

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Meio Ambiente  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**

3ª edição revista

*Magda Aparecida Lima  
Robert Michael Boddey  
Bruno José Rodrigues Alves  
Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado  
Segundo Urquiaga*

Editores Técnicos

**Embrapa**  
*Brasília, DF*  
2015

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Meio Ambiente**

Rodovia SP-340, km 127,5  
Caixa Postal 69  
CEP 13820-000 Jaguariúna, SP  
Fone: (19) 3311-2700  
Fax: (19) 3311-2640  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Unidade responsável pelo conteúdo**

*Embrapa Meio Ambiente*

Comitê de Publicações da Embrapa Meio Ambiente

Presidente

*Marcelo Augusto Boechat Morandi*

Membros

*Adriana Marlene Moreno Pires*

*Fagoni Fayer Calegario*

*Lauro Charlet Pereira*

*Aline de Holanda Nunes Maia*

---

**Nota:** A Embrapa é uma empresa que respeita os direitos autorais. No entanto, não conseguimos localizar os autores de algumas imagens utilizadas nesta obra. Se você é autor de alguma ou conhecer quem o seja, por favor, entre em contato com a Embrapa Informação Tecnológica, no endereço acima.

---

**Embrapa Informação Tecnológica**

Parque Estação Biológica (PqEB)  
Av. W3 Norte (Final)  
CEP 70770-901 Brasília, DF  
Fone: (61) 3448-4236  
Fax: (61) 3448-2494  
www.embrapa.br/livraria  
livraria@embrapa.br

**Unidade responsável pela edição**

*Embrapa Informação Tecnológica*

Coordenação editorial

*Selma Lúcia Lira Beltrão*

*Lucilene Maria de Andrade*

*Nilda Maria da Cunha Sette*

Supervisão editorial

*Wyviane Carlos Lima Vidal*

Revisão de texto

*Maria Cristina Ramos Jubé*

Normalização bibliográfica

*Iara Del Fiaco Rocha*

Projeto gráfico, editoração eletrônica e capa

*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Foto da capa

*Nasa*

**1ª edição**

1ª impressão (2012): 1.500 exemplares

**2ª edição**

E-book (2012)

**3ª edição**

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

E-book (2015)

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n° 9.160).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

Embrapa Informação Tecnológica

---

Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira / Magda Aparecida de Lima ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. – Brasília, DF : Embrapa, 2015.  
343 p. : il. color. ; 16 cm x 22 cm.

ISBN 978-85-7035-451-8

1. Impacto ambiental. 2. Proteção ambiental. 3. Solo. I. Lima, Magda Aparecida de. II. Boddey, Robert Michael. III. Alves, Bruno José Rodrigues. IV. Machado, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. V. Urquiaga, Segundo. VI. Embrapa Meio Ambiente.

CDD 363.7

---

© Embrapa 2015

## Autores

**Alexandre Berndt**

Biólogo, doutor em Ecologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

**Arminda Moreira Carvalho**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ecologia, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

**Augusto Cesar Franco**

Ecólogo, pós-doutor em Ecofisiologia Vegetal, professor titular da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF

**Beata Eموke Madari**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

**Bruno José Rodrigues Alves**

Engenheiro-agrônomo, pós-doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**Cimélio Bayer**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Porto Alegre, RS

**Cintia Rodrigues de Souza**

Bióloga, mestre em Ciências Florestais, pesquisadora da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM

**Cláudia Pozzi Jantalia**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, pesquisadora da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**Claudio José Reis de Carvalho**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ecofisiologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

**Débora Marcondes Bastos Pereira Milori**

Física, doutora em Física, pesquisadora da Embrapa Instrumentação,  
São Carlos, SP

**Elaine Cristina Cardoso Fidalgo**

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora  
da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

**Elio Marcolin**

Engenheiro-agrônomo, mestre em Engenharia Agrícola, pesquisador do  
Instituto Rio Grandense do Arroz (Irga), Cachoeirinha, RS

