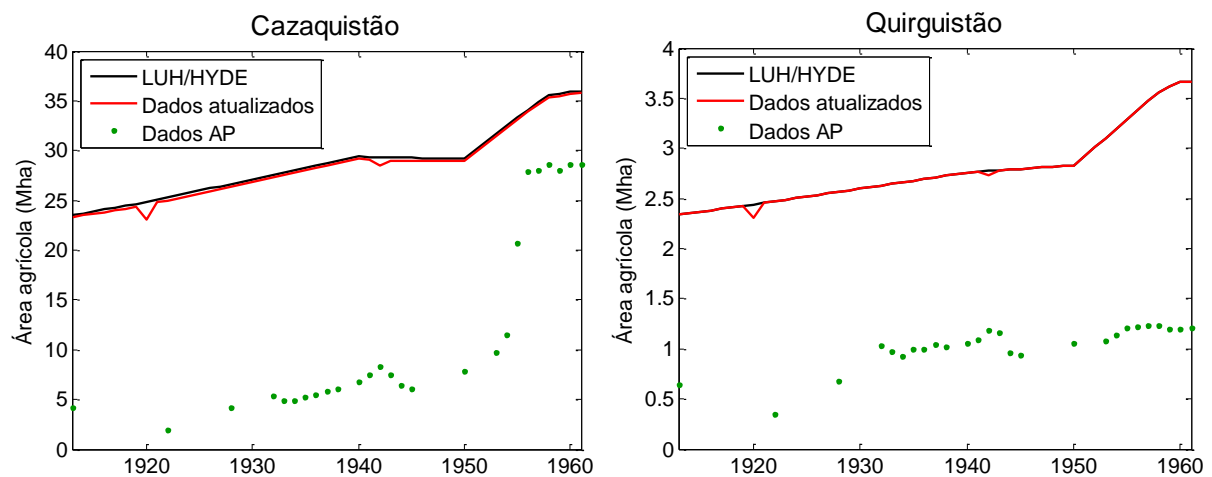


Figura A.2 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual da Estônia, Letônia, Lituânia, Moldávia e Ucrânia através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregon (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).



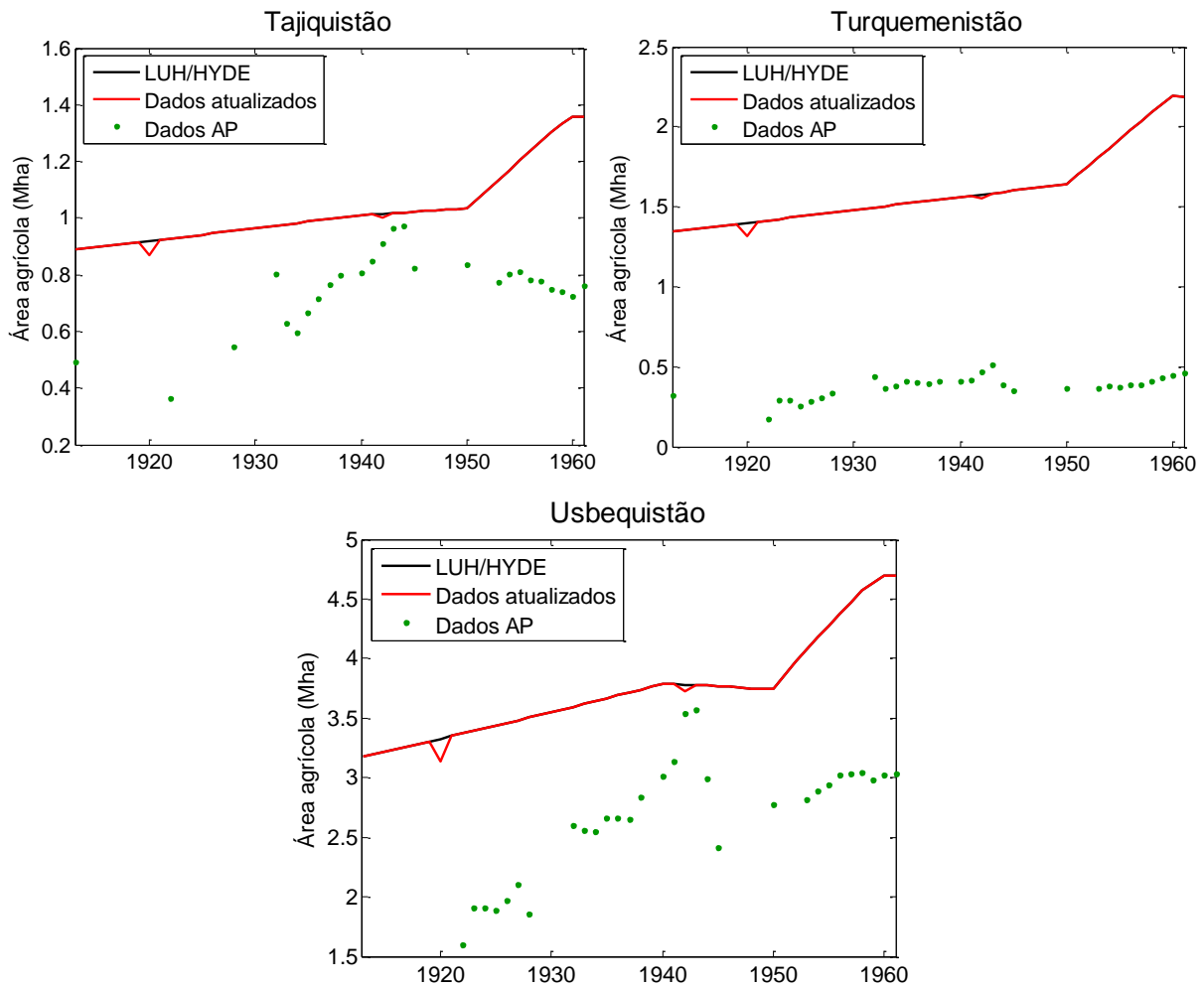


Figura A.3 - Comparação entre áreas agrícolas totais para o território atual do Cazaquistão, Quirguistão, Tajikistão, Turquemenistão e Usbequistão através dos dados LUH/HYDE (a preto), Anna Peregón (a verde) e dos dados atualizados neste trabalho (a vermelho).