**Eloisa Aparecida Belleza Ferreira**

Engenheira-agrônoma, mestre em Agronomia, pesquisadora da Embrapa  
Cerrados, Planaltina, DF

**Falberni de Souza Costa**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da  
Embrapa Acre, Rio Branco, AC

**Francisco das Chagas Leonidas**

Engenheiro-agrônomo, mestre em Agronomia, pesquisador da Embrapa  
Rondônia, Porto Velho, RO

**Haron Abraham Magalhães Xaud**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Sensoriamento Remoto, pesquisador  
da Embrapa Roraima, Boa Vista, RR

**Helber Custódio de Freitas**

Meteorologista, doutor em Ecologia Aplicada, pesquisador da  
Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP

**Helio Tonini**

Engenheiro-florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da  
Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT

**Henrique Pereira dos Santos**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa  
Trigo, Passo Fundo, RS

**Humberto Ribeiro da Rocha**

Engenheiro-civil-aeronáutico, doutor em Meteorologia, livre docente e professor titular da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP

**João Baptista Silva Ferraz**

Biólogo, doutor em Ciências Florestais, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), Manaus, AM

**João José Assumpção de Abreu Demarchi**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências Biológicas, pesquisador da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Nova Odessa, SP

**Jônatan Dupont Tatsch**

Meteorologista, doutor em Meteorologia, professor adjunto da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS

**Julio Cezar Franchini dos Santos**

Engenheiro-agrônomo, pós-doutor em Química Orgânica, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Ladislau Martin-Neto**

Físico, doutor em Física Aplicada, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP

**Luciano José de Oliveira Accioly**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solo, Água e Ciência Ambiental, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

**Luís Henrique de Barros Soares**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Biologia Celular e Molecular, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**Luiz Fernando Carvalho Leite**

Engenheiro-agrônomo, pós-doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

**Magda Aparecida de Lima**

Ecóloga, doutora em Geociências e Meio Ambiente, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Márcio dos Santos Pedreira**

Zootecnista, doutor em Nutrição e Produção Animal, professor da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, BA

**Marco Bindi**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Modelagem de Culturas Forrageiras, professor da Università Degli Studi di Firenze, Centralino, Italia

**Marco Moriondo**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Modelagem de Culturas Forrageiras, professor da Università Degli Studi di Firenze, Centralino, Italia

**Marcos Antonio Vieira Ligo**

Ecólogo, doutor em Ecologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maria Conceição Peres Young Pessoa**

Bacharel em Matemática Aplicada, doutora em Automação, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maria Lucia Meirelles**

Bióloga, doutora em Biologia, pesquisadora aposentada da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

**Maristela Ramalho Xaud**

Engenheira-agrônoma, doutora em Sensoriamento Remoto, pesquisadora da Embrapa Roraima, Boa Vista, RR

**Mauricio Rizzato Coelho**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

**Moisés Cordeiro Mourão de Oliveira Júnior**

Biólogo, mestre em Estatística e Experimentação Agropecuária, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

**Odo Maria Artur Siegmund Pedro Rudolfo Barão Primavesi**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador aposentado da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

**Omar Vieira Villela**

Engenheiro-agrônomo, mestre em Fitotecnia, pesquisador da Agência Paulista de Desenvolvimento do Agronegócio (Apta), Pindamonhangaba, SP

**Oswaldo Machado Rodrigues Cabral**

Meteorologista, doutor em Meteorologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Paulo Guilherme Salvador Wadt**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Acre, Rio Branco, AC

**Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

**Robert Michael Boddey**

Químico-agrícola, doutor em Agricultura, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**Roberval Monteiro Bezerra de Lima**

Engenheiro-florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM

**Rogério Sebastião Corrêa da Costa**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Biotecnologia, pesquisador da Embrapa Rondônia, Porto Velho, RO

**Rosa Toyoko Shiraishi Frighetto**

Química, doutora em Química Orgânica/Produtos Naturais, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Rosana Clara Victoria Higa**

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

**Segundo Sacramento Urquiaga Caballero**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**Simone Gisele de Oliveira**

Zootecnista, doutora em Zootecnia, professora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

**Steel Silva Vasconcelos**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Recursos e Conservação Florestais, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

**Telma Teresinha Berchielli**

Zootecnista, doutora em Ciência Animal, professora da Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, São Paulo, SP

**Vanda Gorete Souza Rodrigues**

Engenheira-agrônoma, mestre em Agricultura Tropical, pesquisadora aposentada da Embrapa Rondônia, Porto Velho, RO

**Vera Regina Mussoi Macedo**

Engenheira-agrônoma, mestre em Ciência do Solo, pesquisadora aposentada do Instituto Rio Grandense do Arroz (Irga), Cachoeirinha, RS

**Vinicius de Melo Benites**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ



## Apresentação

O aumento da produção de alimentos no mundo implicou na substituição da vegetação nativa por lavouras anuais e permanentes, assim como por espécies vegetais destinadas a alimentação animal. Atualmente, a demanda por energia renovável tem motivado a expansão de plantios para produção de energia e biocombustíveis. Esse cenário de mudanças no uso do solo tem sido emblemático no Brasil, País que se tornou uma das principais figuras globais no combate à fome do planeta em função das extensas áreas agriculturáveis e de sua economia consolidada na atividade agropecuária.

Até recentemente, conhecia-se muito pouco sobre o impacto da agricultura e da pecuária brasileira nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) para a atmosfera, mais especificamente  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . A atuação da Embrapa e da maioria das instituições de pesquisa do País nesse tema era limitada, e poucas informações estavam sendo geradas no Brasil sobre fatores de emissão de GEEs para regiões tropicais, o que é de grande importância para a elaboração de inventários e para a formulação de políticas públicas para ações de mitigação de emissões. Em função disso, estimativas iniciais de emissão de GEEs para a agricultura brasileira foram calculadas com base em fatores de emissão obtidos de estudos realizados na agricultura de clima temperado, implicando em muitas incertezas. Por essa razão, a Embrapa estruturou em 2003 um grupo de pesquisa multi-institucional e multidisciplinar orientado a quantificar os fluxos de GEEs em diferentes sistemas agrícolas, pecuários, florestais e agroflorestais do País, visando não somente à caracterização, mas também identificar sistemas de manejo que contribuam na mitigação do efeito estufa.

Esta publicação apresenta a contribuição da Embrapa e de instituições parceiras ao avanço de conhecimento sobre as emissões de GEEs no setor agrícola brasileiro, fruto de um trabalho integrado que constituiu a rede de pesquisa Agrogases – Dinâmica de Carbono e Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção Agropecuária, Florestal e Agroflorestal Brasileiros. Entre os resultados, destaca-se a geração de valores específicos de

fatores de emissão de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O para as condições brasileiras, sendo os mesmos confrontados com os valores apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). Foram determinados fatores de emissão de metano em sistemas de produção de arroz irrigado, com possível mitigação associada ao sistema de plantio. Também se destaca a importância do balanço positivo de nitrogênio dos sistemas agrícolas, principalmente sob plantio direto, e a recuperação de pastagens degradadas para promover o sequestro de C nos solos. Na pecuária bovina de corte e de leite, foram desenvolvidos fatores de emissão de metano entérico para diferentes condições de dieta, demonstrando-se que, com a melhoria da qualidade forrageira, é possível diminuir significativamente a produção desse gás por unidade de carne produzida. A introdução de leguminosas forrageiras com sistema eficiente em obter N<sub>2</sub> do ar através da fixação biológica de nitrogênio apresenta-se como uma boa estratégia para melhorar não apenas a produtividade das pastagens, senão também a qualidade. Essa estratégia, aliada à adoção do sistema de integração lavoura-pecuária, oferece as melhores perspectivas para impulsionar a produção de grãos e da pecuária de forma sustentável, contribuindo sensivelmente para a mitigação da emissão de GEEs.

A organização de inventários florestais, com o uso de técnicas de sensoriamento remoto e de modelos estequiométricos, resultou na avaliação do potencial de sequestro de carbono de diferentes sistemas florestais (florestas plantadas do Sul e Norte do País, Caatinga no Nordeste) e agroflorestais brasileiros. Nesse contexto, é importante mencionar o grande impacto positivo que causa o reflorestamento com espécies de importância econômica, melhorando a renda rural e contribuindo significativamente para o sequestro de carbono no sistema solo-planta.

O emprego de modelos robustos de simulação em estimativas do balanço de carbono e de emissão de gases de efeito estufa em sistemas de produção de cana-de-açúcar e de grãos mostrou ser uma ferramenta fundamental nesse tema, sobretudo pela necessidade de ajustá-los a condições tropicais.

Com esses resultados, a Rede Agrogases atende a uma demanda da sociedade por conhecimentos consolidados pela pesquisa agropecuária sobre o potencial de sequestro de carbono dos solos brasileiros e em plantações florestais e vegetação nativa, assim como sobre o potencial de emissão de gases de efeito estufa por sistemas de produção animal e vegetal praticados no País. Além disso, os resultados apontam para medidas de mitigação de emissões de GEEs, por meio de estratégias e práticas otimizadas de uso do solo e de sistemas de produção.

Os editores



# Sumário

## **Capítulo 1**

Estoque de carbono com base no levantamento de solos do Brasil: uma contribuição para o inventário nacional..... 15

## **Capítulo 2**

Estoques de carbono nos solos do Brasil: quantidade e mecanismos de acúmulo e preservação ..... 31

## **Capítulo 3**

Dinâmica do carbono em área úmida do Cerrado..... 81

## **Capítulo 4**

Estoque de biomassa em florestas plantadas, sistemas agroflorestais, florestas secundárias e Caatinga ..... 103

## **Capítulo 5**

Emissões de óxido nitroso e óxido nítrico do solo em sistemas agrícolas ..... 157

## **Capítulo 6**

Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação..... 189

## **Capítulo 7**

Implementação de um modelo genérico de culturas para a cana-de-açúcar no Sudeste do Brasil..... 219

## **Capítulo 8**

Produção de gases de efeito estufa em sistemas agropecuários: bases para inventário de emissão de metano por ruminantes ..... 233

## **Capítulo 9**

Simuladores computacionais para o estudo da  
dinâmica de carbono e de nitrogênio e emissões  
de gases de efeito estufa em sistemas de produção agropecuária .....267

## **Capítulo 10**

Práticas mitigadoras das emissões de gases  
de efeito estufa na agropecuária brasileira.....323

## Capítulo 1

# Estoque de carbono com base no levantamento de solos do Brasil

## Uma contribuição para o inventário nacional

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo, Vinicius de Melo Benites, Paulo Guilherme Salvador Wadt, Mauricio Rizzato Coelho, Beata Eموke Madari, Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado

### Introdução

Preocupações com as mudanças climáticas globais e a contribuição do acúmulo de carbono à sua mitigação têm requerido estimativas nacionais do estoque de carbono dos solos (ESWARAN et al., 1993). Os solos representam um importante componente no ciclo biogeoquímico do C, armazenando cerca de quatro vezes mais C que a biomassa vegetal e quase três vezes mais que a atmosfera (IPCC, 2001). O Brasil é tido como um dos poucos países a apresentar estimativas de estoque de carbono dos solos por meio do uso de diferentes tipos de cálculos e mapeamentos (BATJES, 2005; BERNOUX et al., 2002; SCHROEDER; WINJUM, 1995). Buscando contribuir com informações sobre estimativas de C dos solos do Brasil, este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto Agrogases, tendo como objetivo estimar o estoque de carbono dos solos do Brasil utilizando dados provenientes de uma base de dados de solos denominada Sigsolos, organizada pela Embrapa Solos.

### Estimativa da densidade do solo

A densidade do solo ( $DS$ ) é essencial para os cálculos dos estoques de carbono. Valores de  $DS$  são necessários para converter o conteúdo de carbono obtido como porcentagem do peso seco para peso de carbono por unidade de área (HOWARD et al., 1995). O estoque de carbono ( $C_t$ ) é, então, calculado da seguinte forma: