

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

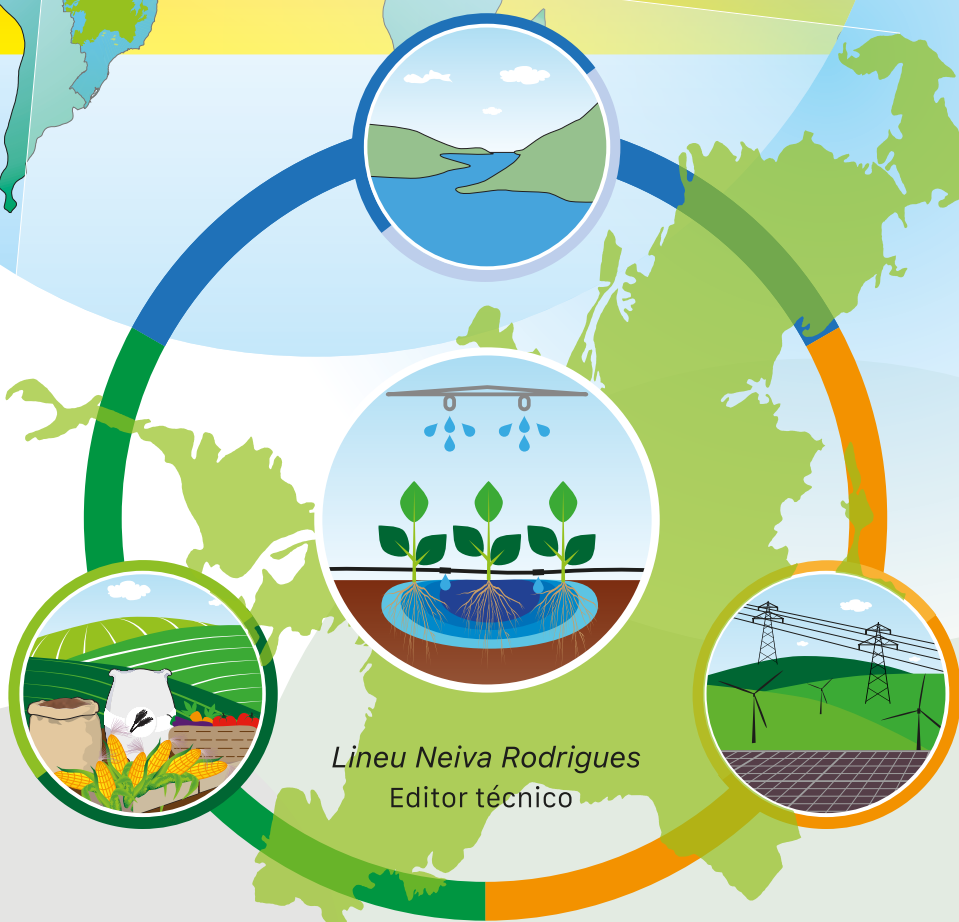
6 ÁGUA POTÁVEL
E SANEAMENTO



AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO

subsídios para o
desenvolvimento sustentável

2ª edição, revista e ampliada



Lineu Neiva Rodrigues
Editor técnico

Embrapa

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura e Pecuária*

AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO

**subsídios para o
desenvolvimento sustentável**

2ª edição, revista e ampliada

Lineu Neiva Rodrigues
Editor técnico

Embrapa
Brasília, DF
2024

Embrapa
Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Responsável pelo conteúdo
e pela editoração**

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza
Caixa Postal 08223
73310-970, Planaltina, DF
www.embrapa.br/cerrados
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente
Lineu Neiva Rodrigues

Secretário-executivo
Gustavo José Braga

Secretária
Alessandra S. Gelape Faleiro

Membros
Alessandra Silva Gelape Faleiro
Edson Eyji Sano
Fábio Gelape Faleiro
Gustavo José Braga
Jussara Flores de Oliveira Arbues
Kleber Worsley Souza
Ranyse Barbosa Quirino da Silva

Edição executiva e revisão de texto
Jussara Flores de Oliveira Arbues

Normalização bibliográfica
Antonia Veras de Souza (CRB-1/2023)
Marilaine Schaum Pelufe (CRB-1/2045)
Rosamires Rocha Galvão (CRB-1/2122)

Projeto gráfico, diagramação, capa e
tratamento das imagens
Wellington Cavalcanti

1ª edição
Publicação digital (2023): PDF
1ª impressão (2023): 500 exemplares

2ª edição
Publicação digital (2024): PDF
1ª impressão (2024): 500 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução desta publicação, no todo ou
em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados

A278 Agricultura irrigada no cerrado : subsídios para o desenvolvimento
sustentável / Lineu Neiva Rodrigues, editor técnico. – 2. ed. rev. e
ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2024.

503 p. : il. color. ; 16 cm x 22 cm.

ISBN 978-65-5467-049-4

1. Recurso hídrico. I. Rodrigues, Lineu Neiva. II. Embrapa Cerrados.

CDD (22 ed.) 631.7

Autores

Adriana Reatto dos Santos Braga

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Solos, pesquisadora da Embrapa, Brasília, DF

André de Arruda Lyra

Meteorologista, doutor em Meteorologia, bolsista no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

André Quintão de Almeida

Engenheiro florestal, doutor em Meteorologia Aplicada, professor da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Ciências Ambientais, professor da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE

Celina Maki Takemura

Cientista da computação, doutora em Ciência da Computação, pesquisadora da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Daniel Althoff

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, consultor, Cuiabá, MT

Daniela Carneiro Rodrigues

Engenheira agrícola, doutora em Meteorologia, pesquisadora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

David Bruno de Sousa Teixeira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Meteorologia Aplicada, professor do Instituto Federal Catarinense, Camboriú, SC

Diego Bispo dos Santos Farias

Engenheiro-agrônomo, mestre em Engenharia Agrícola, estudante de doutorado da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Eder de Souza Martins

Geólogo, doutor em Geologia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Edson Eyji Sano

Geólogo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Elpídio Inácio Fernandes Filho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Fernanda Laurinda Valadares Ferreira

Engenheira agrícola e ambiental, doutora em Engenharia Agrícola, consultora, Belo Horizonte, MG

Gabrielle Ferreira Pires

Engenheira ambiental, doutora em Agronomia (Meteorologia Aplicada), professora da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Gilmar José Rizzotto

Geólogo, doutor em Geologia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, Goiânia, GO

Giovana Maranhão Bettiol

Geógrafa, mestre em Ciências Ambientais, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Glauber Willian de Souza Ferreira

Cientista atmosférico, mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, estudante de doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG

Inajá Francisco de Sousa

Meteorologista, doutor em Recursos Naturais, professor da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE

Isabel Pilotto

Meteorologista, doutora em Ciência do Sistema Terrestre, bolsista no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

Ivan Pereira Marques

Geólogo, mestre em Geologia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, SP

Ivo Augusto Lopes Magalhães

Engenheiro ambiental, doutor em Geografia, estudante de pós-doutorado na Universidade de Brasília, Brasília, DF

Janice Freitas Leivas

Meteorologista, doutora em Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura, pesquisadora da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Joanna Chaves Souto Araújo

Geóloga, mestre em Geologia, pesquisadora do Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, MG

Jônatas de Sales Macêdo Carneiro

Geólogo, mestre em Geologia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, Goiânia, GO

Jorge Luís Gomes

Meteorologista, doutor em Meteorologia, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

José Eloi Guimarães Campos

Geólogo, doutor em Geologia, professor titular da Universidade de Brasília, Brasília, DF

Lineu Neiva Rodrigues

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Marcelo Ferreira da Silva

Geólogo, doutor em Geologia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, Palmas, TO

Márcio José Remédio

Geólogo, mestre em Geotecnia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, Brasília, DF

Marcos Aurélio Carolino de Sá

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Mariana Faria Veloso

Engenheira agrícola e ambiental, mestre em Engenharia Agrícola, estudante de doutorado da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Marta Vasconcelos Ottoni

Engenheira civil, doutora em Engenharia Civil, pesquisadora em Geociências do Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ

Mauricio Pavan Silva

Geólogo, doutor em Geologia, pesquisador do Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, SP

Michel Castro Moreira

Cientista da computação, doutor em Engenharia Agrícola, professor da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Michelle Simões Reboita

Geóloga, doutora em Meteorologia, professora da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG

Níckolas Castro Santana

Geógrafo, doutor em Geografia, pesquisador colaborador da Universidade de Brasília, Brasília, DF

Paula Angélica Reis Carneiro

Advogada, especialista em Direito Ambiental e Gestão da Sustentabilidade e em Governança Corporativa, sócia-fundadora do Escritório Reis Carneiro Sociedade de Advogados, Uberlândia, MG

Pedro Regoto

Meteorologista, mestre em Meteorologia, estudante de doutorado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

Priscila da Silva Tavares

Meteorologista, doutora em Ciência do Sistema Terrestre, bolsista no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

Regina Gonçalves Barbosa Caixeta

Advogada, especialista em Direito Público, Ambiental e Minerário, sócia-fundadora do Escritório Barbosa e Caixeta Advocacia, Patos de Minas, MG

Roberto Avelino Cecílio

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, professor da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES

Sin Chan Chou

Meteorologista, Ph.D. em Meteorologia, pesquisadora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP

Vagney Aparecido Augusto

Geólogo, doutor em Recursos Hídricos e Meio Ambiente, consultor, Brasília, DF



"Não precisamos de muito para desenvolver a agricultura irrigada de forma sustentável, basta ter uma agenda própria e fazer o simples."

Lineu N. Rodrigues



Dedico aos irrigantes, por utilizar a irrigação
para produzir alimentos, contribuir com o
meio ambiente e desenvolvimento do Brasil,
melhorando a qualidade de vida das pessoas.



Um dos grande prazeres de finalizar esta segunda Edição do livro *Agricultura Irrigada no Cerrado: Subsídios para o desenvolvimento sustentável* é escrever estes agradecimentos. O trabalho envolvido na elaboração deste livro não foi apenas de estruturar os capítulos e de convidar pessoas para escrevê-los. Ao contrário, as ideias neste livro e o trabalho que fundamentou o seu desenvolvimento são em grande parte uma compilação de um aprendizado de mais de 25 anos de trabalho, com a cooperação de diversos especialistas em temas de importância para a agricultura irrigada..

Foram muitas pessoas que contribuíram para este projeto, não apenas com informações técnicas, mas também com conversas informais, que foram essenciais para o entendimento da importância da agricultura irrigada para a produção sustentável de alimentos. Neste sentido, gostaria de agradecer aos irrigantes, com quem aprendo todos os dias.

A ideia deste livro nasceu pela identificação da necessidade de compilar informações essenciais que pudessem contribuir para o desenvolvimento sustentado da agricultura irrigada no Cerrado. Grande parte das informações apresentadas neste livro, foram geradas junto com orientados de mestrado e doutorado de diversas instituições. Gostaria de agradecer, em especial, à Universidade Federal de Viçosa, à Unesp Campus de Botucatu e à Universidade de Brasília.

O desenvolvimento da agricultura irrigada depende de diversas áreas do conhecimento, que abrange, por exemplo, hidrologia, geologia, clima, solos, planta e a própria tecnologia de irrigação. Neste contexto, este livro não seria possível de ser publicado sem a participação

de especialistas de diversas áreas do conhecimento. Assim, gostaria de agradecer á todos os autores e coautores de capítulos por terem aceitado o desafio de contribuir com esta obra.

Os capítulos deste livro, em sua grande maioria, são frutos de resultados de projetos de pesquisa, que só foram possíveis de serem executados com o apoio financeiro de diversas instituições de pesquisa. Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de bolsas de pesquisa (PQ: 312742/2021-5 e 306541/2023-8) e financiamento de projetos (426217/2018-7 e 404187/2021-8), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Grande parte das informações apresentadas neste livro foram geradas utilizando dados públicos. Neste sentido, gostaria de agradecer às instituições que são responsáveis diretas pela coleta, manutenção e distribuição de dados hidrometeorológicos. As bases de dados mantidas por essas instituições são indispensáveis para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Brasil. São várias instituições, espalhadas pelo país, que fazem esse trabalho, entre elas, destaco: a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Ao professor Fernando Tangerino e às empresas NaanDanJain, Valmont, Netafim e Senninger pela cessão das fotos ilustrativas.

Apresentação

A intensificação da agricultura na região do Cerrado é considerada uma das principais estratégias para o seu desenvolvimento sustentável, sendo a irrigação uma das tecnologias mais promissoras. Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento contínuo da agricultura irrigada na região, que já concentra aproximadamente 80% dos pivôs centrais existentes no País.

Por outro lado, observa-se o aumento das disputas pelo uso de água em áreas do Cerrado, trazendo desafios para o crescimento da agricultura irrigada na região. Nesse contexto, com vistas à manutenção do desenvolvimento sustentado da agricultura no Cerrado, é indispensável estabelecer as bases para o fortalecimento e o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada na região.

A irrigação, com geração de empregos estáveis e duradouros, contribui para o desenvolvimento social e econômico do país, além de reduzir as pressões sobre áreas de vegetação nativa, uma vez que as áreas irrigadas podem produzir até três vezes mais que as de sequeiro. O crescimento da agricultura irrigada, entretanto, deve estar inserido em um planejamento estratégico de médio e longo prazo, em que seguranças hídrica e energética são a base para o seu desenvolvimento sustentado.

Políticas de estado que visem à segurança alimentar, o combate à fome e à pobreza, devem incluir a agricultura irrigada como uma das estratégias mais importantes. O objetivo principal deste livro foi orga-

nizar e apresentar informações técnicas que possam contribuir para o desenvolvimento da agricultura irrigada na região do Cerrado.

Este trabalho contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente os Objetivos de números 2 e 6. O ODS 2 visa acabar com a fome e dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos, enquanto o ODS 6 visa aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água.

Sebastião Pedro da Silva Neto
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Prefácio à 2ª edição

O Brasil destaca-se como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, respondendo por quantidades significativas das exportações agrícolas globais. Neste contexto, o papel do país será cada vez mais relevante no desafio de aumentar a produção de alimentos necessária para alimentar a população em 2050.

Neste contexto, o Cerrado é uma das regiões estratégicas do mundo. Segundo os estudos, o Cerrado, com cerca de 70% dos seus 204 milhões de hectares com potencial para desenvolvimento da agricultura, é o segundo maior bioma em extensão e a principal fronteira agrícola do Brasil, respondendo por mais de 40% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país.

As mudanças do clima, entretanto, trazem incertezas quanto à produção agrícola, colocando em risco a estabilidade da produção de alimentos e o atingimento da meta de atender a demanda de alimentos necessária em 2050. Esse fato faz da irrigação uma tecnologia cada vez mais indispensável ao processo produtivo.

O principal desafio para o desenvolvimento sustentável da agricultura é conciliar o crescimento da irrigação com a disponibilidade de recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas que já se encontram em situação de escassez hídrica.

Alimento e água são elementos essenciais para a existência humana e, juntamente com a energia, são indispensáveis para o desenvolvimento da economia, redução da pobreza e melhoria da qualida-

de de vida das pessoas. A forte inter-relação entre água, alimento e energia, que é intensificada com o aumento da demanda advinda do crescimento populacional, das mudanças climáticas e dos padrões de consumo, traz desafios às seguranças hídrica, alimentar e energética.

Nesse sentido, é fundamental considerar as desigualdades hídricas regionais e ter um olhar diferenciado para as bacias hidrográficas críticas, onde a disponibilidade hídrica já está comprometida, assim como onde já é realidade a ocorrência de conflitos pelo uso da água.

Foi em atenção a esses diversos desafios e oportunidades que este livro foi escrito. Desafios de criar as condições básicas científicas e de infraestrutura para o desenvolvimento da agricultura irrigada e as oportunidades de desenvolver regiões e melhorar a qualidade de vida das pessoas, contribuindo para a segurança alimentar.

Esperamos que este livro possa ser uma referência técnica atualizada sobre temas importantes para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Cerrado. A primeira edição deste livro foi composta por sete capítulos. Nesta segunda edição, além da revisão e ampliação dos capítulos da edição anterior, foram acrescentados mais nove novos capítulos, trazendo informações sobre temas diversos, tais como: legislação ambiental, mecanismos de variabilidade climática, geologia, solos, mudanças climáticas, erosividade da chuva, indicadores ambientais, balanço hídrico climatológico e critérios de outorga.

Agricultura e meio ambiente estão simbioticamente interligados, da mesma forma que estão a irrigação e a produção de alimentos. É preciso mostrar de forma clara para a sociedade que a agricultura é a base da nossa sociedade e que é possível desenvolvê-la de maneira sustentável. Neste sentido, é fundamental melhorar a interlocução do setor agrícola com a sociedade.

Acreditamos que o material apresentado neste livro possa nos ajudar nessa caminhada.

O Editor Técnico

Sumário

CAPÍTULO 1 – Agricultura Irrigada no Cerrado: oportunidades e desafios.....25

1.1 Introdução.....	26
1.2 Polos de irrigação.....	31
1.3 Marco legal.....	33
1.4 Considerações finais.....	33
1.5 Referências.....	38

CAPÍTULO 2 – O Bioma Cerrado 41

2.1 Introdução.....	42
2.2 População.....	42
2.3 Recursos estratégicos do Cerrado	47
2.4 Meio físico	51
2.5 Considerações finais	60
2.6 Referências	61

CAPÍTULO 3 – Aspectos da Legislação Ambiental: uma visão para o Cerrado65

3.1 Introdução.....	66
3.2 A proteção constitucional dos biomas brasileiros.....	67
3.3 Cerrado Brasileiro	69
3.4 Cerrado: legislação federal de natureza geral	71
3.5 Proteção do Cerrado nos estados	75

3.6	Projetos de lei em tramitação que visam maior proteção do Cerrado	81
3.7	Considerações finais	91
3.8	Referências	92

CAPÍTULO 4 – Sistemas de Tempo e Mecanismos de Variabilidade Climática no Cerrado 101

4.1	Introdução	102
4.2	Sistemas atmosféricos	104
4.3	Modos de variabilidade natural do clima	126
4.4	Oscilação de Madden-Julian	128
4.5	El Nino-Oscilação Sul	130
4.6	Oscilação Decadal do Pacífico	136
4.7	Dipolo do Oceano Índico	136
4.8	Modo Anular Sul.....	141
4.9	Dipolo Subtropical do Atlântico Sul.....	143
4.10	Dipolo de precipitação entre as regiões Sul e Sudeste do Brasil.....	143
4.11	Considerações finais	144
4.12	Referências	144

CAPÍTULO 5 – O Clima do Cerrado..... 155

5.1	Introdução	156
5.2	Precipitação.....	159
5.3	Evapotranspiração.....	172
5.4	Considerações finais	180
5.5	Referências	181

CAPÍTULO 6 – Geologia do Cerrado 185

6.1	Introdução	186
6.2	Conceitos geológicos fundamentais.....	187
6.3	Geologia do Cerrado em sua região de predominância no Brasil	195
6.4	Considerações finais	224
6.4	Referências	225

CAPÍTULO 7 – Potencial Hidrogeológico do Cerrado235

7.1 Introdução.....	236
7.2 Aspectos conceituais.....	238
7.3 Aspectos legais sobre o uso das águas subterrâneas	245
7.4 Potencial dos aquíferos rasos e profundos no Cerrado.....	249
7.5 Principais aquíferos que ocorrem no Cerrado brasileiro	254
7.6 Outros aquíferos	267
7.7 Sustentabilidade da exploração dos aquíferos no Cerrado.....	268
7.8 Considerações finais	272
7.9 Referências.....	274

CAPÍTULO 8 – Solos do bioma Cerrado e sua Interação com as Áreas Irrigadas sob Pivô279

8.1 Introdução	280
8.2 Solos do bioma Cerrado	281
8.3 Manejo do solo.....	286
8.4 Considerações finais	290
8.5 Referências	292

CAPÍTULO 9 – Recursos Hídricos Superficiais no Cerrado297

9.1 Introdução	298
9.2 Disponibilidade hídrica.....	299
9.3 Contribuição do Cerrado para as regiões hidrográficas	303
9.4 Critérios de outorga.....	306
9.5 Vazões de referência (assinaturas hidrológicas)	312
9.6 Considerações finais	318
9.7 Referências.....	318

CAPÍTULO 10 – Balanço Hídrico Climatológico e Impacto de Critérios de Outorga na Disponibilidade Hídrica Potencial para Irrigação no bioma Cerrado... 321

10.1 Introdução	322
10.2 Disponibilidade hídrica potencial para irrigação no bioma Cerrado, mediante a aplicação de distintos critérios de outorga	324
10.3 Variabilidade do balanço hídrico climatológico em bacias hidrográficas do Cerrado	335
10.4 Considerações finais.....	339
10.5 Referências.....	340

CAPÍTULO 11 – Massas de Água no Cerrado345

11.1 Introdução	346
11.2 Mapeamento das massas de água no Cerrado	346
11.3 Área ocupada por barragens artificiais	354
11.4 Volume armazenado e evaporação	357
11.5 Considerações finais	358
11.6 Referências	359

CAPÍTULO 12 – Mudanças Climáticas no Cerrado..... 361

12.1 Introdução	362
12.2 Mudanças observadas.....	364
12.3 Projeções de mudanças climáticas	372
12.4 Considerações finais.....	391
12.5 Referências.....	392

CAPÍTULO 13 – Funções de Pedotransferência para a Estimativa de Parâmetros Físico-Hídricos do Solo do Bioma Cerrado399

13.1 Introdução	400
13.2 Solos do Cerrado	401
13.3 Funções de pedotransferência para o bioma Cerrado.....	405

13.4 Considerações finais.....	415
13.5 Referências.....	415

CAPÍTULO 14 – Erosividade da Chuva no Cerrado 419

14.1. Introdução.....	420
14.2. Erosividade da chuva no Cerrado	422
14.3. Considerações finais	435
14.4. Referências.....	436

CAPÍTULO 15 – Indicadores Ambientais para o Bioma Cerrado Analisados com Uso de Geotecnologias..... 441

15.1 Introdução.....	442
15.2 Área de estudo e métodos	444
15.3 Dinâmica do balanço hídrico.....	445
15.4 Dinâmica da produtividade da água	453
15.5 Considerações finais.....	463
15.6 Referências.....	464

CAPÍTULO 16 – Atlas da Agricultura Irrigada no Cerrado469

16.1 Introdução.....	470
16.2 Uso da água na agricultura irrigada.....	471
16.3 Área irrigada e área com potencial para crescimento da irrigação.....	473
16.4 Áreas irrigadas por pivô central	482
16.5 Principais culturas irrigadas	497
16.6 Considerações finais.....	500
16.7 Referências.....	501

CAPÍTULO 1

Agricultura Irrigada no Cerrado: oportunidades e desafios

Lineu Neiva Rodrigues

Daniel Althoff

Níckolas Castro Santana

Diego Bispo dos Santos Farias



1.1 Introdução

Em um mundo onde o clima é cada vez mais incerto e a água e o alimento, indispensáveis para a vida, estão mais escassos, as oportunidades para o crescimento da tecnologia da irrigação são inúmeras. Os desafios, em grande parte, estão em entender as novas demandas de uma sociedade cada vez mais dinâmica e com interesses diversos. Segurança hídrica e alimentar devem fazer parte de qualquer política de estado que vise ao desenvolvimento e ao bem-estar de sua população.

Neste contexto, a oportunidade é a irrigação e o desafio é ter um olhar sistêmico para um sistema complexo, entendendo que o futuro da irrigação dependerá da nossa habilidade de usá-la de maneira que ela continue a trazer importantes benefícios para a sociedade, com custos econômicos e ambientais cada vez mais aceitáveis.

As primeiras informações sobre a irrigação foram registradas há mais ou menos 6 mil anos, na Mesopotâmia, região que hoje compreende o Iraque e parte do chamado Crescente Fértil. Colonos construíram canais e desviaram a água do Rio Eufrates para suas plantações, iniciando a história da prática da irrigação no mundo (Roux, 1993).

A irrigação transformou a terra e a sociedade como nenhuma outra atividade havia feito até então. Aquela ação viabilizou uma produção confiável de alimentos e possibilitou que parte das pessoas pudessem trabalhar em atividades diferentes da agricultura. Similarmente, têm-se registros de outras sociedades em regiões diferentes do planeta que foram dependentes da irrigação, como os Vales do Rio Indo, no Paquistão, do Rio Amarelo, na China, e do Rio Nilo, no Egito. Posteriormente, há evidências de culturas que cresceram com base na irrigação em várias partes do mundo, como, por exemplo, no México e na costa do Peru (Hoffman et al., 2007).

A irrigação é uma tecnologia fundamental para o desenvolvimento sustentável da agricultura no Cerrado, segundo maior bioma brasileiro, com área de aproximadamente 200 milhões de hectares, represen-

tando 24% do território brasileiro (Figura 1.1). Apenas o Distrito Federal está inteiramente inserido no Cerrado. Os estados com maior porcentagem de Cerrado em seus territórios são Goiás, com 98% e Tocantins, com 91%, enquanto os estados Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Pará, Piauí e São Paulo possuem, respectivamente, 37%, 62%, 54%, 18%, 65%, 0,7%, 52% e 18% de suas áreas inseridas nesse bioma.



Figura 1.1. O bioma Cerrado e sua localização em relação aos demais biomas no território brasileiro.

Fonte: IBGE (2021).

A localização do Cerrado e o seu padrão geomorfológico o tornam um dos principais pilares da hidrogeografia brasileira, dada a sua distribuição de águas para diversas bacias brasileiras e da América do Sul (Sano et al., 2019). Grande parte dos rios que abastecem os biomas brasileiros tem suas nascentes localizadas no bioma Cerrado.

Grande parte da produção brasileira de alimentos vem da região do Cerrado. Uma das razões do sucesso da agricultura no Cerrado está associada a uma longa estação chuvosa, que, em geral, ocorre entre os meses de outubro a abril, o que possibilita que se tenha até duas safras em uma mesma estação (Spangler et al., 2017). Outro ponto evidente é a disponibilidade de água nessas regiões. Além disso, a região apresenta um elevado potencial para expansão de suas áreas irrigadas (Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2014).

O atendimento ao crescimento da demanda por alimentos pode ocorrer por meio da expansão da área plantada e/ou por meio do aumento do rendimento das culturas (Pradhan et al., 2015). No período entre 1985 e 2005, a produção global de alimentos cresceu 28%. Desse total, apenas 8% resultou da expansão da área plantada e o restante, 20%, decorreu do aumento da produtividade (Foley et al., 2011).

No período entre 1970 e 2013, a produção brasileira de grãos teve uma expansão de quase oito vezes, resultante dos ganhos contínuos de produtividade, em razão da incorporação de novas tecnologias ao processo produtivo (Embrapa, 2014). Embora não seja uma tecnologia nova, a irrigação tem se modernizado constantemente, contribuindo efetivamente para os ganhos observados na produtividade e para a redução no uso de insumos básicos, como, por exemplo, os recursos hídricos.

Relatório da FAO (2011) indica que a irrigação tem contribuído de maneira significativa para aumentar a produção e a produtividade agrícola em escala global. Na Índia e na China, por exemplo, de 1964 a 1997, a produção triplicou principalmente em razão de investimentos em irrigação e de medidas adotadas para aumentar a produtividade do uso da água e da terra.

O desenvolvimento sustentado da agricultura no Cerrado passa, em grande parte, por um crescimento sustentável da irrigação nessa região. Esse crescimento necessita vir respaldado por um planejamento estratégico de médio e de longo prazo, em que a irrigação seja incluída nas políticas de estado de segurança hídrica e energética.

Em virtude da sua importância, cada vez mais estratégica, tem-se observado um crescimento contínuo da agricultura irrigada no Cerrado, que possui cerca de 60% da irrigação praticada no Brasil (Brasil, 2014) e 80% dos pivôs centrais (Althoff; Rodrigues, 2019). Considerando um crescimento médio de 56 mil hectares por ano, estima-se que, em 2050, a área irrigada poderá atingir até 3 milhões de hectares, podendo impactar a dinâmica de uso de água na região.

A intensificação sustentável da agricultura no Cerrado é considerada uma das principais estratégias para reduzir desequilíbrios nesse ecossistema. Nesse contexto, a agricultura irrigada é uma das tecnologias mais promissoras, sendo necessário conciliar a sua expansão com a disponibilidade de recursos hídricos, em especial, nas regiões que já se encontram em situação de escassez hídrica (Rodrigues, 2017).

Por outro lado, já se observa um aumento no número de disputas pelo uso de recursos hídricos em regiões do Cerrado, principalmente naquelas regiões em que a expansão de áreas irrigadas se deu com pouco planejamento e pouco uso de informações hidrológicas (Pousa et al., 2019). Além disso, estudos considerando diferentes projeções das mudanças climáticas apontam diversos riscos para o desenvolvimento socioeconômico de regiões do Cerrado. Entre os impactos esperados, pode-se citar o aumento da temperatura e a redução da precipitação (Chou et al., 2014), o prolongamento da estação seca (Pires et al., 2016) e a redução da vazão disponível em cursos d'água (Oliveira et al., 2017).

Considerando o atual cenário de uso da água e a tendência de aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos, é necessário que haja um planejamento adequado do crescimento da agricultura irriga-

da na região, sendo fundamental que se tenha informações técnicas suficientes para subsidiar esse planejamento.

A agricultura irrigada agrega benefícios importantes à agricultura no Cerrado, propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. Ela, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, principalmente no período seco (abril a setembro). Assim, caso não seja adequadamente planejada e gerenciada, a expansão da agricultura irrigada poderá agravar ainda mais as disputas pelo uso de água em regiões do Cerrado.

Melhorar a eficiência de irrigação é uma estratégia que pode contribuir para aumentar a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada (Zhang et al., 2004; Mo et al., 2005; Levidow et al., 2014; Bastiaanssen; Steduto, 2017). Adicionalmente, considerando o atual cenário de uso da água no Cerrado e a tendência de aumento de conflitos por esse recurso, torna-se importante produzir mais com o uso de quantidades cada vez menores de água, e, para isso, é fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam contribuir para o uso eficiente de água.

Frente ao paradigma de que aumentar a produção de alimentos implica no aumento da demanda de água, um recurso escasso e estratégico para toda a economia brasileira, a agricultura será cada vez mais pressionada a aumentar a eficiência do uso de seus insumos.

A agricultura irrigada, por sua vez, tem ainda o desafio de melhorar a eficiência de uso de dois insumos estratégicos para a sociedade: água e energia. Além disso, a cada dia, fica mais clara a premissa de que, para compatibilizar o aumento da produção com as demandas ambientais, será necessário embasar os processos produtivos em inovação e uso de tecnologias (Rodrigues; Domingues, 2017).

1.2 Polos de irrigação

Em 25 de abril de 2019, a portaria nº 1.082, criada pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), estabeleceu a iniciativa de polos de produção irrigada que é integrada às ações de implementação da política nacional de irrigação. A iniciativa é uma estratégia do MIDR para alavancar a agricultura irrigada, envolvendo participações de organizações de produtores até as diversas esferas do governo.

Até o mês de março de 2024, o MIDR já havia reconhecido 12 polos de irrigação, em oito estados. Os seguintes foram implantados:

- a) Minas: Polo de Irrigação Sustentável do Noroeste de Minas.
- b) Rio Grande do Sul: Polo de Agricultura Irrigada da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria e Polo de Irrigação Noroeste Gaúcho.
- c) Goiás: Polo de Irrigação Sustentável do Vale do Araguaia e Polo de Irrigação do Planalto Central de Goiás.
- d) Mato Grosso: Polo de Irrigação Sustentável do Sul de Mato Grosso, Polo de Agricultura Irrigada Araguaia-Xingu, Polo de Irrigação Sustentável do Meio Norte de Mato Grosso.
- e) São Paulo: Polo de Irrigação do Sudoeste Paulista.
- f) Espírito Santo: Polo de Agricultura Irrigada do Norte Capixaba.
- g) Rio Grande do Norte: Polo de Irrigação Sustentável do Oeste Potiguar.
- h) Bahia: Polo de Irrigação Oeste da Bahia.

A Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) denomina também as regiões com grandes concentrações de irrigação de “polos de irrigação” e destaca 28 polos ativos de irrigação no Brasil (Agência Nacional de Água, 2021). Esses polos são áreas especiais de gestão de recursos hídricos para a agricultura irrigada em escala nacional.

Esse mesmo estudo mostrou que em 15 desses polos de irrigação há a predominância do sistema de irrigação tipo pivô central em cultivo de grãos. A maior parte desses polos está localizada no Cerrado (12 polos nacionais de pivôs centrais), que concentra 64% (735 mil hectares) de área equipada por esse sistema de irrigação.

Na Figura 1.2, apresenta-se os polos de irrigação que estão presentes no Cerrado. Excetuando-se o polo Javaés/Formoso (arroz inundado), nos demais, o sistema predominante é o pivô central. Entre os polos presentes no Cerrado, o que possui maior área irrigada é o Guaíra/ Miguelópolis com 23% do território irrigado.

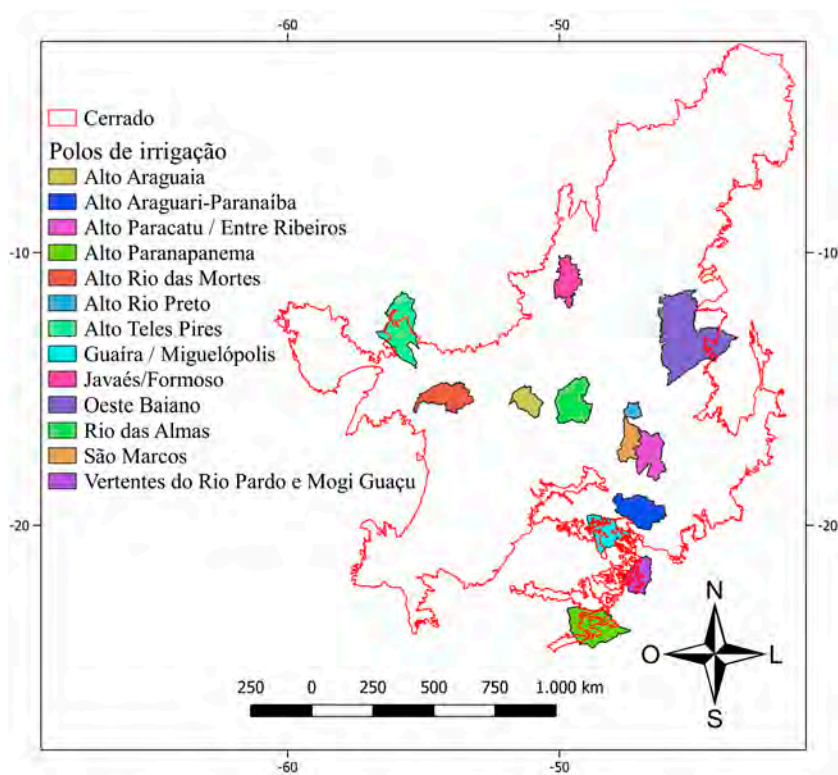


Figura 1.2. Polos de agricultura irrigada presentes no Cerrado.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

1.3 Marco legal

No Brasil, o marco legal para o desenvolvimento da irrigação teve início em 1979, com a promulgação da Lei 6.662, conhecida como Lei de Irrigação, que instituiu a Política Nacional de Irrigação.

Entretanto, a Lei 6.662 só foi regulamentada pelo Decreto nº 89.496, de 29 de março de 1984. Posteriormente, sofreu modificações pelos decretos 90.309, de 16/10/1984; 90.991, de 26/2/1985; e 93.484, de 29/10/1984, os quais foram revogados pelo Decreto nº 2.178, de 17/3/1997. Em 21 de maio de 1993, a Lei nº 8.657 foi promulgada, acrescentando parágrafos ao Artigo 27 da Lei de Irrigação. Porém, alguns dispositivos da Lei de Irrigação foram superados pela Constituição de 1988.

Em 11 de janeiro de 2013, foi promulgada a Lei nº 12.787, que estabelece o novo marco legal da Política Nacional de Irrigação.

1.4 Considerações finais

É sabido que a agricultura, especialmente a irrigada, tem passado por um profundo processo de transformação tecnológica. No contexto nacional, diversos fatores contribuem para seu desenvolvimento, como: (a) recursos humanos qualificados; (b) indústria competitiva e tecnológica; (c) leis de recursos hídricos consolidadas; (d) aprovação da Lei da Política Nacional de Irrigação; (v) disponibilidade de tecnologia; (vi) legislação ambiental clara.

Por outro lado, ainda existem desafios ao crescimento, como: (a) falta de visão estratégica de negócios em recursos humanos; (b) fragilidade institucional; (c) interferência política; (d) excesso de controle ambiental; (e) predominância da visão de obra sobre outras etapas nos projetos públicos de irrigação; (f) ausência de regulamentação da Lei de Irrigação.

A agricultura irrigada no Brasil, assim como em outros países, sempre enfrentará grandes desafios. Os irrigantes brasileiros, em geral, são reconhecidos pelo uso de tecnologias avançadas e pela preocupação com o ambiente, demonstrando estar preparados para enfrentar as incertezas do processo de produção de alimentos sustentáveis ambientalmente. No entanto, é importante ter em mente que vários fatores que influenciam no desenvolvimento da agricultura irrigada não dependem exclusivamente dos agricultores.

A manutenção de uma agricultura sustentável no Cerrado é estratégica para o Brasil. Neste contexto, o fortalecimento da irrigação é essencial, pois a irrigação contribui para o desenvolvimento social e econômico do país, com a geração de empregos estáveis e duradouros, além de reduzir as pressões sobre áreas de vegetação nativa, uma vez que as áreas irrigadas podem produzir até três vezes mais que a de sequeiro, além de trazerem maior rentabilidade aos produtores. A irrigação traz vários benefícios, tais como:

1. Produção	<ul style="list-style-type: none"> a. Produtividade média: três vezes maior que a de sequeiro, podendo, em algumas culturas, como o arroz, chegar até seis vezes. b. Estabilidade: reduz a variabilidade anual da produção, pois reduz os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas. c. Oportunidade: viabiliza a produção de certas culturas, como, por exemplo, as hortaliças. d. Efetividade: viabiliza a produção durante todo o ano, inclusive no período seco, e em regiões com baixa disponibilidade hídrica. e. Qualidade: garante mais qualidade ao produto, aumentando o seu valor agregado.
2. Geração de emprego	Geração de dois a seis empregos por hectare na cadeia.

3. Desenvolvimento social	Em 2019, o valor da produção irrigada foi igual a R\$ 55 bilhões, aumentando o produto interno bruto e contribuindo para reduzir a pobreza.
4. Meio ambiente	a. Redução da demanda por abertura de novas áreas para produção de alimentos. No mundo, são 300 milhões de hectares preservados. b. Aumento do sequestro de carbono.

O objetivo de produzir mais alimentos deve ser visto dentro de uma abordagem mais ampla, considerando os aspectos de sustentabilidade ambiental, ou seja, buscando produzir mais alimentos com melhor qualidade e com menores impactos aos recursos naturais. O desafio técnico será produzir tecnologias para garantir segurança alimentar e nutricional para a população sem aumentar os impactos negativos da agricultura ao meio ambiente (Rodrigues; Domingues, 2017).

O Brasil possui uma forte rede de instituições de pesquisa capaz de gerar tecnologias que contribuam para a produção sustentável de alimentos. Assim, os principais desafios da agricultura irrigada brasileira não são tecnológicos. Para que a agricultura irrigada possa se consolidar, utilizando plenamente todas as vantagens da tecnologia disponível, é preciso garantir aos irrigantes as bases para o seu desenvolvimento, ou seja, é preciso que ele tenha segurança ambiental, hídrica, energética e jurídica para o seu negócio.

Se existe tecnologia disponível, o que tem dificultado o desenvolvimento da agricultura irrigada?

Barros et al. (2009) fizeram um amplo levantamento de informações, entrevistaram atores dos diferentes segmentos da agricultura irrigada e identificaram um conjunto de temas relacionados às causas da baixa utilização do potencial das áreas irrigáveis do País:

- Energia elétrica e agricultura irrigada: disponibilidade, qualidade e custo de energia elétrica.

- Pesquisa, tecnologia e assistência técnica para a agricultura irrigada: o acesso limitado ao conhecimento aplicado à irrigação foi apontado como elemento relevante para os elevados custos de produção da agricultura irrigada. A baixa oferta de cursos direcionados às técnicas de irrigação, a inexistência de assistência técnica em alguns estados ou sua oferta deficiente em outros acabam contribuindo para uma utilização ineficiente das técnicas e sistemas de irrigação existentes.
- Gestão de recursos hídricos: a agricultura irrigada é atividade altamente intensiva no uso de recursos hídricos. A abordagem de usos múltiplos da água, preconizada na visão estratégica do estudo de planejamento territorial, requer uma atuação integrada dos diversos setores que concorrem pelo seu uso – consumo humano, produção e energia. O adequado tratamento das questões relacionadas ao uso da água em projetos de irrigação, como a obtenção de outorgas e a concorrência com outros usos, exige atenção para atuação convergente dos atores para sua melhor utilização.
- Crédito e incentivos financeiros para agricultura irrigada: a inexistência de linhas de crédito adequadas aos prazos de maturação dos projetos da agricultura irrigada. O seguro rural não é adaptado à agricultura irrigada, fazendo-se necessário o desenvolvimento de instrumentos específicos de seguro e crédito.
- Papel das instituições públicas e privadas no desenvolvimento da agricultura irrigada: a falta de coordenação entre as instituições, à baixa efetividade de coordenação e a defasagem da legislação relativa ao tema. É necessário coordenar as ações interministeriais e promover uma política mais atrativa aos investimentos privados.
- Infraestrutura complementar para a agricultura irrigada: a agricultura irrigada precisa de infraestrutura mínima para se desenvolver. É imprescindível uma logística que permita a produção, o armazenamento e o escoamento da safra das áreas cultivadas,

irrigadas ou não. Para tanto, o planejamento territorial em consonância com as ações interministeriais é de extrema importância.

Esses autores ainda identificaram fatores de contexto favoráveis e desfavoráveis que refletem os elementos fora da governabilidade ou abrangência do tema que podem influenciar positiva ou negativamente o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Os fatores de contexto favoráveis foram: (a) demanda por alimentos de maior qualidade; (b) aumento da demanda mundial de alimentos; (c) maior nível de exigência pela preservação ambiental; e (d) agravamento de eventos climáticos extremos em função das mudanças climáticas.

Os fatores de contexto desfavoráveis identificados foram: (a) possibilidade de crise energética; (b) conflitos pelo uso da água; (c) limitação da expansão da capacidade de preservação de água; (d) legislação ambiental restritiva; e (e) custos crescentes de água, energia e outros insumos.

Os principais entraves para o desenvolvimento da agricultura irrigada não podem ser diretamente resolvidos pelo irrigante. Eles dependem muito mais de articulação e integração entre as instituições públicas e entre estas e as instituições privadas. Entre os principais entraves vale a pena destacar: (a) licenciamento ambiental; (b) reservação de água (barragens); (c) outorga do direito de uso de recursos hídricos; e (d) energia elétrica.

Rodrigues et al. (2017) destacam que a agricultura irrigada terá que se adaptar a uma sociedade cada vez mais dinâmica, exigente quanto à alimentação e quanto às questões sociais e ambientais. Nesse novo contexto, os autores apontam os seguintes grandes desafios: (a) institucionais – maior integração entre as instituições e suas ações; (b) políticos – maior integração entre as políticas setoriais e os respectivos planos, além de regulamentar a política nacional de irrigação; (c) ambientais – reduzir os impactos e contribuir para a sustentabilidade ambiental; (d) estruturais – desenvolver infraestrutura básica para

o desenvolvimento da agricultura irrigada nas diferentes regiões do país; (e) pesquisa – desenvolver pesquisas aplicadas, com foco nos reais problemas da agricultura; (f) capacitação – desenvolver estratégias adequadas de capacitação, atendendo às demandas dos diferentes clientes, buscando sempre apresentar o problema sob a ótica da bacia hidrográfica e fortalecer a extensão rural; (g) comunicação – desenvolver estratégias de comunicação, buscando atender às demandas dos diferentes nichos da sociedade; (h) técnicos – implementar técnicas que contribuam para aumentar a produtividade de uso da água, por meio do aumento do rendimento e a redução da quantidade de água utilizada; (i) tecnológicos – trabalhar para que as tecnologias sejam assimiladas e adotadas pelos produtores; (j) climáticos – desenvolver estratégias para enfrentar as variabilidades climáticas e reduzir o risco agrícola, por meio da melhoria da precisão das previsões, do desenvolvimento da agricultura com inteligência climática e de estratégias de adaptação às mudanças do clima.

1.5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF, 2021. 130 p.

BARROS, D. S.; CAVALCANTI, A. A. P.; LUCIANO, A. A.; NAVARRO, A. A. de A. L.; BATTISTON, C. C.; ESPÍNDOLA, T. **Relatório final do modelo lógico**: tema: agricultura irrigada. [Brasília, DF]: MPOG/SPIE/NTIH/CGECRH, 2009.

BASTIAANSEN, W. G. M.; STEDUTO, P. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 595-611, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.032>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportações do agronegócio sobem 6% em 12 meses e somam US\$ 102,14 bilhões**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://antigo.agricultura.gov.br/noticias/exportacoes-do-agro-em-12-meses-somam-us-102-14-bilhoes>. Acesso em: 18 maio 2020.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. P.; PILOTTO, I. L.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D. C.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; MEDEIROS, G. S.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. A. Assessment

of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512–527, 2014.

EMBRAPA. **Visão 2014-2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira**. Brasília, DF, 2014. 194 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/108955/1/Documento-Visao-versao-completa.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): managing systems at risk**. Rome, 2011. 285 p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337–342, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature10452>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Piracicaba, 2014.

HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. L.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd edition. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 2007.

IBGE. **Malhas territoriais**. 2021. Disponível em: www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio. Acesso em: 31 out. 2022.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84–94, 2014.

MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; McVICAR, T. R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v. 183, n. 2–3, 301–322, 2005.

PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R. J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286–298, 2016.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in western Bahia, Brazil: the urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, n. 5, p. 933, maio 2019.

PRADHAN, P.; FISCHER, G.; van VELTHUIZEN, H.; REUSSER, D. E.; KROPP, J. P. Closing yield gaps: how sustainable can we be? **Plos One**, v. 10, n. 6, e0129487, 17 June 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>. Acesso em: 22 nov. 2022.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (ed). **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017. 327 p.

RODRIGUES, L. N. Quantidade de água utilizada na agricultura irrigada: certezas e incertezas nas estimativas. **Item**, n. 114, p. 47-53, 2017.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, F. D.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. In: RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (ed.). **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017. p. 21-108.

ROUX, G. **Ancient Iraq**. 3. ed. East Rutherford, NJ: Penguin Books, 1993. 576 p.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: a spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SPANGLER, K. R.; LYNCH, A. H.; SPERA, S. A. Precipitation drivers of cropping frequency in the Brazilian Cerrado: evidence and implications for decision-making. **Weather, Climate, and Society**, v. 9, n. 2, p. 201-213, 2017.

ZHANG, Y.; KENDY, E.; QIANG, Y.; CHANGMING, L.; YANJUN, S.; HONGYONG, S. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.

CAPÍTULO 2

O Bioma Cerrado

Níckolas Castro Santana

Lineu Neiva Rodrigues



Fotos: Fabiano Bastos (da esquerda para a direita - 1 e primeiro plano); Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 2, 3 e 4)



2.1 Introdução

O bioma Cerrado pode ser dividido em 19 ecorregiões (Figura 2.1). As ecorregiões são áreas geográficas definidas por padrões ambientais semelhantes, que refletem as características de um ecossistema, especialmente delimitadas a partir de um padrão geomorfológico, vegetação, solos, geologia, diversidade florística, topografia e precipitação (Sano et al., 2019). No Cerrado, a maior ecorregião é a do Paraná Guimarães, com área de 364.523 km², e a menor é a ecorregião costeira, com área de 8.800 km². A ecorregião da Depressão Cárstica do São Francisco é a mais vulnerável, o que ocorre devido à alta conversão do uso do solo e baixo percentual de unidades de conservação (Sano et al., 2019).

2.2 População

Atualmente, mais de 45 milhões de brasileiros residem em municípios estabelecidos no Cerrado, dos quais mais de 20% está concentrada nos municípios-capitais dos estados, enquanto o interior é esparsamente povoado (Figura 2.2).

O Cerrado cobre totalmente a superfície de 752 municípios, sendo Ribas do Rio Pardo (17.300 km²), localizado no estado do Mato Grosso do Sul, o maior município com área totalmente incluída no Cerrado e o município de Santo Antônio dos Milagres (33 km²), localizado no estado do Piauí, o menor. Outros 682 municípios se encontram em zonas de transição entre a vegetação de Cerrado e de outros biomas, desses o maior é o município de Corumbá (64.400 km²), no estado do Mato Grosso do Sul e o menor o município de Águas de São Pedro (3 km²), localizado no estado de São Paulo.

No ano de 2010, mais de 85% da população do Cerrado estava concentrada em áreas urbanas. Entretanto, alguns municípios não seguem esse padrão. Mais de 85% das populações dos municípios de Muquém do São Francisco, BA, Marajá do Sena, MA, por exemplo, residiam em

áreas rurais. Por outro lado, os municípios de Valparaíso de Goiás, GO, Águas de São Pedro, SP, por exemplo, não apresentaram nenhum morador residente em áreas rurais.

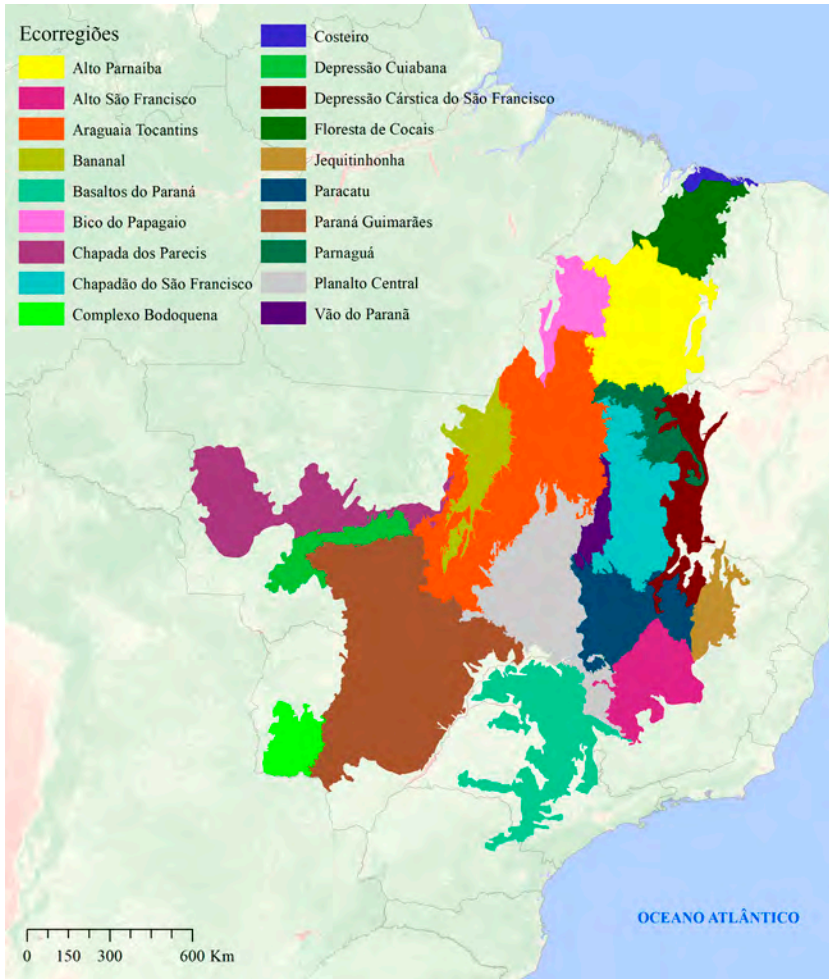


Figura 2.1. Divisão do bioma Cerrado em ecorregiões. O limite utilizado é diferente da nova atualização dos biomas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Fonte: Adaptado de Sano et al. (2019).

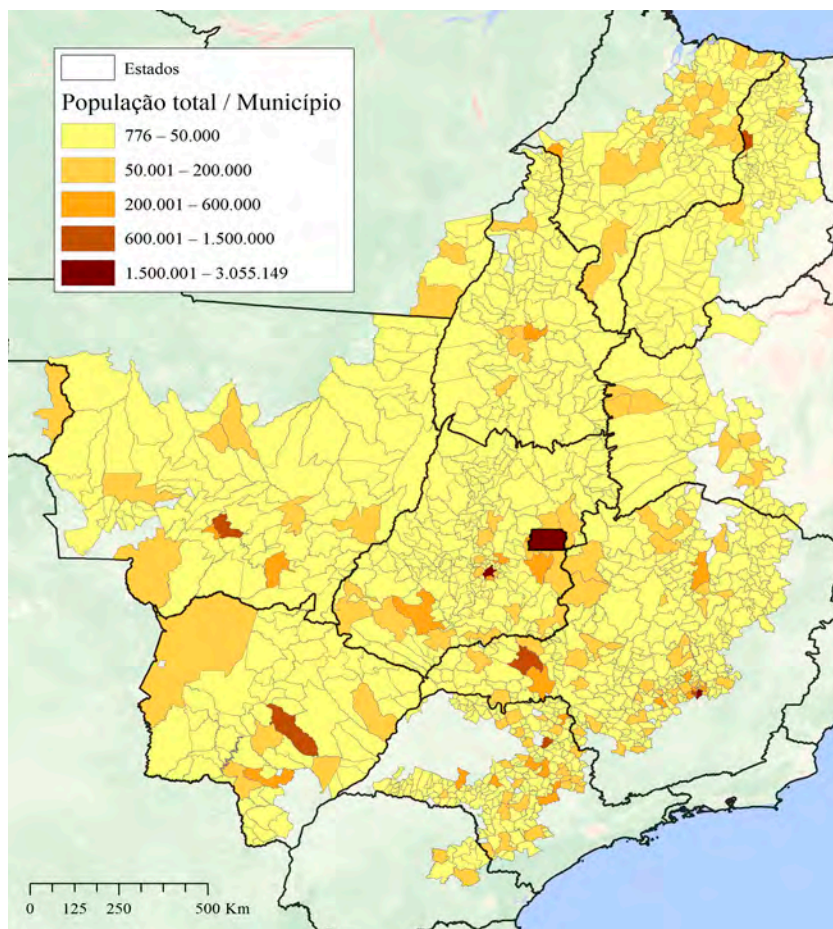


Figura 2.2. População por município na região do Cerrado para o ano de 2020.
Fonte: IBGE (2020).

Mais de 80% dos municípios do Cerrado possuem a população total variando entre 776 e 50 mil habitantes. Os municípios mais populosos incluem Brasília, DF e Belo Horizonte, MG, com 3.055.149 e 2.521.564 habitantes, respectivamente. Os municípios menos populosos são Serra da Saudade, MG e Borá, SP, com 776 e 838 habitantes, respectivamente.

No Cerrado, os municípios com populações menores do que 50 mil habitantes, em geral, possuem como principal atividade econômica a agropecuária, o que os leva a dependerem mais diretamente dos recursos naturais provenientes desse bioma e das condições climáticas favoráveis a esses processos produtivos. Municípios com populações maiores do que 1,5 milhão de habitantes, como Brasília, Belo Horizonte e Campinas, possuem atividades econômicas diversas, que variam entre os setores agropecuários, industriais e serviços.

Assim como a população brasileira em geral, a população do Cerrado é diversificada quanto à classificação de cor ou raça. A ocupação original por povos indígenas e posteriormente pelos europeus e africanos levou a uma população altamente miscigenada (Figura 2.3). De fato, cada estado possui um padrão único, por exemplo, no Maranhão mais de 68% da população se declarou parda, enquanto, em São Paulo, esse percentual é menor que 24%.

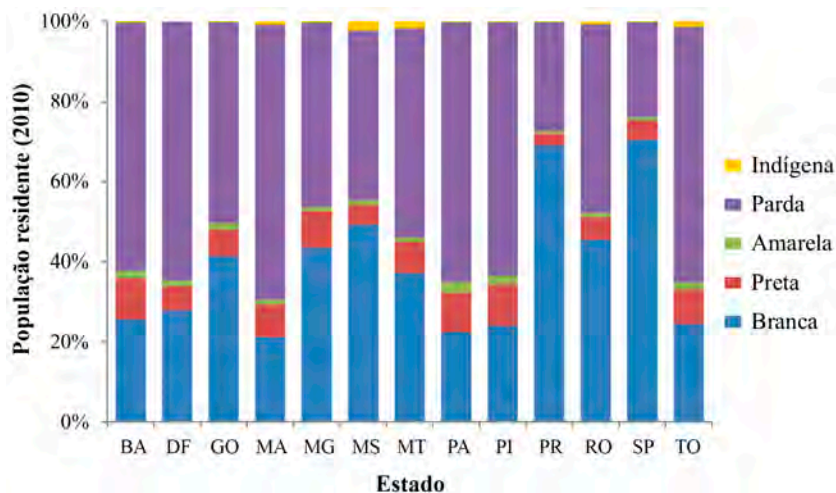


Figura 2.3. Percentuais da população por estado conforme declaração de cor ou raça no ano de 2010. Os dados são referentes apenas aos municípios inseridos no limite do Cerrado.

Fonte: IBGE (2020).

Além da subdivisão da população entre áreas urbanas e rurais, há a presença de populações tradicionais, dispersas no território do Cerrado. Essas populações podem estar localizadas também em terras indígenas, quilombos e assentamentos da reforma agrária (Figura 2.4). Até o ano de 2020, foram listadas 102 terras indígenas, 77 quilombos e 1.890 assentamentos da reforma agrária, englobando mais que 8% da área total do Cerrado.

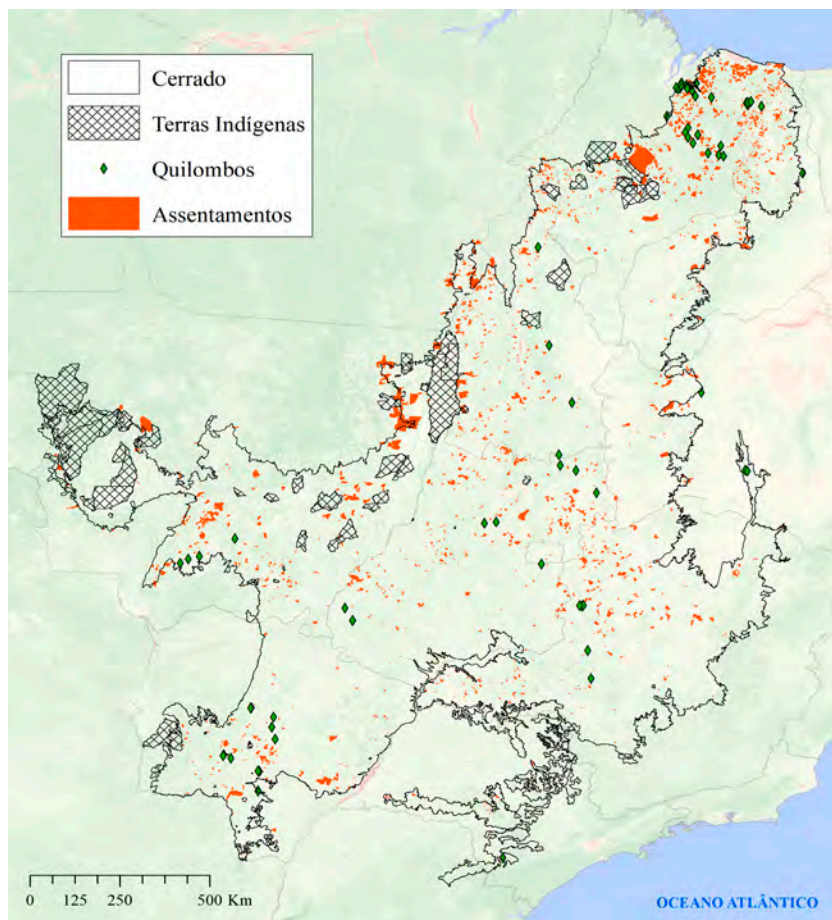


Figura 2.4. Áreas de populações tradicionais no Cerrado.

Fonte: Adaptado de Funai (2022) e Incra (2022).

2.3 Recursos estratégicos do Cerrado

O Cerrado brasileiro dispõe de grande riqueza ecológica ao mesmo tempo em que fornece grande aporte para a economia brasileira. Para a proteção de sua biodiversidade foram implementadas diversas unidades de conservação, totalizando cerca de 8,44% da sua área total (Figura 2.5).

Cerca de 35% das áreas protegidas, ou 2,6% da área total do Cerrado, são classificadas como unidades de proteção integral, com o objetivo de assegurar a preservação da natureza e minimizar a presença humana, sendo permitidas apenas pesquisas científicas, turismo ecológico e uso indireto dos recursos.

O restante, cerca de 65% das unidades de conservação, estão inseridos no grupo de unidades de conservação de uso sustentável, sendo permitido, nesse caso, o uso sustentável dos recursos naturais. Para o bioma Cerrado essa porcentagem de áreas protegidas, principalmente as áreas de proteção integral, é considerada baixa em comparação à sua área total, colocando em risco a sua conservação no futuro (Klink; Machado, 2005).

O Cerrado desempenha papel importante na economia brasileira, principalmente na produção agrícola e pecuária, na irrigação de lavouras, na geração de energia elétrica e no abastecimento humano/animal, além da mineração.

No setor da agropecuária, foram desenvolvidas diversas técnicas que contribuíram para aumentar a produtividade do Cerrado, tornando o Brasil um dos maiores produtores de alimentos. Grande parte da produção de grãos e cereais é realizada na região, como a soja e o milho (Rada, 2013), que também concentra mais de 55% da produção pecuária do Brasil (Pereira et al., 2018).

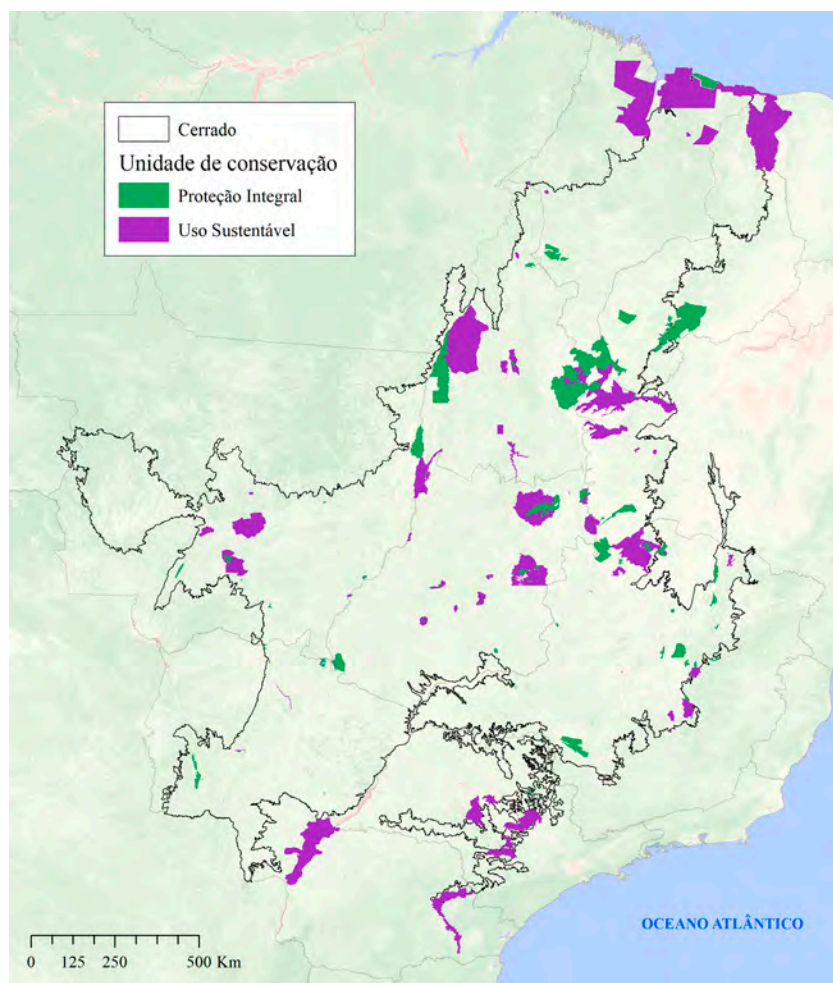


Figura 2.5. Unidades de conservação do Cerrado.

Fonte: Adaptado de Brasil (2022) e ICMBiO (2022).

De acordo com características ambientais, como o tipo de solo e relevo, cada município se especializou em um tipo de produção agropecuária (Figura 2.6). Os municípios com maior percentual de sua área composta por pastagens é Jauru, MT e Aurilândia, GO, com 88 e 74%,

respectivamente. Os municípios de Ipiranga do Norte, MT e Montividiu, GO possuem respectivamente 65 e 71% da sua área total cultivada com lavouras de soja, sendo esses municípios os que apresentam o maior percentual de área total ocupada com essa cultura.

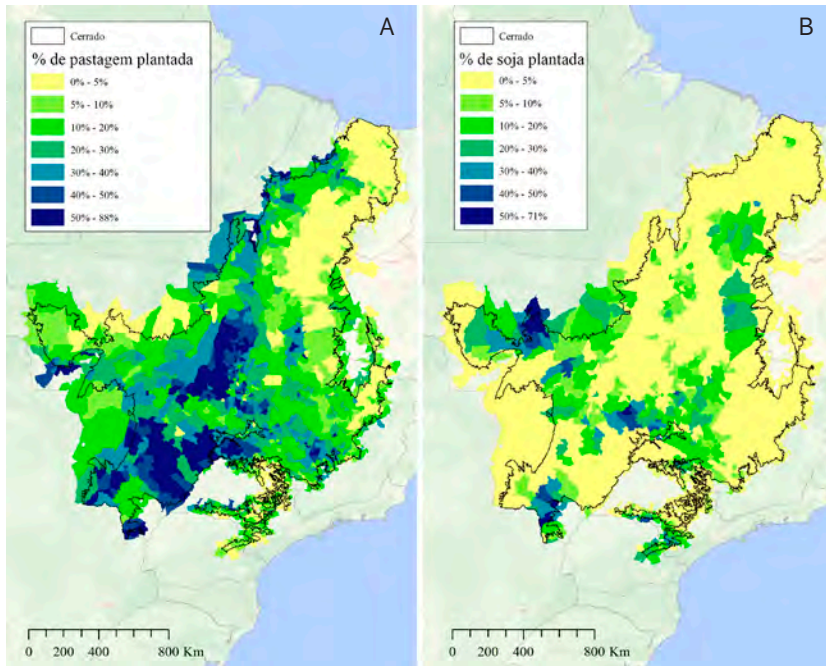


Figura 2.6. Porcentagens de ocupação dos solos municipais: pastagens plantadas (A); soja (B).

Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

A geração de energia hidroelétrica no Brasil depende especialmente da disponibilidade hídrica do Cerrado, que possui mais de 291 usinas hidrelétricas (Latrubesse et al., 2019). Além disso, as principais usinas hidrelétricas, tais como Belo Monte, Tucuruí e Itaipu, possuem algumas das suas principais nascentes localizadas nesse bioma (Figura 2.7). De fato, cerca de 64% da energia elétrica produzida no Brasil é derivada de usinas hidrelétricas (Lima et al., 2020), sendo, 77% provenientes

de usinas que contam com nascentes localizadas no bioma Cerrado (Andrade; Santos, 2015; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022).

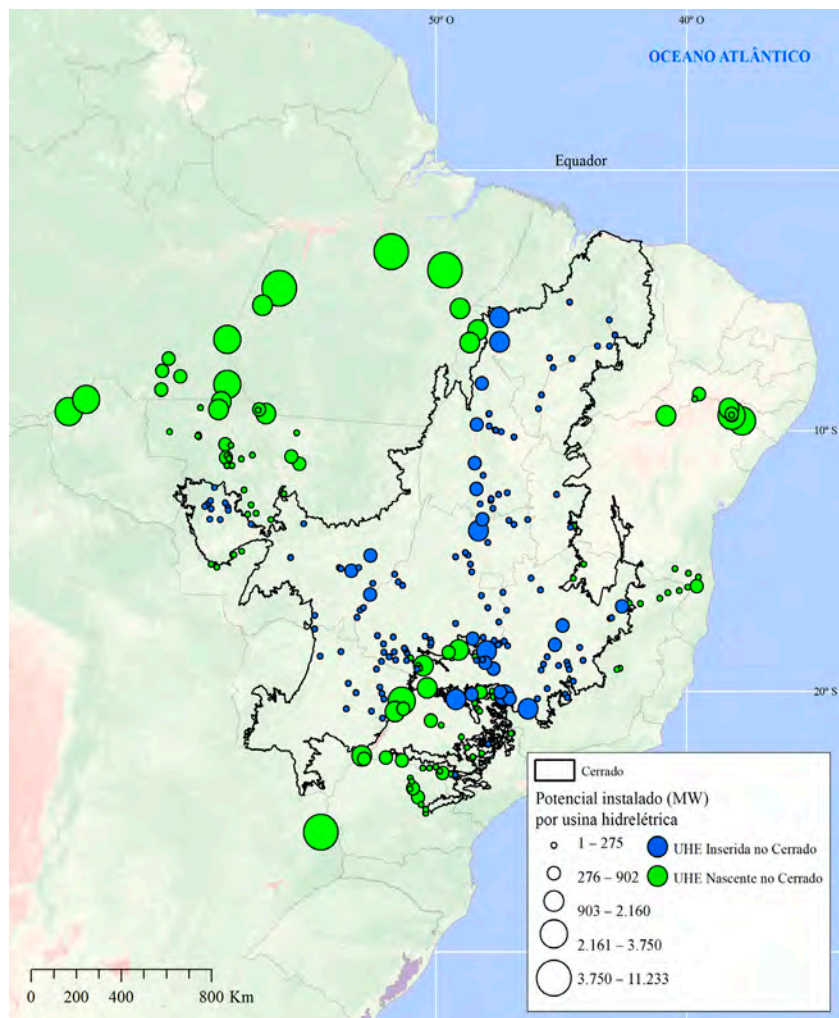


Figura 2.7. Potencial instalado (MW) em cada usina hidrelétrica, dependente de águas do Cerrado, no ano de 2020, onde também estão incluídas usinas em estágio de planejamento.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2022).

A usina hidrelétrica de Marimbondo, localizada no Rio Grande, entre São Paulo e Minas Gerais, é a que possui maior potência instalada dentro do limite do Cerrado, com capacidade total de até 1.440 MW. Entre as usinas hidrelétricas localizadas em outros biomas, mas que possuem nascentes no Cerrado, a de Belo Monte, no estado do Pará, é a que apresenta maior capacidade instalada, chegando a 11.233 MW. Atualmente, entretanto, opera efetivamente com 4.500 MW (Fearnside, 2014).

2.4 Meio físico

2.4.1 Vegetação

O Cerrado é o maior ecossistema de savana da América do Sul, sendo considerado um dos biomas mais ricos do planeta (Franco et al., 2014). A sua classificação como savana é generalista pois há uma grande diversidade de formações vegetais que variam de florestas ombrófilas e semidecíduais em áreas com maior disponibilidade hídrica; de florestas decíduais em áreas com menor disponibilidade hídrica, mas solos férteis, até a formações típicas de savanas, arbustivas e gramíneas, encontradas em áreas com solos menos férteis e com altas taxas de incêndios (Bueno et al., 2018).

A vegetação do Cerrado é influenciada pela alta variabilidade climática anual, especialmente da precipitação, com períodos de 3 a 6 meses de estiagem. Na Figura 2.8, é ilustrada a variação da cobertura vegetal a partir da variação mensal do índice de vegetação da diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), calculado a partir de imagens obtidas com um espectroradiômetro de imagem com resolução moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS), para os meses de janeiro a dezembro.

O NDVI é uma fração da resposta da vegetação nos canais espectrais do vermelho e infravermelho próximo, indicando a intensidade da atividade fotossintética em cada pixel das imagens obtidas. A partir do NDVI, é possível analisar a fenologia da vegetação e possíveis distúr-

bios relacionados, por exemplo, à degradação do solo ou às alterações climáticas (Santos et al., 2021).

O padrão observado na Figura 2.8 indica o período de crescimento da vegetação do Cerrado, a partir do início do período de chuvas no mês de outubro, enquanto o declínio da vegetação coincide com o início do período de estiagem no mês de maio. Também, é possível observar que certas áreas do Cerrado têm menor NDVI em comparação com outras, resultado das diferentes fitofisionomias dominantes em cada ecorregião. Na zona costeira ao norte, por exemplo, o NDVI se mantém acima de 0,5 durante todo o ano.

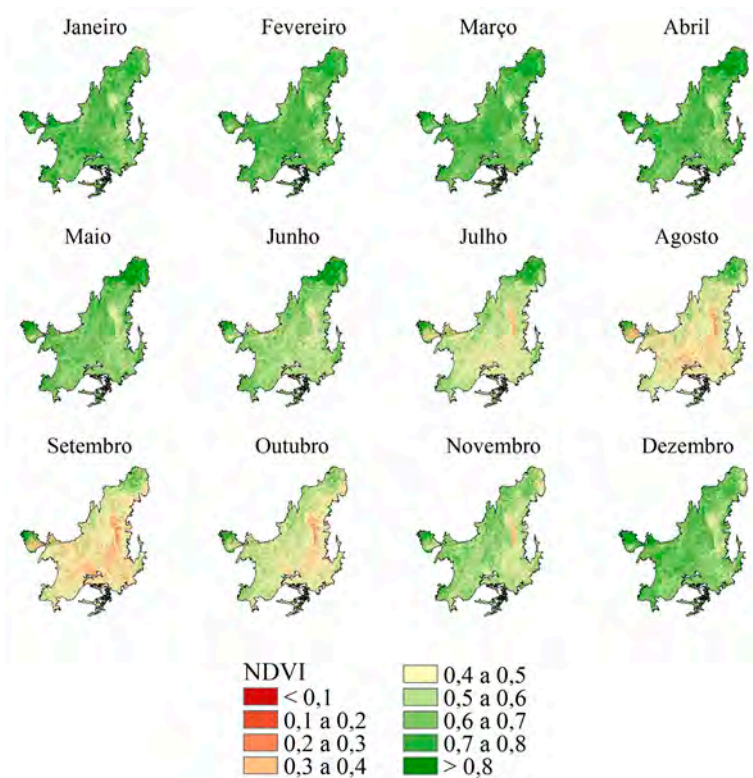


Figura 2.8. Média mensal do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) no Cerrado, para o período de 2001 a 2019.

2.4.2 Relevo e pedologia

Conforme a classificação geomorfológica do IBGE (2009), o Cerrado pode ser dividido de forma mais abrangente em sete unidades geomorfológicas ou compartimentos (Figura 2.9). A maior parte do Cerrado é definida como depressões, 27% da área total, seguida por planaltos, 22%; patamares, 20%; chapadas, 15%; planícies, 6%; serras, 5%; e tabuleiros, 4%. Essa classificação é baseada nos parâmetros de altimetria, fisionomia, litologia, estrutura, além dos processos originários como, por exemplo, o comportamento da drenagem.

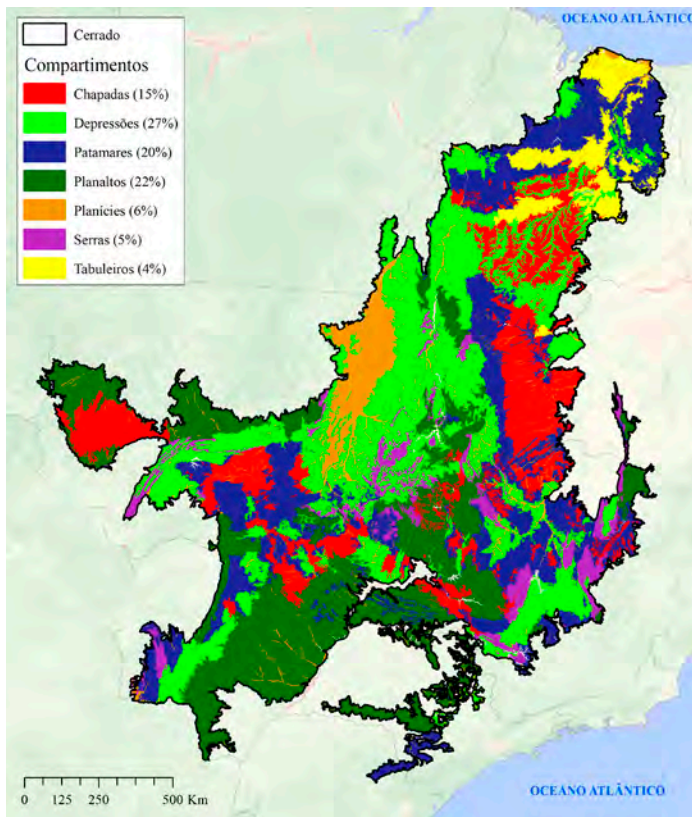


Figura 2.9. Compartimentação geomorfológica do Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2009).

De forma geral, os compartimentos geomorfológicos podem ser resumidos em dois grandes grupos: platôs e depressões (Sano et al., 2019). Os platôs são as áreas de maior altitude e maior inclinação do terreno, ocupando principalmente a porção centro-sul do bioma. As depressões são áreas com menor altitude e menor inclinação do terreno, ocupando, principalmente, a porção noroeste do bioma. A altitude do Cerrado varia entre 85 m, nas ecorregiões do Bananal e Floresta de Cocais, a 1.045 m na ecorregião do Planalto Central (Sano et al., 2019). A ocupação do Cerrado e sua utilização atual foram dependentes, entre outras variáveis, do padrão geomorfológico. As áreas que mais foram aproveitadas pela agricultura dada a facilidade de implantação de maquinários foram as chapadas e os planaltos, enquanto as outras áreas se especializaram principalmente na pecuária.

A pedologia foi outro fator importante para a ocupação agrícola atual do Cerrado. Os solos mais representativos no Cerrado e os que mais são utilizados na agricultura atual são: os latossolos, ocupando cerca de 43% da área total do bioma; e os neossolos, ocupando cerca de 22% (Figura 2.10). Os latossolos são solos altamente intemperizados e profundos, com boa drenagem, localizados em áreas de relevo plano a suave-ondulado. Os neossolos podem ser divididos em três subclasses, sendo a mais comum a dos neossolos quartzarênicos, que são profundos, de textura arenosa e bem drenados, ocorrendo em áreas planas ou suave-onduladas (Reatto; Martins, 2005).

Apesar dessas características, a maioria dos solos do Cerrado possui baixa fertilidade natural, dada à alta acidez, ao alto teor de alumínio, a baixas taxas de cálcio e magnésio, sendo necessário aplicar técnicas de correção do solo para se poder viabilizar a produção agrícola. Desde a década de 1970, a ocupação tem se intensificado, tendo o seu auge na década de 1990 com a aplicação de técnicas desenvolvidas especialmente para aumentar a produtividade e a resistência das culturas (Hunke et al., 2015). A grande dificuldade atual está em se buscar equilibrar o aumento da produtividade com a preservação dos solos, em que se tem observado altas taxas de perdas por erosão em todo o

bioma, diminuindo a produtividade ao aumentar a perda de nutrientes (Gomes et al., 2019).

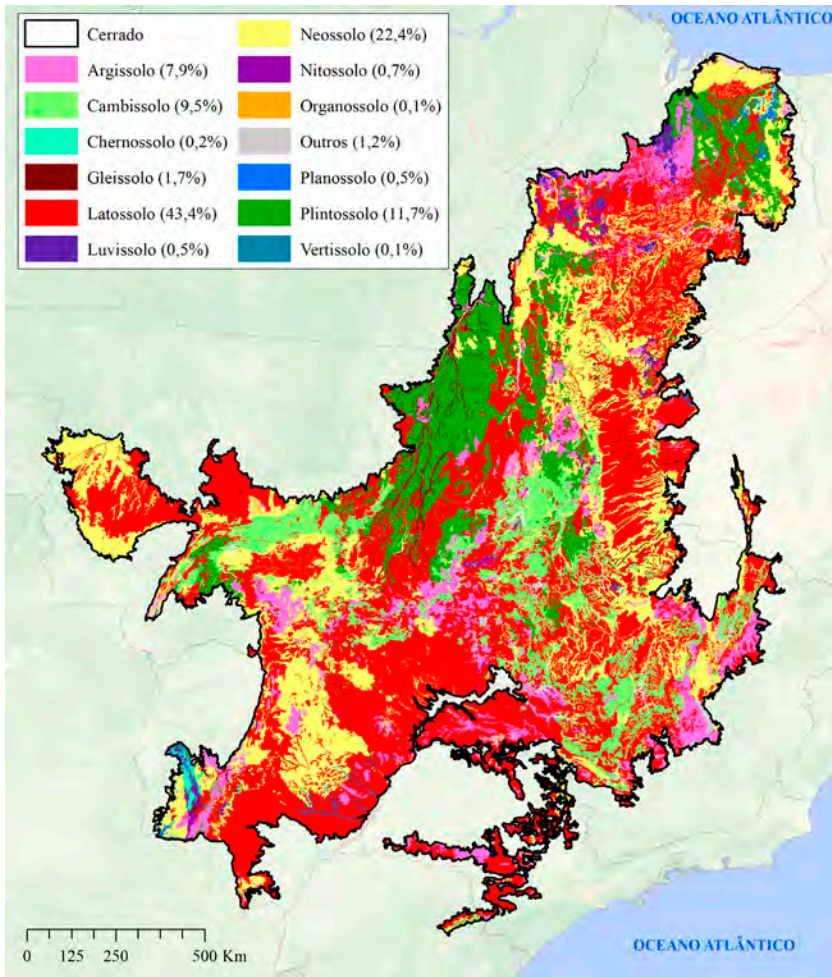


Figura 2.10. Mapa pedológico do Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

2.4.3 Uso do solo e ocupação do Cerrado

A ocupação do Cerrado brasileiro foi resultado de um conjunto de fatores: características ambientais favoráveis como clima, relevo e solos, além de projetos públicos de ocupação do território. Essa ocupação ocorreu há muitos séculos a partir de populações tradicionais, entretanto se tornou intensiva a partir da década de 1970, principalmente por avanços tecnológicos na agricultura.

Institutos de pesquisa, assim como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) contribuíram com técnicas adequadas de manejo do solo e inovação de maquinários, aumentando a produtividade no bioma. Além disso, o crescimento do setor de serviços e industrial fez surgir grandes centros urbanos no Cerrado, como Brasília e Goiânia (Rocha, 2012).

No ano de 2019, as principais coberturas do Cerrado incluíam cerca de 31% de pastagens, 30% de formações naturais savânicas, 15% de formações naturais florestais, 13% de agricultura e 8% de formações campestres (Figura 2.11). Os 3% restantes se encontravam divididos entre espelhos d'água, áreas urbanas, silvicultura, mangue e áreas sem vegetação. A ocupação no Cerrado atual atingiu praticamente todos os tipos de formações vegetais, solos e classes geomorfológicas.

Entre os anos de 1989 e 2019, houve uma intensa alteração da cobertura do Cerrado (Figura 2.12). As classes de silvicultura, urbano e agricultura tiveram os ganhos mais expressivos no período, com mais de 150% de ganhos de área. As outras classes tiveram aumento menos expressivo.

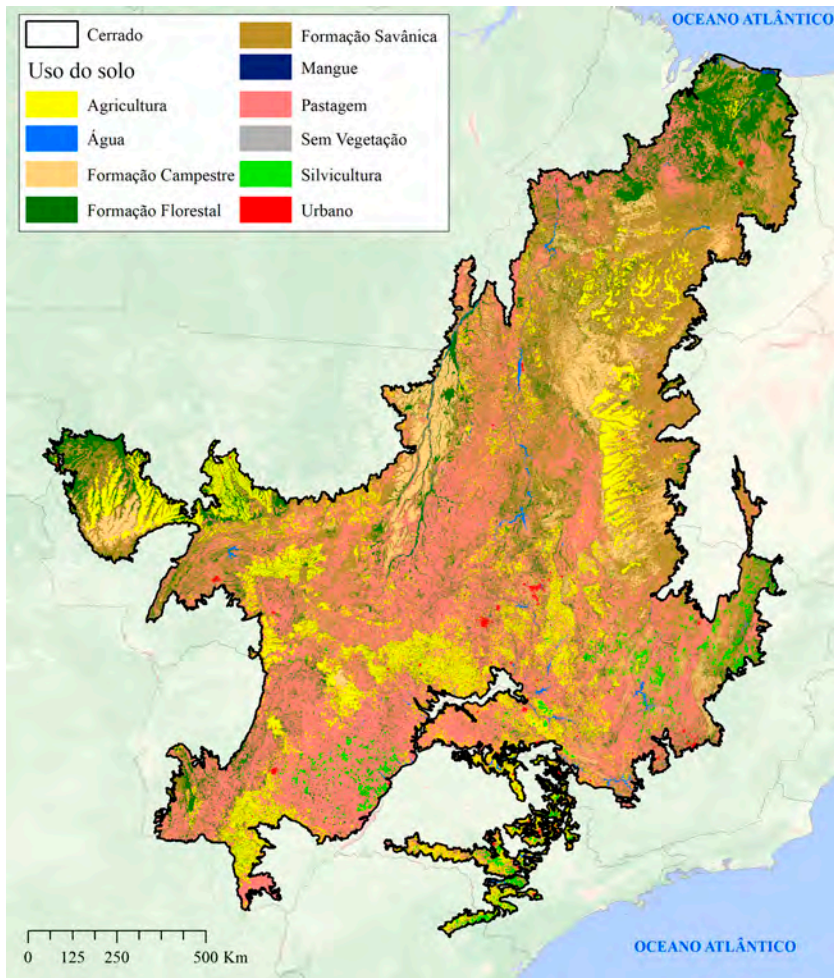


Figura 2.11. Mapa de uso do solo do Cerrado no ano de 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

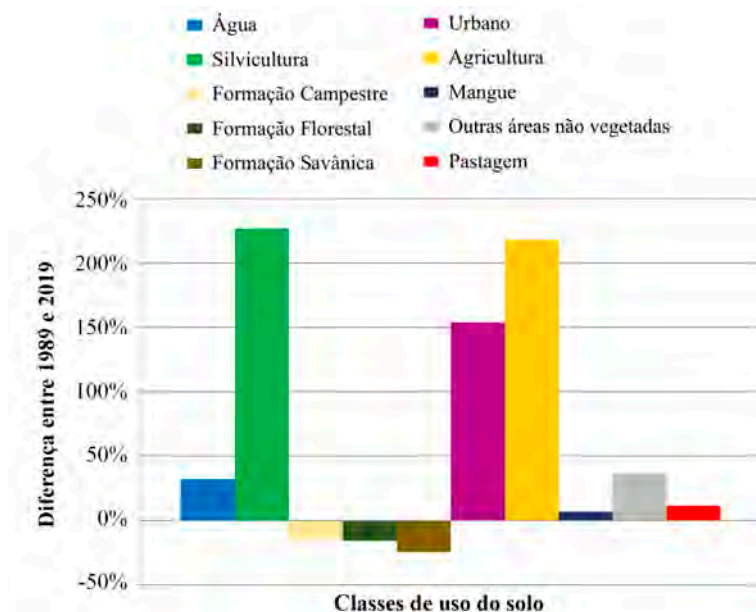


Figura 2.12. Diferença percentual entre as classes de uso do solo nos anos de 1989 e 2019 no Cerrado.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

Nas Figuras 2.13 e 2.14, é demonstrado o padrão de alteração da superfície em cada uma das classes de uso do solo. As classes de uso antrópico, silvicultura, agricultura e urbano apresentaram crescimento constante entre o período de 1989 e 2019, enquanto a classe de pastagens apresentou diminuição na última década. As classes de uso naturais, formações campestres, florestais e savânicas apresentaram diminuição constante nas últimas décadas, com exceção das áreas de mangue que estão estabilizadas.

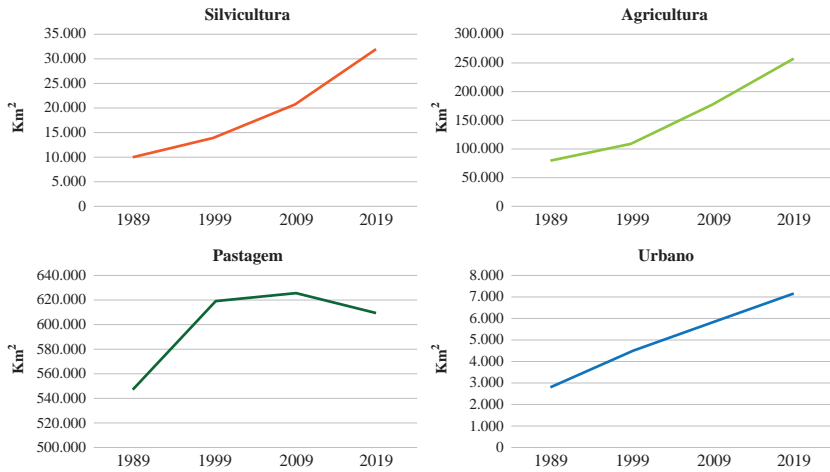


Figura 2.13. Alteração das classes de uso do solo antrópicas no Cerrado entre os anos de 1989 e 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

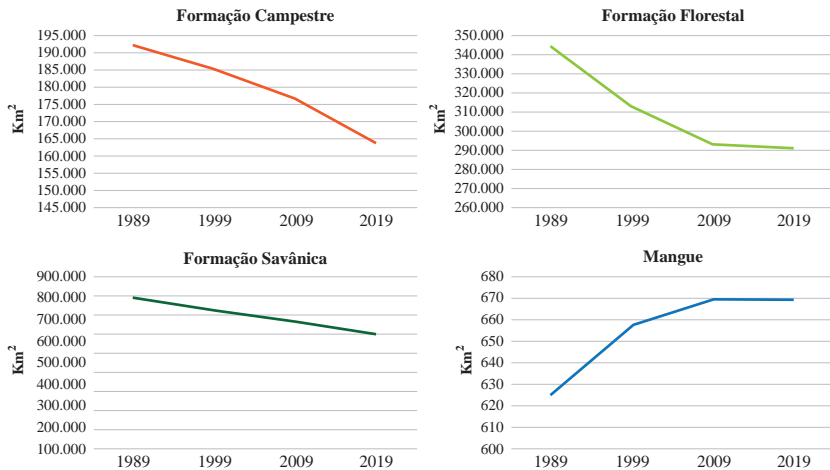


Figura 2.14. Alteração das classes de uso do solo naturais no Cerrado entre os anos de 1989 e 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

A quantificação da fragmentação da paisagem do Cerrado pode ser realizada por métricas da paisagem, as quais podem ser definidas como indicadores quantitativos da estrutura da paisagem, como fragmentação, bordas, formas, área central, vizinhos, diversidade, conectividade, entre outros (Oliveira et al., 2017).

Na Tabela 2.1, é indicada a situação da vegetação do Cerrado no ano de 2019 a partir dos dados do MapBiomas (2019).

Tabela 2.1. Métricas tradicionais da paisagem natural do Cerrado em quilômetros quadrados para o ano de 2019.

Métrica	MPS ⁽¹⁾	NumF ⁽²⁾	MedF ⁽³⁾	Área total de vegetação (km ²)
Valor	4,55	231.881	0,29	1.056.160

⁽¹⁾MPS = tamanho médio dos fragmentos.

⁽²⁾ NumF = número de fragmentos.

⁽³⁾ MedF = tamanho mediano dos fragmentos.

Analisando a Tabela 2.1, observa-se uma área total de vegetação natural de 1.056.160 km² em 2019, sendo dividida em 231.881 fragmentos (NumF). O tamanho médio dos fragmentos foi de 4,55 km² (MPS), enquanto o tamanho mediano foi de 0,29 km² (MedF). Nesse cenário, percebe-se que, para aquele ano, houve grande concentração de pequenos fragmentos de vegetação natural, dado que o tamanho mediano é 0,29 km², indicando assim uma alta fragmentação da paisagem, sendo associada principalmente às áreas de intenso uso agrícola (Carvalho et al., 2009).

2.5 Considerações finais

O conhecimento das características geográficas de um território é determinante para se ter eficiência na sua ocupação e sustentabilidade no seu desenvolvimento. O Cerrado é uma região estratégica para o Brasil, possui grande heterogeneidade entre suas sub-regiões,

apresentando padrões geomorfológicos, geológicos e pedológicos de alta variabilidade, o que dificultou ou retardou a sua exploração econômica. Associado a isso, a variabilidade climática foi um dos fatores essenciais para criar regiões de biodiversidade complexas, com alto endemismo.

A ocupação humana na região data dos períodos pré-coloniais, sendo amplamente modificada no presente, especialmente com a exploração econômica do bioma. A alta urbanização, associada ao desenvolvimento tecnológico da agropecuária, resultou em um mosaico de usos na região, os quais dependem principalmente dos recursos naturais disponíveis, desde água superficial e subterrânea, e propícios à agricultura, assim como um padrão climático estável, e manutenção da biodiversidade.

É necessário que essa região seja desenvolvida de forma sustentável, para isto, é fundamental a proteção dos recursos naturais, a criação de unidades de conservação, edição de normas e leis para preservação da água e do solo, assim como a regulação dos usos humanos. Essas são algumas ações desenvolvidas, considerando a importância ambiental e econômica da região para o Brasil. Existe a necessidade de ampliar essas ações, assim como ampliar o conhecimento científico do Bioma para que novas práticas sustentáveis possam ser desenvolvidas e a agricultura irrigada possa desenvolver considerando as peculiaridades das regiões.

2.6 Referências

ANDRADE, A. L.; SANTOS, M. A. Hydroelectric plants environmental viability: strategic environmental assessment application in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1413-1423, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Usinas hidrelétricas**. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Unidades de Conservação**. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/>. Acesso em: 31 out. 2022.

BUENO, M. L.; DEXTER, K. G.; PENNINGTON, R. T.; PONTARA, V.; NEVES, D. M.; RATTER, J. A.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. de. The environmental triangle of the Cerrado domain: ecological factors driving shifts in tree species composition between forests and savannas. **Journal of Ecology**, v. 106, n. 5, p. 2109-2120, 2018.

CARVALHO, F. M. V.; DE MARCO, P.; FERREIRA, L. G. The Cerrado into-pieces: habitat fragmentation as a function of landscape use in the savannas of central Brazil. **Biological Conservation**, v. 142, n. 7, p. 1392-1403, 2009.

FEARNSIDE, P. M. Impacts of Brazil's Madeira River dams: unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. **Environmental Science**, v. 38, p. 164-172, 2014.

FRANCO, A. C.; ROSSATTO, D. R.; SILVA, L. C. R.; FERREIRA, C. S. Cerrado vegetation and global change: the role of functional types, resource availability and disturbance in regulating plant community responses to rising CO₂ levels and climate warming. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 19-38, 2014.

FUNAI. **Geoprocessamento e Mapas**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>. Acesso em: 31 out. 2022.

GOMES, L.; SIMÕES, S. J. C.; NORA, E. L. D.; SOUSA-NETO, E. R. de; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v. 8, n. 1, p. 12, 2019.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRODER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v. 8, p. 1154-1180, 2015.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 out. 2021.

IBGE. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. 182 p. Acompanha CD-ROM. (Manuais técnicos em geociências, 5).

IBGE. **Pedologia**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>. Acesso em: 31 out. 2022.

IBGE. **Pesquisa nacional por amostra de domicílio contínua**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.

ICMBIO. **Dados geoespaciais de referência da cartografia nacional e dados temáticos produzidos no ICMBio**: unidades de conservação federais. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/>. Acesso em: 31 out. 2022.

INCRA. **Acervo fundiário**. 2022. Disponível em: <https://acervofundiario.incra.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E. Y.; FERREIRA, M. E.; NOGUEIRA, S.; WITTMANN, F.; DIAS, M. S.; DAGOSTA, F.; BAYER, M. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. **Conservation Science and Practice**, v. 1, e77, 2019.

LIMA, M. A.; MENDES, L.; MOTHÉ, G.; LINHARES, F.; CASTRO, M. P.; SILVA, M. G. da; STHEL, M. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, 2020.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias**. Coleção [5] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 31 out. 2022.

OLIVEIRA, S. N. de; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; McMANUS, C. M. Landscape-fragmentation change due to recent agricultural expansion in the Brazilian savanna, Western Bahia, Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 17, n. 2, p. 411-423, 2017.

PEREIRA, O.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; BAUMGARTEN, L. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v. 38, p. 146-155, 2013.

REATTO, A.; MARTINS, E. S. Classes de solos em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 47-59.

ROCHA, J. C. S. **Dinâmica de ocupação no bioma Cerrado: caracterização dos desmatamentos e análise das frentes de expansão**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MAGISTRALI, I. C.; SILVA, C. G.; OLIVEIRA, C. M. M.; LARANJEIRA, J. P. B.; SILVA, T. P. Degradation of the Brazilian Cerrado: interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118875, fev. 2021.

CAPÍTULO 3

Aspectos da Legislação Ambiental: uma visão para o Cerrado

Regina Gonçalves Barbosa Caixeta

Paula Angélica Reis Carneiro



3.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentada a estrutura legal que aborda a preservação do bioma Cerrado, enfatizando suas salvaguardas incorporadas. Isso compreende, além da análise das leis em vigor e dos projetos legislativos em processo, tanto em esfera federal quanto estadual, o apontamento, ainda que de forma preliminar, da relevância de uma delimitação e diferenciação das áreas consideradas prioritárias para a preservação do bioma, sem a pretensão de esgotar um assunto tão complexo. O Cerrado, como o segundo maior bioma das Américas e do Brasil, representa um ecossistema repleto de diversidade biológica. O extenso espaço geográfico ocupado pelo Cerrado é expressivo e fundamental no processo de distribuição dos recursos hídricos pelo Brasil (Lima e Silva, 2007). Consequentemente, o bioma possui particular importância para a conservação de recursos hídricos, cruciais para a manutenção da vida. Vastas extensões do Cerrado são ocupadas por atividades agropecuárias e, portanto, imprescindíveis para garantir a segurança alimentar da população brasileira e mundial. Há uma impressão errônea de que o Cerrado é um bioma biologicamente pobre. Ao contrário, esta é uma das regiões de maior biodiversidade do planeta e cobre 25% do território nacional (Myers et al., 2000), alcançando 2 milhões de quilômetros quadrado. Este é o segundo maior bioma do Brasil, superado apenas pela Floresta Amazônica, com aproximadamente 3,5 milhões de quilômetros quadrado. O Cerrado estende-se desde áreas marginais da Floresta Amazônica até áreas do sul de São Paulo e Paraná, ocupando mais de 20° de latitude e atingindo altitudes de 1,8 mil metros.

O Cerrado comporta um importante papel no desenvolvimento do setor agropecuário brasileiro. É notório que o crescimento populacional e da renda irão aumentar ainda mais a demanda global por alimentos. Já é possível observar o crescimento da demanda por energia e por água. O aumento da renda implica ainda mudanças nos padrões de consumo, com expansão da demanda por carne, frutas, vegetais e por produtos mais elaborados. Como resultado desse processo, o Brasil,

como um dos principais produtores e exportadores de commodities agrícolas, e as regiões que compõem o Cerrado, como principais produtoras nacionais de grãos e carnes, assumem um papel fundamental nessa dinâmica (Santana et al., 2020). Assim, estabelecer políticas públicas que harmonizem o desenvolvimento da atividade econômica com a preservação e a utilização sustentável de recursos naturais apresenta um desafio substancial. A ausência ou a fragilidade na regulamentação acarreta considerável incerteza legal, especialmente à medida que projetos de lei circulam buscando, de forma simplista, proibir a intervenção da vegetação de qualquer forma no bioma. Nesse contexto, a assertiva demarcação de áreas e o desenvolvimento de zoneamentos direcionados para a preservação regionalizada emergem como alternativas mais eficazes para discernir entre as áreas adequadas para a produção e aquelas que devem ter seu uso limitado ou intocado.

3.2 A proteção constitucional dos biomas brasileiros

A Constituição Federal de 1988 foi a primeira a tratar do meio ambiente, promovendo um grande avanço jurídico ao dedicar um capítulo específico, o VI, ao tema. O texto constitucional estabelece uma harmonia entre os diferentes dispositivos voltados para a defesa do Meio Ambiente e o Desenvolvimento Econômico e Social.

Silva (2006, p. 46) escreveu que “a Constituição de 1988 foi, portanto, a primeira a tratar deliberadamente da questão ambiental”, trazendo mecanismos para sua proteção e controle, sendo tratada por alguns como “Constituição Verde”.

Neste contexto, a fruição do meio ambiente saudável e ecologicamente equilibrado foi erigida em direito fundamental (Antunes, 2021), assegurando tal direito, inclusive às futuras gerações e incumbindo a sua efetividade ao Poder Público e à coletividade (Brasil, 2023, art. 225,

caput). Dessa forma, são objetivos estabelecidos no capítulo VI que trata do meio ambiente na Constituição Federal de 1988, entre outros:

- Preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas.
- Definir, em todas as unidades da Federação, espaços territoriais e seus componentes a serem especialmente protegidos, sendo a alteração e a supressão permitidas somente através de lei, vedada qualquer utilização que comprometa a integridade dos atributos que justifiquem sua proteção.
- Proteger a fauna e a flora, vedadas, na forma da lei, as práticas que coloquem em risco sua função ecológica, provoquem a extinção de espécies ou submetam os animais a crueldade.

No parágrafo 4º do art. 225 (Brasil, 2023), foi dada especial proteção à Floresta Amazônica brasileira, à Mata Atlântica, à Serra do Mar, ao Pantanal Mato-Grossense e à Zona Costeira, definidos como patrimônio nacional. Dessa forma, a sua utilização far-se-á, na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.

Não obstante o destaque como segundo maior bioma do Brasil e contar com uma tímida proteção na legislação brasileira, o Cerrado ainda não conta com uma lei específica que congregue de forma clara medidas que promovam o desenvolvimento econômico com a devida preservação ambiental.

É fundamental para a preservação dos biomas brasileiros que se implementem medidas específicas de proteção para cada um deles, dada a ameaça imposta por fatores como o consumo excessivo, contaminação dos recursos hídricos, desmatamento ilegal e exploração desenfreada de recursos naturais. Essas condutas têm causado danos significativos aos biomas e representam uma preocupação global.

Por seu turno, o potencial brasileiro em preservação ambiental e biodiversidade também é evidente. Contudo, para que o Brasil con-

tinua crescendo de maneira sustentável, é crucial estabelecer segurança jurídica que permita o desenvolvimento econômico de forma sustentável. Nada seria mais justo do que regulamentar, por meio de uma norma única alinhada ao ordenamento legal atual, a utilização e conservação do Cerrado.

Embora haja várias legislações em nível federal e estadual visando tutelar os bens presentes neste bioma, sua proteção legal é esparsa e abrangente, o que oportuniza o risco de degradação ambiental e eventual extinção da biodiversidade ali presente no bioma. Diversos projetos de lei estão em andamento para intensificar a defesa, conservação e restauração da vegetação nativa do Cerrado.

Mesmo que outros regulamentos não abordem diretamente o Cerrado, eles expressam preocupação quanto ao uso sustentável de suas áreas. Um exemplo é a Política Nacional de Recursos Hídricos, que estabelece a necessidade de desenvolver Planos de Recursos Hídricos adaptados às diferentes bacias hidrográficas, com o intuito de adequá-los às exigências ambientais locais.

Entretanto, desafios persistem nesse contexto, uma vez que, ao analisar situações específicas, nota-se a limitação dessas abordagens setorializadas na formulação de políticas ambientais de acordo com as bacias hidrográficas.

3.3 Cerrado Brasileiro

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul e é considerado um hotspot mundial da biodiversidade, devido ao elevado número de espécies endêmicas que abriga. Compreende quase a totalidade do estado de Goiás e a totalidade do Distrito Federal, e abrange porções consideráveis de Tocantins, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Maranhão e Piauí. Outros fragmentos estão nos estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima, totalizando 11 estados e o Distrito Federal (Ribeiro; Walter, 2008).

O Cerrado comporta a nascente das três maiores bacias dessa parte do continente (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata). Em razão da abundância de água, o Cerrado é conhecido como "a grande caixa d'água do Brasil", ao mesmo tempo que representa nosso maior potencial agrícola e pecuário. E mesmo com tamanha relevância, esse bioma possui a menor porcentagem de áreas sob proteção integral. (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

Com relação às chuvas no bioma, Lima e Silva (2007) apontam uma característica inerente ao Cerrado que influencia diretamente na produção agrícola do país. A forte sazonalidade observada em sua distribuição temporal, ou seja, um período chuvoso – de setembro/outubro até abril/março – e um período seco no restante do ano com baixa incidência de chuvas. A deficiência hídrica do Cerrado evidencia a importância da prática da irrigação para a estabilização da produção agrícola nas regiões com maior incidência de seca.

Para Rodrigues (2019), a savana, popularmente conhecida como Cerrado, apresenta fitofisionomia ecológica com presença de gramíneas, arbustos e árvores espaçadas, marcadas pelos caules retorcidos e raízes bem longas que permitem a absorção de água. Sendo um bioma terrestre, pode ser encontrado em diferentes continentes, apresentando variações de fauna e flora, como é o caso da savana tanto na África quanto na Ásia, além do Brasil (Cerrado).

No Brasil, o Cerrado é composto por um mosaico de fitofisionomias, que vão desde formações campestres (campos rupestres), formações savânicas arbóreo-arbustivas (cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo) até formações florestais (matas de galeria, matas ciliares, cerradões, florestas estacionais decíduais e semidecíduais), formando gradientes florestais distintos com uma considerável heterogeneidade ambiental e que abrigam uma grande diversidade (Ribeiro; Walter, 2008).

A grande diversidade de espécies de animais e plantas do Cerrado está associada à relevante diversidade de ambientes. Enquanto a estratificação vertical (existência de várias 'camadas' de ambientes) da

Amazônia ou da Mata Atlântica proporciona oportunidades diversas para o estabelecimento das espécies, no Cerrado, a heterogeneidade espacial (a variação dos ecossistemas ao longo do espaço) seria um fator determinante para a ocorrência de um variado número de espécies. Os ambientes do Cerrado variam significativamente no sentido horizontal, sendo que áreas campestres, capões de mata, florestas e áreas brejosas podem existir em uma mesma região (Machado et al., 2004).

O papel da agricultura, da pecuária e suas cadeias produtivas na economia e no desenvolvimento social do país é indiscutível. O Cerrado, nesse contexto, se tornou um ambiente propício para o desenvolvimento da agropecuária em razão de sua vasta extensão territorial; suas características naturais distintas, com destaque para a expressiva incidência de recursos hídricos e a topografia predominantemente plana que possibilita a adoção de maquinário na atividade agrícola, somado à vegetação rasteira ligada ao bioma de formações savânicas mais abertas.

3.4 Cerrado: legislação federal de natureza geral

Atualmente, a proteção da vegetação nativa no Brasil é regulamentada pela Lei Federal nº 12.651/2012 (Código Florestal). Rodrigues (2019) afirma que a norma é, na verdade, um repositório de regras que estabelecem limites ao uso econômico da terra. Segundo a norma, a vegetação nativa no bioma Cerrado deve ser mantida, a título de Reserva Legal da área total do imóvel rural, em 20% quando localizado fora da Amazônia Legal e em 35% dentro da Amazônia Legal.

Bem antes do atual código, tivemos em 1934 o primeiro código florestal brasileiro, instituído pelo Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. Tinha como principal objetivo estabelecer instruções para exploração florestal e abertura de áreas para o processo produtivo, desde que reservado um percentual mínimo de 25% de floresta (um quarto).

Posteriormente, o diploma legal de 1934 foi revogado integralmente em 15 de setembro de 1965, com a sanção da Lei nº 4.771, permanecendo vigente até 12 de maio de 2012. Inicialmente, trouxe o escopo de preservação ambiental das florestas que, com as alterações legislativas posteriores, resultou nos institutos da Reserva Florestal Legal e nas Áreas de Preservação Permanente.

Uma das importantes alterações promovidas no texto de 1965 ocorreu em 1989, quando foi sancionada a Lei nº 7.803, aumentando o tamanho das faixas marginais ao longo dos rios, as quais não deveriam ser ocupadas, e a necessidade da averbação da Reserva Legal às margens da matrícula do imóvel.

Ainda em 31 de agosto de 1981, foi instituída a primeira legislação ambiental brasileira – Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81), que, em seu artigo 9º, estabelece os instrumentos de política ambiental, sendo: padrões de qualidade ambiental, zoneamento ambiental, avaliação dos impactos ambientais, licenciamento ambiental, incentivos às tecnologias voltadas para a proteção do meio ambiente, criação de espaços territoriais protegidos, sistema nacional de informações ambientais, cadastro técnico federal, penalidades disciplinares e compensatórias, concessão florestal e servidão florestal. Também é importante mencionar a Lei nº 9.985/00, que estabeleceu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação, e a Lei nº 9.605/98, que trata dos crimes e infrações contra a flora, que são, na verdade, microssistemas de proteção da vegetação nativa brasileira.

Além de mecanismos de proteção, existem também disposições normativas que tratam da reposição da vegetação nativa do Cerrado, dentre as quais podemos citar a Instrução Normativa MMA nº 06/2006 (Brasil, 2006), que é o dispositivo mais específico no que tange à reposição florestal da vegetação nativa do Cerrado decorrente de supressão, conforme descrito no art. 9º.

Art. 9º O detentor da autorização de supressão de vegetação natural cumprirá a reposição florestal por meio da apresentação de créditos de reposição florestal, considerando os seguintes volumes: I - para Floresta Amazônica: a) madeira para processamento industrial, em tora: 40 m³ por

hectare; b) madeira para energia ou carvão, lenha: 60 m³ por hectare; II - para Cerrado: 40 m³ por hectare; (grifo nosso) III - para Caatinga e outros biomas: 20 m³ por hectare. § 1º Os volumes especificados no caput deste artigo poderão ser reduzidos, mediante apresentação de inventário florestal, que justifique essa alteração. § 2º O detentor da autorização de supressão de vegetação natural cumprirá a reposição florestal ou destinará a matéria-prima florestal extraída para o consumo até o prazo final da vigência da autorização de supressão de vegetação. (Brasil, 2006).

Isto é, o detentor da autorização para supressão vegetal no Cerrado deverá apresentar um Plano de reposição florestal que contemple o plantio de espécies arbóreas para que quando maduras, resultem num volume de 40 m³ por hectare, ou menos, conforme apresentado no inventário florestal correspondente.

Outros atos legislativos, apesar de não guardarem relação direta com a proteção da flora, se conectam diretamente à proteção que se busca oferecer, como é o caso da Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.477 de 24 de julho de 1997. Isso ocorre porque a proteção jurídica das águas e das florestas, bem como a equalização do uso da terra de forma geral, constituem algumas das medidas imprescindíveis para se pensar em um futuro sustentável para os biomas brasileiros.

O Decreto de 20 de agosto de 2003 definiu o dia 11 de setembro como o Dia do Cerrado, instituído para conscientizar sobre a importância da conservação do bioma.

A Lei Federal nº 12.651/2012 – Código Florestal – trata da compensação da vegetação nativa em casos de supressão vegetal, determinando os requisitos mínimos para conceder a supressão, bem como os critérios básicos para reposição florestal, incluindo medidas mitigatórias e compensatórias no caso de impactos a espécies ameaçadas, as quais são elencadas nos artigos 26, 27 e 33 da mencionada lei.

O Decreto Federal nº 7.830/2012, que trata do Sistema de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) e dos Programas de Regularização Ambiental (PRAs), e o Decreto Federal nº 8.235/2014, o qual trata de normas complementares dos PRAs e cria o Programa Mais Ambiente Brasil, apesar

de importantes instrumentos, não normatizam procedimentos específicos para supressão, preservação e compensação da vegetação nativa do Cerrado.

Vale ainda relembrar que em 2005, dada a relevância do Cerrado para a ecologia do Brasil, foi instituído por meio do Decreto nº 5.577 de 8 de novembro, o Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Bioma Cerrado - Programa Cerrado Sustentável, com a finalidade de promover a conservação, a restauração, a recuperação e o manejo sustentável de ecossistemas do Bioma Cerrado, bem como a valorização e o reconhecimento de suas populações tradicionais. No âmbito desse programa, importantes propostas foram apresentadas, entre as quais a revisão de políticas e instrumentos legais que produzissem limitações e restrições para a conservação da biodiversidade e gestão de recursos hídricos. O referido Decreto foi revogado pelo Decreto nº 10.473, de 24 de agosto de 2020, em atenção ao disposto no art. 14 da Lei Complementar nº 95, de 26 de fevereiro de 1998, que determina aos órgãos diretamente subordinados à Presidência da República e os Ministérios, assim como as entidades da administração indireta, adotar, em prazo estabelecido em decreto, as providências necessárias para, observado, no que couber, o procedimento a que se refere o art. 14, ser efetuada a triagem, o exame e a consolidação dos decretos de conteúdo normativo e geral e demais atos normativos inferiores em vigor, vinculados às respectivas áreas de competência, remetendo os textos consolidados à Presidência da República, que os examinará e reunirá em coletâneas, para posterior publicação. Desde então, não houve a publicação de outro programa no mesmo sentido.

Temos, portanto, que o Cerrado não se encontra totalmente desprotegido do ponto de vista normativo, apesar de não constar no rol de biomas considerados como patrimônio nacional. Contudo, evidencia-se a urgência de políticas públicas claras que estabeleçam limites de uso e mecanismos de proteção do bioma.

3.5 Proteção do Cerrado nos estados

3.5.1 Distrito Federal

O Distrito Federal é totalmente ocupado pelo Cerrado. Estão vigentes os seguintes atos normativos de proteção do Bioma:

- Lei nº 742, de 28 de julho de 1994, que define os limites, funções e o sistema de gestão da Reserva da Biosfera do Cerrado no Distrito Federal e dá outras providências.
- Lei nº 3.031, de 18 de julho de 2022, que instituiu a Política Florestal do Distrito Federal e reconheceu como Patrimônio Natural do Distrito Federal o Bioma Cerrado, cujos integrantes são bens de toda a comunidade local.
- Lei nº 6.364, de 26 de agosto de 2019, alterada pela Lei nº 6.520, de 17 de março de 2020, que dispõe sobre a utilização e a proteção da vegetação nativa do Bioma Cerrado no Distrito Federal e dá outras providências. De acordo com esta lei, a conservação, proteção, recuperação e uso sustentável da vegetação nativa do Bioma Cerrado, como disposto na legislação vigente, visam promover o desenvolvimento sustentável do Distrito Federal, bem como:
 - Garantir a manutenção dos remanescentes de vegetação nativa.
 - Impulsionar a restauração de áreas degradadas.
 - Preservar a integridade dos mananciais hídricos e a qualidade da conservação do solo, além de outros benefícios ambientais essenciais.
 - Fomentar a preservação e o uso sustentável da diversidade biológica, assim como a defesa dos ecossistemas do Bioma Cerrado, realçando sua relevância social, ecológica e econômica.

- Adaptar os métodos de produção segundo critérios de sustentabilidade ecológica e social.
- Reforçar o apoio técnico às comunidades tradicionais e aos agricultores familiares do Cerrado.
- Ampliar a participação da sociedade na administração ambiental do Bioma e estimular políticas públicas para o uso sustentável dos recursos naturais do Cerrado.
- Estimular a adoção de sistemas de pagamento por serviços ambientais.

Para alcançar esses objetivos, o poder público deve promover a gestão integrada da biodiversidade, dos recursos hídricos e do solo, e o disciplinamento da ocupação rural e urbana, de forma a harmonizar o crescimento socioeconômico com a manutenção do equilíbrio ecológico.

Os Decretos nº 33.537/12, 37.549/16, 37.931/16 e 39.469/18 tratam da proteção ambiental no Distrito Federal de forma mais abrangente, o que indiretamente cria regras de proteção ao Bioma.

3.5.2 Goiás

O estado de Goiás conta com uma área de 98% de seu território ocupada pelo Cerrado. Atualmente, estão vigentes os seguintes atos normativos de proteção do bioma:

- Lei nº 14.247, de 29 de julho de 2002, que institui o Sistema Estadual de Unidades de Conservação no Estado de Goiás e dá outras providências.
- Lei nº 18.104, de 18 de julho de 2013, alterada pela Lei nº 22.017, de 14 de junho de 2023, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e institui a nova Política Florestal do Estado de Goiás. Reconhece, no art. 80, como Patrimônio Natural do Estado de Goiás o Bioma Cerrado.

- Decreto nº 9.130, de 29 de dezembro de 2017, que dispõe sobre o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PEPS). Dentre outros objetivos, o PEPS visa estimular a pesquisa, disseminar o conhecimento e promover a sensibilização da população goiana sobre a importância da conservação da biodiversidade no estado, especialmente em relação ao bioma Cerrado, e sobre os impactos e as consequências do aquecimento global, do desmatamento e da degradação ambiental, por meio de ações relacionadas à educação ambiental.

3.5.3 Mato Grosso

O bioma Cerrado ocupa cerca de 37% do território do estado e é classificado como ecossistema pela Lei nº 7.868, de 20 de dezembro de 2002 (art. 3º, II).

A Lei Complementar nº 38, de 21 de novembro de 1995, dispõe sobre o código estadual do meio ambiente, reiterando a proteção do bioma no estado. Prevê, em seu art. 14, que a legislação que definir o zoneamento ambiental do estado de Mato Grosso estabelecerá incentivos à utilização dos recursos naturais, de conformidade com a vocação e as potencialidades definidas para cada região, desaconselhando-se as demais.

3.5.4 Mato Grosso do Sul

O Cerrado ocupa cerca de 62% do território do Mato Grosso do Sul. Entre a sua legislação destacam-se:

- A Lei nº 4.555, de 2014, que instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), tratando sobre princípios, objetivos e instrumentos da PEMC, e define o conceito de bioma Cerrado, sendo uma de suas diretrizes, previstas no art. 6º, IV.
- A Lei nº 5.237, de 17 de julho de 2018, que cria o complexo dos poderes e estabelece no art. 5º normas gerais para preservação,

defendendo a mata nativa do Cerrado das diversas ameaças à sua biodiversidade e às espécies da flora e da fauna associadas.

- A Lei nº 5.235, de 16 de julho de 2018, que dispõe sobre a Política Estadual de Preservação dos Serviços Ambientais, cria o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PESA) e estabelece um Sistema de Gestão deste Programa que tem por objetivo, dentre outros, reduzir o desmatamento do Bioma Cerrado.

3.5.5 Minas Gerais

O cerrado ocupa a porção centro-ocidental do estado com cerca de 54% da extensão territorial. Além da Lei nº 20.922/13, que dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no estado, é vigente a Lei nº 13.047, de 17 de dezembro de 1998, que dispõe sobre o uso racional do cerrado nativo ou em estágio secundário de regeneração. Esta lei prevê que, respeitadas as áreas de preservação permanente e a Reserva Legal, a exploração de área de cerrado superior a cem hectares, para uso alternativo do solo na agricultura, fica condicionada à aprovação de plano de desmatamento e projeto específico nos quais seja prevista a preservação de no mínimo 2% de vegetação nativa de cerrado.

3.5.6 Tocantins

O Tocantins tem 91% de seu território coberto pelo bioma Cerrado. Conta com a seguinte legislação tratando desse bioma:

- A Lei nº 771 de 07 de julho de 1995, dispõe sobre a Política Florestal do estado.
- Lei nº 1.917 de 17 de abril de 2008, que institui a Política Estadual sobre Mudanças Climáticas, Conservação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Tocantins, e adota outras providências. A norma traz em seu art. 1º, § único, I, o reconhecimento da importância da conservação do cerrado diante das atividades antrópicas que provocam efeitos nocivos da mudança global do clima e os compromissos fundamentais do estado do Tocantins

com o desenvolvimento sustentável da economia, do meio ambiente, da tecnologia e da qualidade de vida das presentes e futuras gerações.

3.5.7 Piauí

Ocupando cerca de 52% do território pelo bioma Cerrado, a legislação do Piauí cuidou de dar uma proteção maior ao Cerrado ao prever que além dos 20% da Lei Federal relativos à reserva legal, outros 10% sejam preservados a título de compensação prevista na legislação estadual, por meio da Lei nº 7.193 de 8 de abril de 2019, que trata sobre a modalidades de reposição florestal no estado.

3.5.8 Bahia

Apenas 18% do território é coberto pelo Cerrado. Entre a legislação que trata de políticas florestais, a Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006 (Bahia, 2006), dispõe sobre a Política de Meio Ambiente e Proteção à Biodiversidade do estado da Bahia e dá outras providências. Dentre seus objetivos, compatibilizar o desenvolvimento socioeconômico com a garantia da qualidade de vida das pessoas, do meio ambiente, do equilíbrio ecológico e da proteção do sistema climático. A norma traz ainda o zoneamento territorial ambiental como instrumento da mencionada Política que visa à implementação de Planos de desenvolvimento regional e estadual, com utilização racional dos recursos ambientais, valorizando as florestas nativas de modo a garantir sua preservação e conservação.

O Decreto nº 14.024, de 6 de junho de 2012, regulamenta a Lei nº 10.431/06, e o Decreto nº 15.180, de 2 de junho de 2014, regulamentou a gestão das florestas e das demais formas de vegetação do estado da Bahia, a conservação da vegetação nativa, o Cadastro Estadual Florestal de Imóveis Rurais (Cefir), e dispõe acerca do Programa de Regularização Ambiental dos Imóveis Rurais do estado da Bahia e dá outras providências. Segundo o Decreto, as florestas e as demais for-

mas de vegetação existentes no território baiano são bens de interesse comum a todos os habitantes, exercendo-se o direito de propriedade com as limitações estabelecidas pela legislação.

3.5.9 São Paulo

O Cerrado abrange cerca de 18% do território. Em 1967, foi publicado o Decreto nº 49.141 (São Paulo, 1967), que tratava da exploração e uso de cerradões, cerrados e campos sujos do estado, sendo revogado somente em 12 de fevereiro de 2009 pelo Decreto nº 54.013.

Posteriormente, foi publicada a Lei nº 13.550, de 02 de junho de 2009, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma cerrado no estado. Esta lei trata sobre a conservação, proteção, regeneração e utilização do Bioma.

3.5.10 Maranhão

O Cerrado ocupa cerca de 65% do território maranhense. O estado possui um importante instrumento de gestão do bioma, a Lei nº 11.734, de 26 de maio de 2022 que instituiu o Zoneamento Ecológico-Econômico do Bioma Cerrado e Sistema Costeiro do estado do Maranhão (ZEE-MA), e dá outras providências. O ZEE-MA é um instrumento de planejamento estratégico de ordenamento geográfico e gestão territorial do recorte espacial definido por esta lei, composto por diretrizes e critérios ecológicos e agroecológicos, jurídico-institucionais e socioeconômicos, a serem levados em conta na formulação de políticas públicas, dentre outras, para o desenvolvimento socioeconômico sustentável.

3.5.11 Pará

A cobertura do bioma Cerrado abrange apenas 0,7% do território. Diversos atos normativos (leis e decretos) tratam do licenciamento de atividades florestais, entre as quais destaca-se a Lei nº 6.462, de 4 de julho de 2002 que dispõe sobre a Política Estadual de Florestas e de-

mais formas de vegetação e dá outras providências, que tem por princípios, entre outros, o reconhecimento de que a flora natural do estado é bem de uso comum do povo, respeitadas as limitações de direito de propriedade além da preservação, conservação e uso sustentável dos recursos da biodiversidade.

3.6 Projetos de lei em tramitação que visam maior proteção do Cerrado

3.6.1 Proposta de emenda à Constituição Federal

Há muito tempo tramita a Proposta de Emenda Constitucional PEC 504/10, de autoria do senador Demóstenes Torres (GO), que tem por objeto alterar o § 4º do art. 225 da Constituição Federal, para incluir o Cerrado e a Caatinga entre os biomas considerados como patrimônio nacional. Até então, passado o texto por várias comissões, sem previsão de votação e aprovação, não há a efetiva proteção do Bioma, já que é mera expectativa, pois não há previsão de promulgação pelos parlamentares.

3.6.2 Projeto de lei no Senado Federal

O Projeto de Lei nº 5.462 de 2019, de iniciativa do Senador Jaques Wagner (BA), busca criar uma Política de Desenvolvimento Sustentável do Cerrado (PDSC), o segundo maior bioma da América do Sul, mediante ações de proteção e uso dos recursos ambientais.

Este projeto de lei traz definições sobre as diferentes fitofisionomias do cerrado e estabelece que os limites do Bioma seriam fixados no mapa de vegetação do Brasil elaborado pelo IBGE, considerando diferentes estágios sucessionais de regeneração das fisionomias que o integram.

Entre os fundamentos da Política de Desenvolvimento Sustentável do Cerrado, o projeto de lei prevê a compatibilização das atividades produtivas com a proteção do meio ambiente e a promoção da justiça social. Além disso, destaca a importância da recuperação ambiental ou aproveitamento econômico das áreas degradadas para minimizar a ocupação de áreas com vegetação nativa e a proteção dos corpos d'água e das áreas de recarga hídrica como meio de preservar a contribuição do Cerrado para a disponibilidade de água no País.

As diretrizes da PDSC incluem a valorização dos produtos do Cerrado, a recuperação dos passivos ambientais e sociais, a adoção de práticas e sistemas de produção sustentáveis, entre outras. Já os objetivos visam promover o desenvolvimento sustentável no Bioma, garantir a conservação e o uso sustentável da biodiversidade, promover a preservação das nascentes e o uso racional dos recursos hídricos, recuperar áreas degradadas, entre outros.

Para a implementação da PDSC, o Projeto de Lei propõe diversos instrumentos, como Planos de ordenamento territorial e zoneamentos agrícola e ecológico-econômico, sistema de monitoramento por satélite do desmatamento, aplicação de tecnologias agropecuárias sustentáveis, Cadastro Ambiental Rural (CAR) e Programas de Regularização Ambiental (PRA), assistência técnica aos produtores rurais, incentivos econômicos às atividades sustentáveis, pesquisa e desenvolvimento científico e tecnológico, Programa de Extrativismo Sustentável do Cerrado e Programa de Ecoturismo do Cerrado, entre outros.

O projeto de lei também estabelece regras para autorizar a supressão de vegetação, levando em conta o estágio de regeneração, e prevê a implantação do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do Cerrado, monitoramento contínuo por satélite da cobertura vegetal do bioma e veda a atividade de carvoejamento no Bioma Cerrado.

O ZEE definiria as zonas de intervenção no bioma para atividades como implantação de infraestrutura econômica, desenvolvimento da agropecuária e produção florestal, conservação da biodiversidade, restauração ecológica e recuperação dos solos degradados.

Em resumo, o projeto de lei busca estabelecer uma abrangente política de desenvolvimento sustentável para o Cerrado, promovendo a proteção ambiental, o uso sustentável dos recursos naturais e o desenvolvimento socioeconômico da região.

E por fim, os projetos de lei nº 1.600/2019 e 4.203/2019, ambos de autoria do senador Jorge Kajuru (GO), que pretendem incluir o Cerrado entre os biomas a serem priorizados com recursos do Fundo Nacional de Meio Ambiente, além de disporem sobre moratório para o desmatamento do Cerrado, suspendendo novas autorizações pelo prazo de 10 anos, exceto para atividades consideradas como utilidade pública, interesse social ou de baixo impacto.

3.6.3 Projeto de lei na Câmara dos Deputados

Tramita na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei nº 2.844/2021, de autoria do deputado federal Sergio Souza (PR), que dispõe sobre diretrizes e ações da união, dos estados, do distrito federal e dos municípios, no que se refere à conservação e ao uso sustentável dos biomas brasileiros, e cria o Fundo Biomas.

O projeto de lei estabelece que em propriedades privadas, a conservação e o uso sustentável serão considerados atendidos quando observadas as regras de proteção contidas na legislação ambiental vigente, notadamente a aplicação da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, inclusive no que se refere aos dispositivos e mecanismos específicos destinados à regularização ambiental de áreas rurais consolidadas, que são aplicáveis indistintamente a todos os biomas brasileiros.

A conservação e uso sustentável dos biomas brasileiros seriam realizadas considerando-se, entre outras, as seguintes diretrizes:

- O desenvolvimento sustentável, no âmbito nacional e em cada região do país, considerando suas características específicas.

- A proteção da biodiversidade, por meio da conservação da vegetação nativa, da restauração ecológica, da prevenção e combate ao desmatamento e aos incêndios florestais ilegais.
- A conservação dos recursos hídricos, em qualidade e quantidade, para garantir a segurança hídrica da população brasileira, inclusive por meio da revitalização de bacias hidrográficas.
- A valorização de condutas que promovam a conservação e recuperação de serviços e demais ativos ambientais prestados pelos ecossistemas, inclusive por meio da desoneração dos custos associados à adoção de medidas de preservação e da remuneração dos provedores de serviços ambientais.
- A conservação dos solos e a adoção de boas práticas agronômicas nas áreas com atividades agrossilvipastoris.
- A recuperação de áreas degradadas e sua incorporação ao processo produtivo, especialmente para a produção de alimentos e energia.
- A pesquisa científica destinada à identificação e aproveitamento das potencialidades e oportunidades do uso sustentável de recursos naturais, inclusive acerca do conhecimento da biodiversidade, a bioprospecção e a manutenção de bancos de germoplasma das espécies nativas.
- A diversificação da economia, de acordo com a vocação de cada região do país, inclusive por meio do fomento a atividades pautadas no uso da biodiversidade, à geração de renda com sustentabilidade e ao fortalecimento da cadeia produtiva das atividades agrossilvipastoris e à segurança alimentar do País.
- A segurança jurídica em relação às normas e parâmetros ambientais que incidam no desenvolvimento de atividades produtivas, notadamente pelo reconhecimento de direitos adquiridos em face de alterações legais, pelo respeito ao direito de propriedade e ao direito de justa e prévia indenização no caso de expropriação

no interesse da coletividade, inclusive no que se refere à criação e implantação de unidades de conservação da natureza.

A conservação de vegetação nativa nos biomas brasileiros, em imóveis urbanos ou rurais, será considerada atividade de interesse público e deverá ser fomentada por ações do poder público, como forma de cumprimento da função social da propriedade e do dever da coletividade com o meio ambiente ecologicamente equilibrado.

O poder público, entre outros mecanismos, buscará:

- A instituição de incentivos creditícios, inclusive por meio de linhas de crédito específicas, com juros menores e limites e prazos maiores, para o desenvolvimento de atividades agrossilvipastoris que incorporem medidas de uso sustentável do solo e dos demais recursos naturais, assim entendida a adoção de boas práticas agrônômicas e o atendimento à legislação ambiental, notadamente o contido na Lei nº 12.651, de 2012.
- O monitoramento sistemático e contínuo do desmatamento ilegal.

O Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) constituirá instrumento de sistematização das ações do Poder Público, em cada ente federativo, destinadas à conservação e ao uso sustentável dos biomas brasileiros.

Já o Projeto de Lei nº 4.669 de 2020, de autoria do deputado Felipe Carreras (PE), propõe medidas mais severas ao alterar o art. 50-A da Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 (Lei de Crimes Ambientais), ao inserir o § 3º e prever que em caso de condenação pelo crime indicado no seu caput, a sentença ensejará na perda, em favor da União, da área desmatada, e enquanto perdurar recursos da referida sentença fica impedida a exploração comercial da terra. Altera também o art. 38-A, nas áreas rurais onde houver uso do fogo em florestas nativas, estas serão objeto de reparação por meio de reflorestamento e convertidas em reserva legal. O projeto abrange todos os biomas, sem restrições,

e se justificou diante do crescente aumento de incêndios florestais registrados em diversos biomas, e em especial no Cerrado brasileiro.

Outro Projeto de Lei em tramitação é o 2.561/2022, de autoria do deputado federal Pinheirinho (MG).

O projeto cria o programa de concessão de crédito bancário à pessoa física ou jurídica para fins de recuperação de áreas degradadas localizadas no bioma Cerrado, com o plantio de flora nativa e a recuperação da cobertura florestal com plantio de espécies florestais nativas do bioma Cerrado, mesmo quando destinado à recomposição de áreas de preservação permanente e de reserva legal, nos termos da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.

O projeto de recuperação de áreas degradadas de que trata a lei deverá ser implementado de acordo com projeto técnico a ser elaborado por profissional legalmente habilitado, com registro de anotação de responsabilidade técnica junto ao órgão de classe e que permita a identificação precisa da área sobre a qual existe processo de recomposição florestal.

O projeto de recuperação deverá ser aprovado e registrado no órgão ambiental competente e ainda deverá ser elaborado gratuitamente pelo poder público para os proprietários que explorem imóvel rural em regime de economia familiar.

Os juros e demais encargos incidentes sobre as operações de crédito rural, contratadas com recursos considerados como crédito rural, que se destinarem aos imóveis rurais que apresentem projetos de recuperação da cobertura florestal deverão sofrer um desconto proporcional entre a área do projeto e a área total do mesmo imóvel. O desconto previsto variará entre 5 a 20% do total capitalizado, de acordo com a documentação apresentada pelo concessionário e após análise da instituição concedente.

Mais recentemente, foi apresentado o Projeto de Lei nº 2.258/2023, que institui o "desmatamento zero", com a finalidade de conter a supressão de vegetação em todo território nacional. O projeto de lei tem

autoria dos deputados federais Amom Mandel (AM), Flávia Morais (GO), Tabata Amaral (SP) e outros.

O projeto pretende conter a supressão de vegetação nativa em todo o território, por um período de 4 anos, excetuada:

- A supressão de vegetação necessária para a implantação de empreendimento ou atividade de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, nos termos dos incisos VIII a X do art. 3º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.
- A exploração realizada mediante Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) aprovado pelo órgão competente do Sisnama, nos termos do art. 31 da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.
- A supressão de vegetação necessária ao desenvolvimento de atividades agrossilvipastoris em pequena propriedade rural ou posse rural familiar, nos termos do art. 3º da Lei nº 11.326, de 24 julho de 2006.

Decorrido o prazo de 4 anos, poderia ser autorizada a supressão de vegetação nativa nas porções do território nacional que tiverem Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) elaborado nos termos do inciso II do art. 9º da Lei nº 6.938, de 1981, aprovado pela Assembleia Legislativa Estadual ou Câmara Legislativa do Distrito Federal e reconhecido pela União.

3.6.4 Projeto de lei estadual

No Distrito Federal, tramita o Projeto de Lei nº 2.147/2021, que pretende instituir a campanha permanente “cerrado preservado”. Considerando que o Cerrado é o bioma predominante e que sofre com queimadas durante o período de estiagem, a campanha visa intervir neste cenário, conscientizando a população sobre atitudes positivas e negativas a serem tomadas nos períodos mais secos do ano.

No estado de Mato Grosso, o Projeto de Lei nº 446/2020 regulamenta parcialmente o art. 273 da Constituição Estadual e dá outras pro-

vidências. Em consonância com a Constituição Estadual, o projeto dá prioridade à proteção ambiental do Cerrado. Nesse sentido, veda a supressão da vegetação em qualquer das fisionomias quando abranger espécies da flora e da fauna silvestre ameaçadas de extinção, ou exercer função de proteção de mananciais e recarga de aquíferos, ou ainda estiver situada em áreas prioritárias para conservação, preservação e criação de unidades de conservação. Para supressão de vegetação no estágio inicial de regeneração para as fisionomias cerradão, cerrado stricto sensu, campo cerrado ou campo, além da prévia autorização do órgão competente, medidas de mitigação e compensação deverão ser definidas nos processos de licenciamento ambiental, condicionadas ainda à comprovação da inexistência de ocupação irregular das áreas de preservação permanente e existência de reserva legal na propriedade. Prevê ainda que proprietários que se empenharem em proteger e recuperar áreas pertencentes ao bioma poderão ser beneficiados com incentivos fiscais e linhas especiais de crédito oficiais.

Já o Projeto de Lei nº 847/2021 pretende instituir a política estadual para o manejo sustentável, plantio, extração, consumo, comercialização e transformação dos frutos e produtos nativos do cerrado mato-grossense. Entre outras finalidades, o projeto visa identificar as áreas de incidência de comunidades tradicionais que vivam ou sobrevivam da coleta de produtos nativos do bioma, assegurando mecanismos de utilização pelas comunidades tradicionais organizadas em cooperativas ou associações. O projeto proíbe a supressão de áreas em expansão da atividade agrícola sem apresentação prévia do inventário da biodiversidade local com descrição do potencial produtivo de frutos para uso sustentável e econômico através do extrativismo. O projeto se justifica na necessidade de proteção ao meio ambiente, tendo em vista que no Cerrado tem ocorrido aumento do desmatamento para ampliação da atividade agropastoril.

Em Minas Gerais, tramita o Projeto de Lei nº 4.004/2022, que dispõe sobre a conservação, a proteção, a regeneração, a utilização da vegetação nativa do Cerrado e institui a política estadual de desenvolvi-

mento sustentável do Cerrado e dos ecossistemas, da flora e da fauna associados, e dá outras providências.

O bioma Cerrado abrangerá a unidade biótica delimitada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), formada predominantemente por vegetações savânicas da América do Sul, incluindo as fitofisionomias identificadas como cerradão, cerrado stricto sensu, campo cerrado, campo sujo, campo limpo, campo úmido, campo rupestre, campos de murundus, mata galeria, vereda e disjunções de floresta estacional decidual e semidecidual, bem como os ecossistemas, a flora e a fauna a elas associados.

A Política Estadual de Desenvolvimento Sustentável do Cerrado terá como fundamentos:

- O desenvolvimento sustentável como mecanismo de compatibilização das atividades produtivas com a proteção do meio ambiente e a promoção da justiça social.
- A interdependência entre a condução das atividades econômicas, a proteção ambiental e a manutenção da cultura dos povos do Cerrado.
- A necessidade de consolidação de uma visão regional compartilhada sobre as potencialidades e oportunidades, bem como sobre os problemas e soluções existentes no Cerrado.
- O planejamento regional baseado em visão compartilhada sobre a realidade do bioma.
- A recuperação ambiental ou aproveitamento econômico das áreas degradadas, como forma de minimizar a ocupação de áreas com vegetação nativa.
- A proteção dos corpos d'água e das áreas de recarga hídrica como meio de preservar a contribuição do Cerrado para a disponibilidade de água no estado.

- A atuação articulada com a União e os municípios na formulação e implementação de políticas públicas voltadas para a promoção do desenvolvimento sustentável no Cerrado.

Serão instrumento de implantação da mencionada política:

- Os planos de ordenamento territorial e os zoneamentos agrícola e ecológico-econômico.
- O mapeamento dos remanescentes de vegetação nativa do bioma.
- A identificação de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade.
- O sistema de monitoramento por satélite do desmatamento.
- A avaliação ambiental estratégica de políticas, planos e programas setoriais de desenvolvimento socioeconômico.
- A aplicação de tecnologias agropecuárias sustentáveis.
- A assistência técnica aos produtores rurais, especialmente aos agricultores familiares e às populações tradicionais.
- A capacitação de agricultores e trabalhadores rurais na conservação e uso sustentável da biodiversidade e dos recursos hídricos.
- Incentivos econômicos às atividades sustentáveis, como incentivos fiscais, linhas de crédito especiais e pagamento por serviços ambientais, entre outros.

O projeto prevê que o corte e supressão do cerrado ficam vedados quando:

- Abrigar espécies da flora e da fauna silvestres ameaçadas de extinção, conforme lista oficial de espécies ameaçadas de extinção.
- Exercer a função de proteção de mananciais ou de prevenção e controle de erosão.
- Formar corredores entre remanescentes que abrigam fauna ou flora criticamente ameaçados de extinção.

- Estiver localizada em zona de amortecimento de unidades de conservação (UC) de proteção integral e apresentar função protetora da biota da área protegida, conforme definido em plano de manejo.
- Possuir excepcional valor paisagístico, reconhecido pelos órgãos ambientais competentes.
- Estiver situada em áreas prioritárias para conservação, preservação e criação de unidades de conservação determinadas por estudos científicos oficiais ou delimitadas em atos do poder público.
- O proprietário ou posseiro não cumprir dispositivos da legislação ambiental.

Assim como no projeto de lei de âmbito federal, traz critérios diferenciados para supressão conforme estágio de regeneração e das medidas compensatórias (duas vezes a área suprimida) e proíbe supressão em campo úmido, covaal e vereda que somente será autorizada a supressão em caso de interesse social ou atividade de utilidade pública declarada por ato do chefe do poder executivo.

Diz ainda que o poder público deverá concluir o zoneamento ecológico econômico do Cerrado (ZEE Cerrado) e implantar o monitoramento contínuo por satélite da cobertura vegetal do bioma.

3.7 Considerações finais

O Cerrado, um rico bioma do Brasil repleto de biodiversidade e que abriga uma extensão expressiva de recursos hídricos, é fundamental para a produção agrícola do País, enfrentando riscos consideráveis. A negligência na implementação de normas e procedimentos de sua proteção e estratégias regenerativas, bem como a carência de políticas públicas delineadas para sua utilização, podem desencadear a perda de sua biodiversidade. Esse cenário não somente afeta a flora, a fauna e os recursos hídricos, mas também coloca em perigo as co-

munidades residentes na área do bioma, particularmente devido à sua condição vital como berço hídrico, essencial tanto para a subsistência humana quanto para a sustentação da produção agropecuária.

A proteção do Cerrado e o desenvolvimento sustentável emergem como necessidades urgentes. Embora haja projetos de lei em tramitação por anos, a demora em sua análise e aprovação infringe prejuízos substanciais à coletividade, propagando uma significativa incerteza jurídica. A ausência de diretrizes federais faz com que os estados promulguem suas próprias regulamentações, deixando empreendedores à mercê de regulamentações cada vez mais restritivas e desproporcionais, capazes, inclusive, de suprimir o uso da propriedade.

As políticas públicas destinadas à preservação, manutenção e exploração do Cerrado devem priorizar suas peculiaridades regionais, adotando critérios baseados, por exemplo, nas bacias hidrográficas, em vez de limitarem-se aos contornos estaduais. Adicionalmente, é essencial fomentar o uso consciente do Cerrado, em conformidade com a legislação ambiental, incentivando a recuperação de áreas degradadas por meio de incentivos, a exemplo dos créditos concedidos. Por fim, é importante entender as características bióticas e abióticas das áreas que compõem esse bioma para, a partir desse entendimento, delimitar quais áreas necessitam de maior grau de proteção, assegurando a segurança do bem ambiental ali presente.

Resta claro que a convergência entre produção e conservação do bioma é imperativa. O Cerrado possui uma importância histórica, social e ambiental para a agricultura e a pecuária do Brasil, setores que desempenham um papel significativo na composição do nosso Produto Interno Bruto.

3.8 Referências

ANTUNES, P. de B. **Direito ambiental**. 22 ed. São Paulo: Atlas, 2021. p. 57.

BAHIA. Decreto nº 15.180, de 02 de junho de 2014. Regulamenta a gestão das florestas e das demais formas de vegetação do Estado da Bahia, a

conservação da vegetação nativa, o Cadastro Estadual Florestal de Imóveis Rurais - CEFIR, e dispõe acerca do Programa de Regularização Ambiental dos Imóveis Rurais do Estado da Bahia e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado da Bahia**, 3 jun. 2014. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=270968>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BAHIA. Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia e dá outras providências. **Seia: Sistema Estadual de Informações Ambientais e Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/legislacao-ambiental/leis/lei-n-10431#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20de,Bahia%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Câmara. **Projeto de Lei nº 2.561, de 2022**. Cria o programa de concessão de crédito bancário à pessoa física ou jurídica para fins de recuperação de áreas degradadas localizadas no bioma Cerrado, com o plantio de flora nativa. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2335289>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Câmara. **Projeto de Lei nº 2.844, de 2021**. Dispõe sobre diretrizes e ações da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, no que se refere à conservação e ao uso sustentável dos Biomas brasileiros, e cria o Fundo Biomas. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2294380>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Câmara. **Projeto de Lei nº 4.669, de 2020**. Altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e a Lei 12.651 de 25 de maio de 2012, para determinar a perda da terra desmatada e estabelecer que áreas rurais com floresta nativa submetidas a queimadas ilegais serão convertidas em reserva legal. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2263115>. Acesso em: 14 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Senado. **Projeto de Lei nº 1.600, de 2019**. Altera a redação do § 2º do art. 5º da Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional de Meio Ambiente e dá outras providências, para incluir como prioritárias as aplicações de recursos financeiros no Cerrado. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/135818>. Acesso em: 14 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Senado. **Projeto de Lei nº 4.203, de 2019**. Dispõe sobre moratória para o desmatamento no Cerrado. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/137850>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Congresso. Senado. **Projeto de Lei nº 5.462, de 2019**. Dispõe sobre a conservação, a proteção, a regeneração, a utilização e proteção da vegetação

nativa e a Política de Desenvolvimento Sustentável do Bioma Cerrado e dos ecossistemas, da flora e da fauna associados. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvl>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Constituição (1988). **Emendas Constitucionais de Revisão**. Brasília, DF: Presidência da República, [2023]. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvb>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Câmara. **Projeto de Lei nº 2.258, de 2023**. Institui o “Desmatamento Zero”, com a finalidade de conter a supressão de vegetação em todo território nacional. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvl>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Câmara. **Proposta de Emenda à Constituição nº 504, de 2010**. Altera o § 4º do art. 225 da Constituição Federal, para incluir o Cerrado e a Caatinga entre os biomas considerados patrimônio nacional. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2010. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/483817>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. Aprova o Código florestal que com este baixa. **Diário Oficial da União**, 9 de fevereiro de 1934. Seção 1, p. 2882. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvw>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Decreto nº 557, de 8 de novembro de 2005. Institui, no âmbito do Ministério do Meio Ambiente, o Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Bioma Cerrado - Programa Cerrado Sustentável, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 09 de novembro de 2005, p. 7. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvi>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 18 outubro de 2012, Seção 1, p. 5. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvh>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Decreto nº 8.235, de 5 de maio de 2014. Estabelece normas gerais complementares aos Programas de Regularização Ambiental dos Estados e do Distrito Federal, de que trata o Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012, institui o Programa Mais Ambiente Brasil, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Seção 1, 06 de maio de 2014. Seção 1, p.1. Edição extra. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvv>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras

providências. **Diário Oficial da União**, 28 de maio de 2012. Seção 1, p. 16 (Veto). Disponível em: <https://shre.ink/DhKn>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o Novo Código Florestal. **Diário Oficial da União**, 16 de setembro de 1965. Seção 1, p. 9529. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2 de setembro de 1981, Seção 1, p. 16509. Disponível em: <https://shre.ink/DhvY>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, 09 de janeiro de 1997, p. 470, col. 1. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Cerrado e Caatinga patrimônio nacional**. Disponível em: <https://shre.ink/DhKT>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 6, de 15 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a reposição florestal e o consumo de matéria-prima florestal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 18 dez. 2006. Disponível em: <https://shre.ink/DhKM>. Acesso em: 15 jul. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Decreto nº 33.537, de 14 de fevereiro de 2012. Dispõe sobre o zoneamento ambiental da Área de Proteção Ambiental – APA do Lago Paranoá. **Diário Oficial do Distrito Federal**, n. 34, de 15 fev. 2012. Disponível em: <https://shre.ink/DhKc>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Decreto nº 37.549, de 15 de agosto de 2016. Institui o Sistema Distrital de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais para execução do Plano de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais do Distrito Federal e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, nº 154, seção 1, p. 2, col. 1, 16 ago. 2014. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvk>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Decreto nº 37.931, de 30 de dezembro de 2016. Regulamenta, no âmbito do Distrito Federal, a Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, estabelece regras complementares para o funcionamento do Cadastro Ambiental Rural – CAR e do Programa de Regularização Ambiental de Imóveis Rurais – PRA/DF, e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito**

Federal, n. 47, p. 10, col. 2, 30 dez. 2016. Edição Extra. Disponível em: <https://shre.ink/DhvH>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Decreto nº 39.469, de 22 de novembro de 2018. Dispõe sobre a autorização de supressão de vegetação nativa, a compensação florestal, o manejo da arborização urbana em áreas verdes públicas e privadas e a declaração de imunidade ao corte de indivíduos arbóreos situados no âmbito do Distrito Federal. **Diário Oficial do Distrito Federal**, n. 223, p. 1, col. 1, de 23 nov. 2018. Disponível em: <https://shre.ink/Dhvm>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Lei nº 3.031, de 18 de julho de 2022. Institui a Política Florestal do Distrito Federal. **Diário Oficial do Distrito Federal**, n. 151, p. 1, col. 1, 09 ago. 2022, Disponível em: <https://shre.ink/DhC4>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Lei nº 6.364, de 26 de agosto de 2019, alterada pela Lei 6.520 de 17 de março de 2020. Dispõe sobre a utilização e a proteção da vegetação nativa do Bioma Cerrado no Distrito Federal e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, n. 162, p. 2, col. 1, 27 ago. 2019. Disponível em: <https://shre.ink/DhCE>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. Lei nº 742, de 28 de julho de 1994. Define os limites, funções e sistema de gestão da Reserva da Biosfera do Cerrado no Distrito Federal e dá outras providências. **Diário da Câmara Legislativa do Distrito Federal**, n. 213 de 22 nov. 1994. Disponível em: <https://shre.ink/DhCi>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DISTRITO FEDERAL. Câmara Legislativa. **Projeto de Lei nº 2.147, de 2021**. Institui a Campanha Permanente Cerrado Preservado. Disponível em: <https://shre.ink/DhCu>. Acesso em: 15 ago. 2023.

GOIÁS. Assembleia Legislativa. Lei nº 14.247, de 29 de julho de 2002. Institui o sistema estadual de unidades de conservação no Estado de Goiás e dá outras providências. **Leis Estaduais: Legislação Estadual de Goiás**. Disponível em: <https://shre.ink/DhC3>. Acesso em: 5 ago. 2023.

GOIÁS. Assembleia Legislativa. Lei nº 18.104, de 18 de julho de 2013. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, institui a nova Política Florestal do Estado de Goiás e dá outras providências. **Diário Oficial de Goiás**, 23 jul. 2013. Disponível em: <https://shre.ink/DhC7>. Acesso em: 5 ago. 2023.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Casa Civil. Decreto nº 9.130, de 29 de dezembro de 2017. Dispõe sobre o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais - PEPSA - e dá outras providências. **Diário Oficial de Goiás**, 29 dez.

2017. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=355136>. Acesso em: 5 ago. 2023.

LIMA, J.E.D.W.; SILVA, E.M. da. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17. 2007, São Paulo. **Anais**. CD-ROM, 2007.

MACHADO, R. B.; RAMOS NETO, M.B. ; PEREIRA, P.G.P. ; CALDAS, E.F.; GONÇALVES, D.A. ; SANTOS, N.S. ; TABOR, K.; STEININGER, M. **Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro**. Brasília, DF: Conservação Internacional, 2004. Relatório técnico não publicado.

MARANHÃO. Assembleia Legislativa. Lei nº 11.734, de 26 de maio de 2022. Institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Bioma Cerrado e Sistema Costeiro do Estado do Maranhão, e dá outras providências. **Diário Oficial Estado do Maranhão**, ano 156, n. 98, 26 maio 2022. p. 13-47. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=432080>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MATO GROSSO. Assembleia Legislativa. Lei Complementar nº 38, de 21 de novembro de 1995. Dispõe sobre o Código Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Mato Grosso**, Cuiabá, ano 55, n. 21784, 22 nov. 1995. Disponível em <https://shre.ink/DhCg>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MATO GROSSO. Assembleia Legislativa. Lei nº 7.868 de 20 de dezembro de 2002. Altera e complementa o Sistema de Compensação de Reserva Legal, previsto na Lei nº 7.330, de 27.09.00, no Decreto nº 2.759, de 16.07.01, e no Decreto nº 3.815, de 21.01.02, bem como estabelece novos critérios sobre a Licença Ambiental Única - LAU. **Diário Oficial do Estado de Mato Grosso**, n. 23525, p. 6, 20 dez. 2002. Disponível em: <https://shre.ink/DhCx>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MATO GROSSO. Assembleia Legislativa. **Projeto de Lei nº 446, de 2020**. Regulamenta parcialmente o art. 273 da Constituição Estadual e dá outras providências. Disponível em: <https://shre.ink/DhC2>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MATO GROSSO. Assembleia Legislativa. **Projeto de Lei nº 847, de 2021**. Institui a Política Estadual para o Manejo Sustentável, Plantio, Extração, Consumo, Comercialização e Transformação dos Frutos e Produtos Nativos do Cerrado Mato-grossense. Disponível em: <https://shre.ink/DhXY>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MATO GROSSO DO SUL. Assembleia Legislativa. Lei nº 4.555, de 15 de julho de 2014. Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC, no âmbito do Território do Estado de Mato Grosso do Sul e dá outras providências. **Diário**

Oficial Estado de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, ano 36, n. 8. 716, 16 jul. 2014. Disponível em: <https://shre.ink/DhXR>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MATO GROSSO DO SUL. Assembleia Legislativa. Lei nº 5.235, de 16 de julho de 2018. Dispõe sobre a Política Estadual de Preservação dos Serviços Ambientais, cria o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PESA), e estabelece um Sistema de Gestão deste Programa. **Diário Oficial Estado de Mato Grosso do Sul**, n. 9.698, p. 7-10, 17 jul. 2018. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=364886> Acesso em: 5 ago. 2023.

MATO GROSSO DO SUL. Assembleia Legislativa. Lei nº 5.237, de 17 de julho de 2018. Cria o Complexo dos Poderes e estabelece o Programa de Preservação, Proteção e Recuperação Ambiental das áreas que abrangem o Parque dos Poderes, o Parque Estadual do Prosa, o Parque das Nações Indígenas, e dá outras providências. **Diário Oficial Estado de Mato Grosso do Sul**, n. 9.699, p. 1-3, 18 jul. 2018. Disponível em: <https://shre.ink/DhXy>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Lei nº 13.047, de 17 de dezembro de 1998. Dispõe sobre o uso racional do cerrado nativo ou em estágio secundário de regeneração. **Minas Gerais Diário do Executivo**, p. 1, col. 1, 18 dez. 1998. Microfilme 571. Disponível em: <https://shre.ink/DhXa>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2023. Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado. **Minas Gerais Diário do Executivo**, p. 1, col. 2, 17 out. 2013. Disponível em: <https://shre.ink/DhX2>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Projeto de Lei nº 4.004, de 2022. Dispõe sobre a conservação, a proteção, a regeneração, a utilização da vegetação nativa do Cerrado e institui a Política Estadual de Desenvolvimento Sustentável do Cerrado e dos ecossistemas, da flora e da fauna associados e dá outras providências. **Diário do Legislativo** 06 out. 2022. Disponível em: [https://www.almg.gov.br/projetos-de-lei/PROJETO DE LEI/4004/2022](https://www.almg.gov.br/projetos-de-lei/PROJETO%20DE%20LEI/4004/2022). Acesso em: 5 ago. 2023.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; FONSECA, G. A. B. da; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**. vol 403, 2000.

PARÁ. Lei nº 6.462, de 4 de julho de 2002. Dispõe sobre a Política Estadual de Florestas e demais Formas de Vegetação e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Belém, ano 111, n. 29732, 05 jul. 2002. Disponível em <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/506.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

PIAUI. Assembleia Legislativa. Lei nº 7.193, de 8 de abril de 2019. Dispõe sobre o consumo de matéria-prima florestal e as modalidades de cumprimento da reposição florestal obrigatória no Estado do Piauí, previstos no art.33, §1º da

lei federal nº12.651, de 25 de maio de 2012 e dá outras providências. **Diário Oficial**, n. 66, 08 abr. 2019. Disponível em: <https://shre.ink/DhXK>. Acesso: 5 ago. 2023.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. v. 2.

RODRIGUES, M. A. **Proteção jurídica da flora**. Salvador: Jus Podivm, 2019. p. 53.

SANTANA, CAM; CAMPOS, SK; MARRA, R; ARAGÃO, AA. Cerrado: pilar da agricultura brasileira. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, p. 39-58.

SILVA, J. A. da. **Curso de direito constitucional positivo**. 26 ed., rev. e atual. São Paulo: Malheiros, 2006. Atualizada nos termos da Reforma Constitucional até a Emenda Constitucional n. 48, de 10.8.2005.

SÃO PAULO (Estado). Assembleia Legislativa. Lei nº 13.550, de 02 de junho de 2009. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Cerrado no Estado, e dá providências correlatas. **Diário Oficial Estado de São Paulo**, v. 119, n. 102, 3 jun. 2009. Disponível em: <https://shre.ink/DhXG>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 49.141, de 28 de dezembro de 1967. Dispõe sobre a exploração e o uso de cerradões, cerrados e campos sujos do Estado e dá outras providências. **Diário Oficial Estado de São Paulo**, v. 87, n. 249, 29 dez. 1967. Disponível em: <https://shre.ink/DhX3>. Acesso em: 5 ago. 2023.

TOCANTINS. Lei nº 1.917, de 17 de abril de 2008. Institui a Política Estadual sobre Mudanças Climáticas, Conservação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Tocantins, e adota outras providências. **Diário Oficial do Estado**, 18 abr. 2008. Disponível em: <https://shre.ink/DhX5>. Acesso em: 5 ago. 2023.

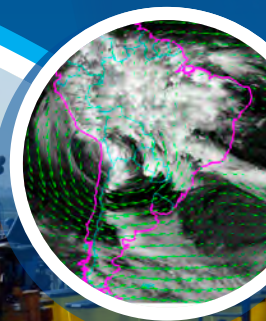
TOCANTINS. Lei nº 771, de 07 de julho de 1995. Dispõe sobre a Política Florestal do Estado de Tocantins. **Diário Oficial do Estado**, n. 449, 8 jul. 1995. Disponível em: <https://www.al.to.leg.br/arquivos/10725.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2023.

CAPÍTULO 4

Sistemas de Tempo e Mecanismos de Variabilidade Climática no Cerrado

Michelle Simões Reboita

Glauber Willian de Souza Ferreira



4.1 Introdução

O clima no bioma Cerrado é caracterizado por uma estação chuvosa (outubro a março) e outra seca (abril a setembro), conforme mostra a Figura 4.1. Esse padrão é o dominante em grande parte da América do Sul (AS) e é chamado de clima de monção (Ferreira; Reboita, 2022). Diferentemente do que ocorre na monção asiática, a monção da AS não está relacionada com a reversão sazonal na direção dos ventos próximos da superfície, mas sim com os volumes sazonais de precipitação distintos (Wang et al., 2012; Ferreira; Reboita, 2022).

Com relação à temperatura média do ar a 2 m, os meses de dezembro a fevereiro (verão) são os mais quentes, enquanto junho a agosto (inverno) são os mais frios (Figura 4.1). Entre o final do outono e o início da primavera, em algumas ocasiões, as temperaturas podem chegar à temperatura do ponto de congelamento (0 °C), o que causa a formação de geadas, fenômeno extremamente prejudicial para a agricultura (Snyder; Melo-Abreu, 2005).

Os ciclos anuais de precipitação e temperatura do ar a 2 m mostrados na Figura 4.1 correspondem a valores médios resultantes da atuação de diferentes sistemas atmosféricos no bioma. Esses valores são os esperados para cada respectivo mês. Entretanto, nem sempre a atmosfera segue o padrão médio. Por exemplo, um certo mês de um dado ano pode apresentar acumulado mensal de precipitação muito abaixo ou acima do valor esperado. Essas variações resultam da atuação de mecanismos de grande escala, chamados de modos de variabilidade natural do clima ou padrões de teleconexões, que afetam a frequência, intensidade e/ou localização dos sistemas atmosféricos, o que causa as anomalias climáticas (Reboita et al., 2021a, 2022).

Diante do exposto, o objetivo desse capítulo é apresentar os sistemas atmosféricos atuantes no bioma Cerrado e, na sequência, os mecanismos que causam a variabilidade natural do clima.

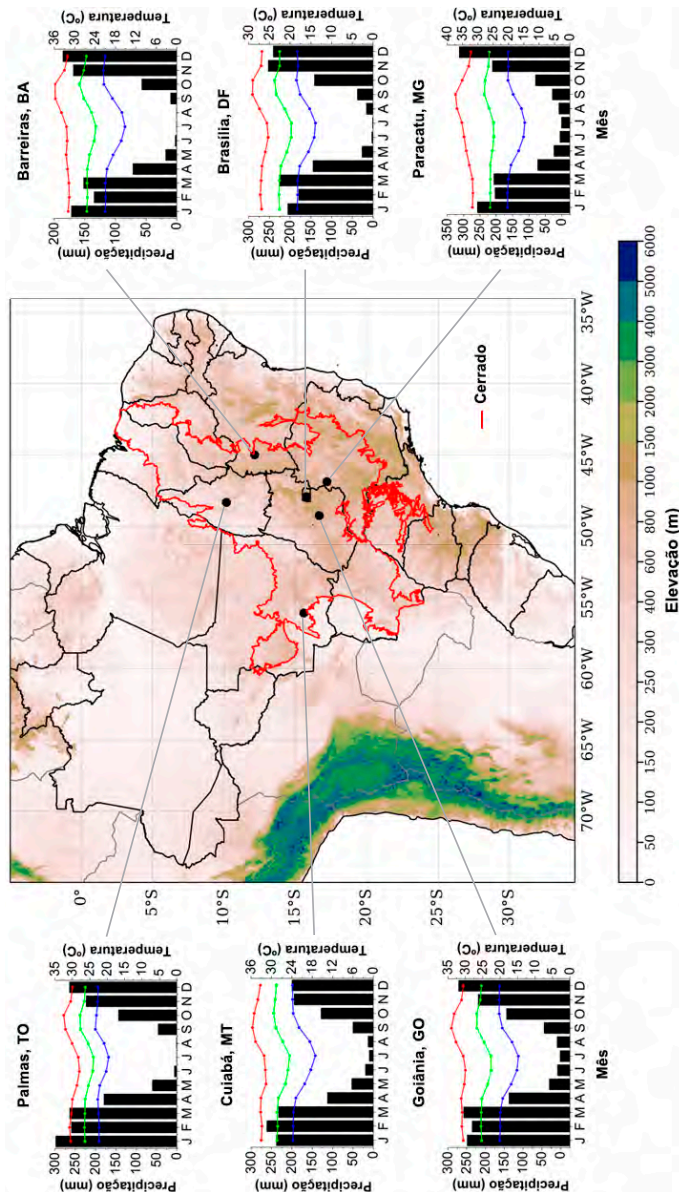


Figura 4.1. Localização do bioma Cerrado em relação à América do Sul, topografia (m); obtida do United States Geological Survey/Earth Resources Observation System (EROS) Center – e climogramas das localidades de Barreiras, BA; Brasília, DF; Cuiabá, MT; Goiânia, GO; Palmas, TO e Paracatu, MG, baseados nas normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia no período de 1991 a 2020. Nos climogramas, as barras indicam a média da precipitação mensal; a linha azul, a temperatura mínima; a linha verde, a temperatura média e a linha vermelha, a temperatura máxima.

4.2 Sistemas atmosféricos

Embora o domínio do bioma Cerrado ocorra na região Centro-Oeste do Brasil, esse bioma também está presente em partes das regiões sudeste, nordeste e até mesmo em pequenas áreas das regiões Sul e Norte do país (Figura 4.1). Por isso, diferentes sistemas atmosféricos atuam nesse bioma. Entretanto, a abordagem aqui será mais focada na parte central do país, onde o Cerrado é predominante. Como essa região apresenta um clima caracterizado por um período seco e outro chuvoso (Figura 4.1), a discussão dos sistemas atmosféricos será baseada nesses dois períodos ao invés das estações do ano clássicas (verão: dezembro-janeiro-fevereiro; outono: março-abril-maio; inverno: junho-julho-agosto e primavera: setembro-outubro-novembro). Para a discussão das variáveis atmosféricas, serão apresentados mapas do globo para fornecer uma visão integrada da região de interesse com o clima global – mapas das variáveis atmosféricas mostrando apenas o bioma Cerrado são apresentados no Capítulo 5 desta obra.

Do inverno para o verão, o aquecimento radiativo à superfície é intensificado (Figuras 4.2A e 4.2B), contribuindo para aumentar a temperatura do ar (Figuras 4.1, 4.2C e 4.2D). Com isso, as parcelas de ar próximas à superfície tornam-se menos densas, adquirem flutuabilidade e, conseqüentemente, há convecção, que é um mecanismo de transferência vertical de calor na atmosfera (Markowski, 2007). No verão, na média climatológica, predominam movimentos ascendentes (representados por valores negativos) sobre o bioma Cerrado, enquanto no inverno a climatologia mostra subsidência (valores positivos), conforme a Figura 4.3A e 4.3B, que indica a velocidade vertical no nível de 500 hPa (aproximadamente 5,5 mil quilômetros de altitude). No verão, a convecção é o principal mecanismo para a formação de nuvens (Figura 4.3C, 4.3D) e precipitação (Figura 4.1) pois, se as parcelas de ar que estão ascendendo na atmosfera estiverem carregando umidade, haverá condensação e formação de nuvens.

Não apenas a temperatura do ar aumenta do inverno para o verão, como também o suprimento de umidade é intensificado. Durante o verão, os ventos alísios de nordeste chegam mais intensos no setor norte da AS (Figuras 4.4A e 4.4B), contribuindo para advectar mais umidade do oceano Atlântico Tropical Norte para a Amazônia (Durán-Quesada et al., 2012). Essa umidade combina-se com a evapotranspiração da floresta e parte é transportada para os subtrópicos por meio da atuação de jatos de baixos níveis (JBN) na atmosfera (Figuras 4.4C e 4.4D). Além disso, no verão, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se mais retraído, não se estendendo sobre o leste do Brasil (Reboita et al., 2019), o que favorece o transporte de umidade do oceano Atlântico Sul para a região Sudeste e até mesmo para o centro-oeste (Figuras 4.4C e 4.4D). A combinação da convecção, típica do período quente, com a umidade transportada pelo JBN, com a umidade proveniente do Atlântico Sul e com a presença de um sistema de baixa pressão na costa sudeste do Brasil, pode levar à formação de uma banda de nebulosidade e precipitação que se estende do sul da Amazônia, cruza o bioma Cerrado e chega ao oceano Atlântico Sul, persistindo por três dias ou mais. Essa banda é conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Carvalho et al., 2004; Silva et al., 2019) e, em geral, configura-se quando tais sistemas de baixa pressão na costa sudeste do Brasil (frentes ou ciclones) auxiliam na organização da umidade e convergência próxima à superfície (Escobar; Reboita, 2022).

A Figura 4.5 mostra um exemplo de ZCAS atuando no bioma Cerrado. A proximidade de uma frente fria na costa sudeste do Brasil, que se torna semiestacionária, contribui para organizar a convergência de umidade. Embora não mostrado na figura, esse episódio iniciou no dia 27 de fevereiro de 2019 e se desconfigurou no dia 03 de março de 2019. Quando não há sistemas de baixa pressão na costa sudeste auxiliando a modular a convecção, o JBN tende a se deslocar para o Norte da Argentina e/ou Sul do Brasil. Muitas vezes essa configuração origina o chamado dipolo na precipitação: quando a ZCAS está ativa, a chuva fica concentrada na sua área de atuação, mas quando a ZCAS se desconfigura, e o JBN tem sua saída no sudeste da AS (região forma-

da pelo Sul do Brasil, Uruguai e Nordeste da Argentina), a chuva diminui na região da ZCAS e aumenta na região da saída do JBN (Nogués-Paegle; Mo, 1997). O caminho percorrido pelo JBN também é modulado pelo gradiente horizontal de temperatura do ar entre a região tropical e a subtropical. A intensa convecção na Amazônia transporta calor latente para a alta troposfera, o que resfria as camadas mais baixas (vide próximo parágrafo). A combinação desse processo com as características próprias da floresta Amazônica ajuda a resfriar a Amazônia nos baixos níveis da atmosfera (Nobre et al., 2009). Com isso, um gradiente horizontal de temperatura do ar e, consequentemente, de pressão atmosférica se caracteriza, favorecendo a configuração do JBN.

Nesse momento, vale a pena “abrir parênteses” para explicar o processo físico associado ao resfriamento em baixos níveis e aquecimento em médios e altos níveis da atmosfera mencionados no parágrafo anterior. No processo de convecção, as parcelas mais aquecidas/menos densas ascendem, enquanto as mais frias/mais densas tomam o lugar dessas próximas à superfície e, consequentemente, se aquecem. Ao se aquecerem, elas retiram energia da baixa atmosfera e a transportam para camadas acima da superfície. A energia transportada na vertical pode ser ainda maior quando o ar transporta umidade. Na Amazônia, a umidade é abundante e há intensa evaporação (na realidade, é evapotranspiração devido à água que também é transpirada pela vegetação). No processo de evaporação, energia é requerida para mudar a fase da água de líquida para gasosa (vapor), o que também resfria os baixos níveis da atmosfera. A energia armazenada nas parcelas de ar úmidas é considerada latente (oculta). Porém, quando as parcelas de ar ascendente atingem a saturação e ocorre a condensação, a mudança de fase da água do estado de vapor para líquido libera a energia armazenada, denominada calor latente de condensação. Essa energia é usada para aquecer as parcelas de ar nos níveis mais afastados da superfície.

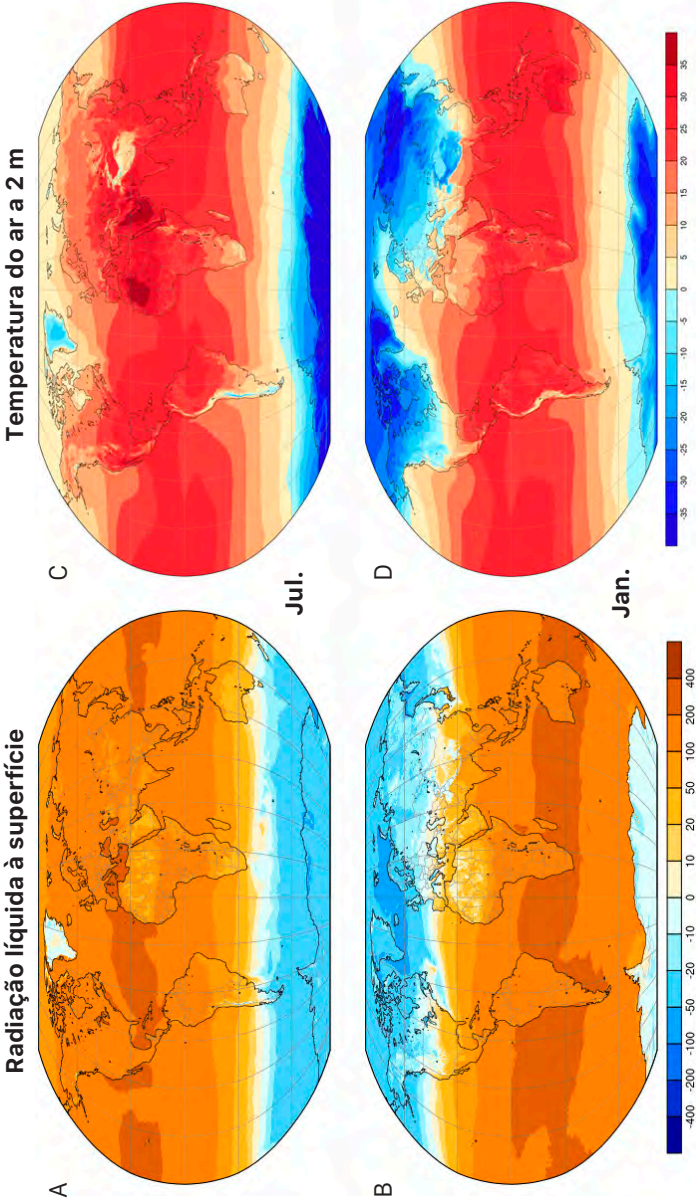


Figura 4.2. Climatologia do período de 1991–2020, calculada com a reanálise ERA5, da radiação líquida à superfície ($W m^{-2}$) (A, B) e temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}C$) nos meses de julho e janeiro para representar respectivamente o inverno (período seco) e o verão (período úmido) austral (C, D).

Fonte: Adaptado de Climate Visualizations & Animations (2024).

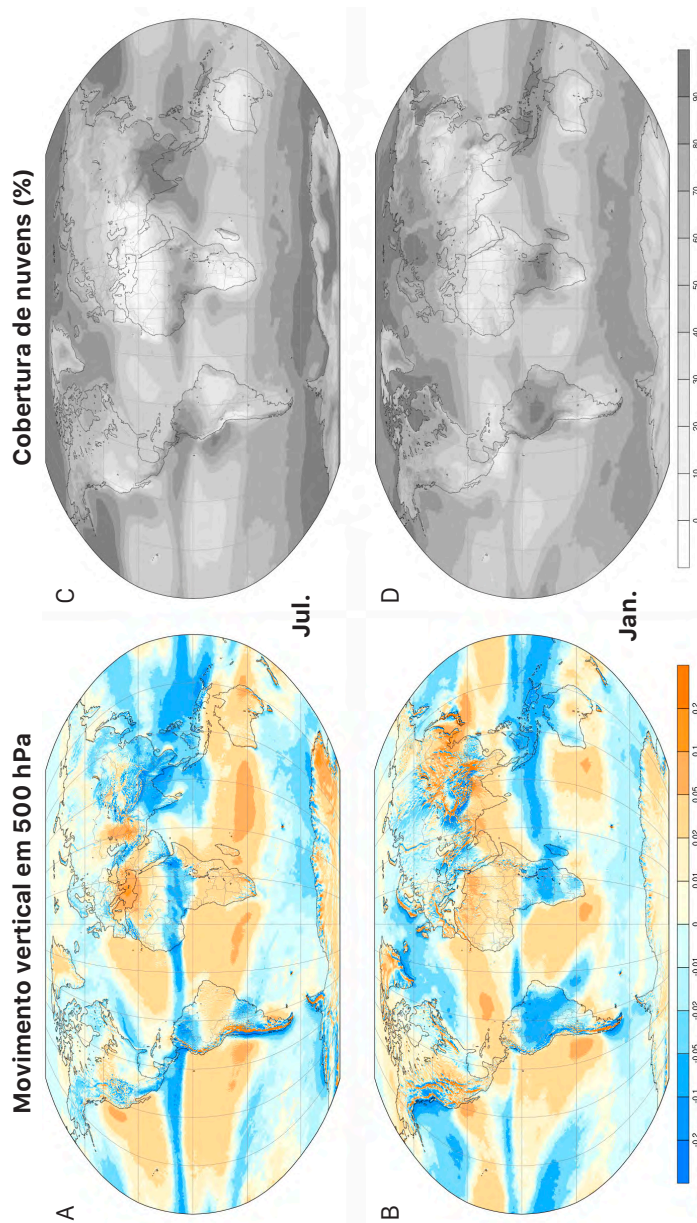


Figura 4.3. Climatologia do período de 1991–2020, calculada com a reanálise ERA5 do movimento vertical (Pa s^{-1}) (A, B), em que os valores negativos indicam ar ascendendo na atmosfera e valores positivos, ar subsidindo; e cobertura de nuvens nos meses de julho e janeiro (C, D) para representar, respectivamente, o inverno (período seco) e o verão (período úmido) austral.

Fonte: Adaptado de Climate Visualizations & Animations (2024).

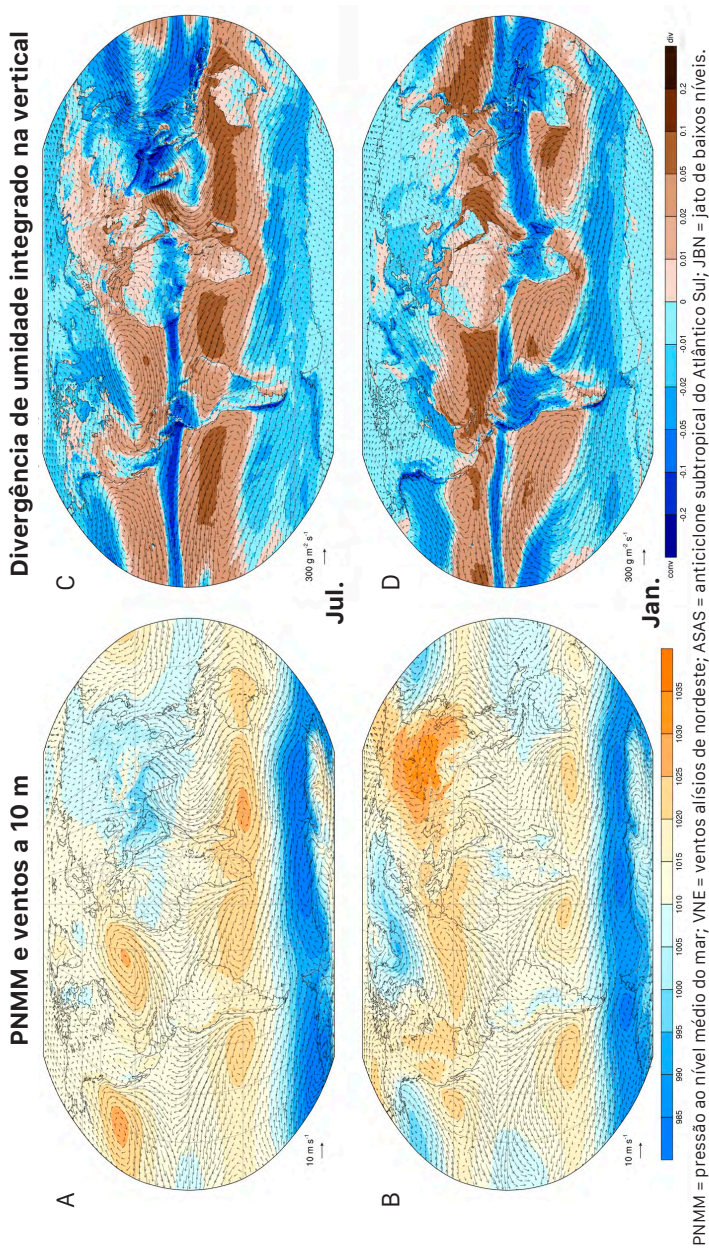


Figura 4.4. Climatologia do período de 1991–2020, calculada com a reanálise ERA5, da pressão atmosférica ao nível do mar (hPa; colorido) e ventos a 10 m de altura (m s^{-1} , setas) (A, B) e divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em cores (C, D), sendo os valores negativos indicadores de convergência e os valores positivos de divergência, e vetores indicando a direção do fluxo nos meses de julho e janeiro, para representar, respectivamente, o inverno e o verão austral. Ressalta-se que o JBN é uma característica da camada de 850 hPa, mas que também fica evidente na figura do fluxo de umidade integrado na vertical. Fonte: Adaptado de Climate Visualizations & Animations (2024).

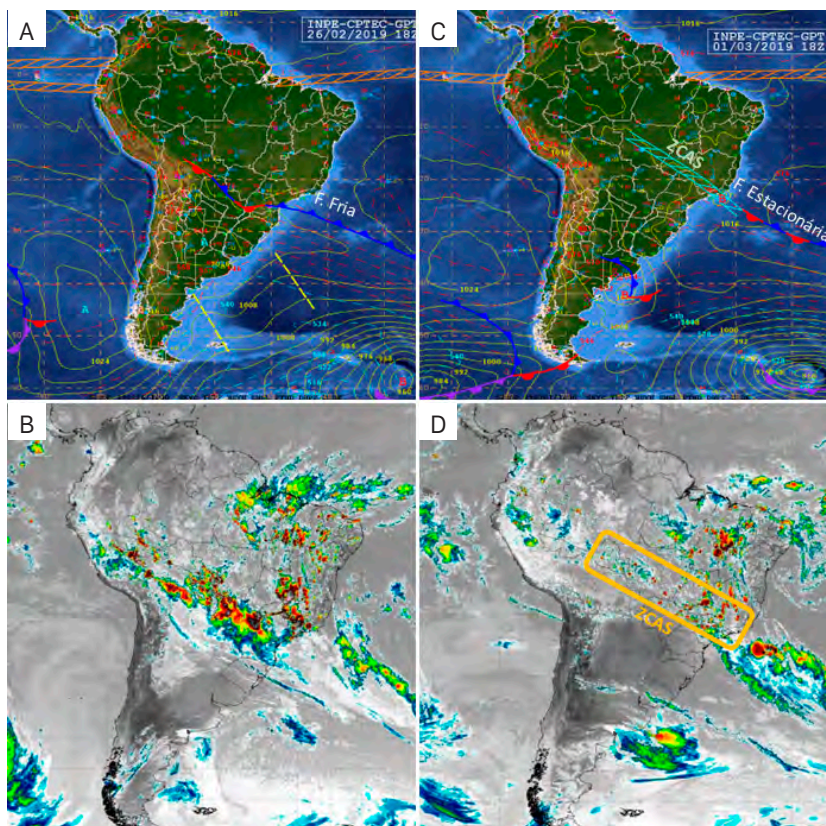


Figura 4.5. Episódio de ZCAS entre fevereiro e março de 2019. Cartas sinóticas de superfície mostrando os sistemas frontais e a pressão atmosférica ao nível do mar (hPa) em linhas amarelas (A, C) e imagens de temperatura de brilho do canal 13 do satélite GOES16 (B, D). A paleta de cores foi suprimida e o destaque é para as cores em tons mais avermelhados que indicam nuvens com topos frios ($< -60^{\circ}\text{C}$). Também é mostrada a posição da ZCAS (C, D).

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Quando há intensa atividade convectiva na Amazônia, isso fortalece os movimentos ascendentes na atmosfera, perturbando os níveis mais altos, de forma que um anticiclone se forma e é bem configurado a cerca de 250 hPa (~ 10 km de altitude). Devido ao mecanismo de

propagação de ondas de Rossby equatoriais, o anticiclone se encontra deslocado para sudoeste do máximo de precipitação na Amazônia e, por isso, recebe o nome de Alta da Bolívia, já que seu centro se localiza sobre a Bolívia (Lenters; Cook, 1997). Como esse sistema é uma característica de grande escala da atmosfera, possui tamanho que cobre grande parte do centro da AS e, por isso, também tem parte sobre o Cerrado. Portanto, sob grande parte da alta espera-se encontrar nebulosidade, já que é uma resposta ao intenso aquecimento convectivo (Figura 4.6). Esse processo físico pode causar dúvidas ao leitor, pois, em geral, os livros textos mencionam que regiões de alta pressão são caracterizadas por tempo bom. Toda vez que se menciona a presença de um sistema de baixa ou alta pressão, o primeiro passo é saber em qual nível da atmosfera esse se encontra e o processo físico a ele associado. No caso dos anticiclones, aqueles propiciados pela convergência de massa nas ondas em níveis médios e altos da atmosfera ou pelo ramo subsidente da célula de Hadley (que, nesse caso, são os anticiclones semipermanentes) realmente irão produzir movimentos subsidentes, aumento da pressão próximo à superfície e céu, em geral, com ausência de nebulosidade. Porém, o caso em análise é de um sistema formado devido à convecção, que causa acúmulo de ar e perturbação na atmosfera mais alta. Se há ar ascendendo e esse é úmido, haverá nebulosidade.

Do outono para o inverno, o aquecimento radiativo decresce em comparação com o verão (Figuras 4.2A e 4.2B), a temperatura média do ar a 2 m é menor (Figuras 4.2C e 4.2D), a convecção é desfavorecida e, em parte, é inibida pela expansão do ASAS sobre o sudeste do Brasil (Figuras 4.4A e 4.4B), cujos movimentos subsidentes se contrapõem aos movimentos ascendentes. Nesse período, os ventos alísios de nordeste mais enfraquecidos também desfavorecem o transporte de umidade para a Amazônia e que, posteriormente, seria levada pelo JBN para o Cerrado e subtropicais (Figuras 4.4C e 4.4D). Nessa época do ano, o JBN está mais configurado ao sul de 20°S, o que pode ser explicado pelo gradiente horizontal de pressão entre o setor oeste do ASAS e a baixa termo-orográfica no Noroeste da Argentina (combinação das circulações ciclônica a oeste e anticiclônica a leste).

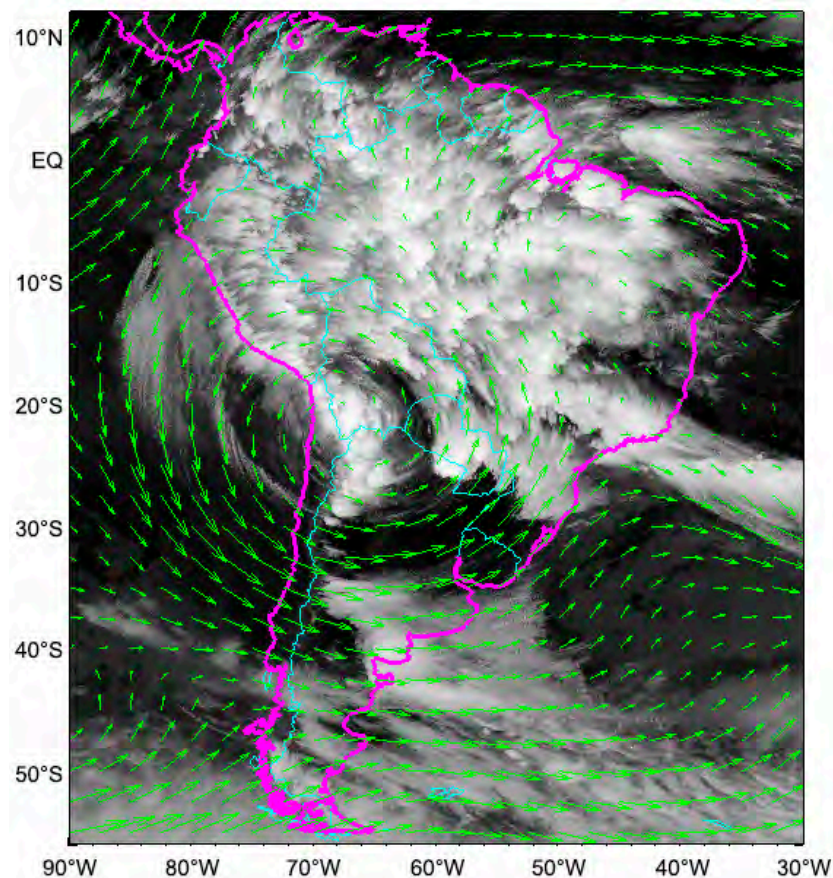


Figura 4.6. Exemplo de um episódio da alta da Bolívia ocorrido em 1º de fevereiro de 2015, podendo ser identificada pela circulação em altos níveis (200 hPa) com sentido anti-horário por meio dos vetores na cor verde. A imagem também mostra a nebulosidade (variável temperatura de brilho) do canal IR 10.7 do satélite GOES-13.

Fonte: Adaptado de EUMeTrain (2012).

Em todas as estações do ano, principalmente na região Sudeste do Brasil, o ASAS pode ser um agente causador de variabilidade tanto na precipitação quanto na temperatura do ar. O ASAS é uma característica

da circulação geral da atmosfera e está associado ao ramo subsidente da célula de Hadley no hemisfério sul (Reboita et al., 2019). Portanto, se um perfil vertical é traçado na região do ASAS, o sistema se caracterizará por maiores valores de pressão atmosférica (ou de altura geopotencial) na coluna atmosférica e por maiores temperaturas do que nas vizinhanças. Mecanismos de teleconexão (como os abordados na próxima seção) podem causar mudança nas características do ASAS. Por exemplo, no período de janeiro a março de 2014, um padrão de onda emanado das cercanias da Austrália afetou o posicionamento do ASAS, que adquiriu características similares às do período seco (sistema estendido para o oeste atuando sobre o continente). Isso colaborou para o déficit de precipitação nas regiões sudeste, nordeste e centro-oeste, enquanto o Sul do Brasil teve precipitação acima da média climatológica (Coelho et al., 2016). Portanto, o ASAS contribui para a ocorrência de veranicos, que são sequências de dias sem ocorrência de precipitação dentro do período chuvoso, sendo extremamente prejudiciais para a agricultura (redução da produtividade) no Cerrado (Assad et al., 1993). Assad et al. (1993) verificaram que os veranicos no Cerrado são mais frequentes em janeiro e, à medida que aumenta a duração dos veranicos (acima de 15 dias), a distribuição espacial do fenômeno se torna mais homogênea na parte oeste do Cerrado.

Enquanto a comunidade científica usa o termo veranico para se referir a um período seco dentro da estação chuvosa, a mídia usa esse termo para se referir a um período quente (onda de calor) dentro da estação fria. Ondas de calor são bem comuns durante o período seco (inverno) nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil. Nessas regiões, quando há estagnação da circulação atmosférica (por exemplo, a não passagem de sistemas frontais pelo país) há um acúmulo de energia dia após dia que auxilia a manutenção do ASAS; recorda-se aqui que esse é um sistema que tem subsidência e, portanto, há aquecimento adiabático (devido à compressão do ar em direção à superfície) que se soma ao aquecimento radiativo diurno.

No outono, o volume de precipitação é menor comparado ao do verão, e o inverno é o período mais seco no Cerrado, com a precipitação média mensal não ultrapassando 20 mm (Figura 4.1). A pouca precipitação que ainda ocorre nessas estações do ano está associada basicamente à passagem de frentes frias ou a instabilidades geradas por perturbações em níveis médios e altos da atmosfera como, por exemplo, pelo jato subtropical. As frentes correspondem à região de contato entre duas massas de ar com propriedades termodinâmicas distintas: uma quente e geralmente úmida, e outra fria e seca (Ynoue et al., 2017). Na Figura 4.7, é mostrado um caso de frente fria atuando sobre o Cerrado, no horário das 1200 UTC do dia 14 de junho de 2023, sendo ressaltado o campo de anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em meteorologia, a pressão atmosférica é a coordenada vertical mais utilizada), uma imagem de satélite do canal vapor d'água e a precipitação acumulada em milímetros (das 9 horas local do dia 13 até 9 horas do dia 14). A anomalia de temperatura (Figura 4.7A) é obtida mediante a diferença entre a temperatura observada no horário mencionado e a média climatológica desse mesmo horário. Esse campo é utilizado porque realça mais os contrastes de temperatura entre massas de ar com propriedades térmicas distintas do que a temperatura observada. De fato, a Figura 4.7A indica a presença de uma massa de ar mais fria (cores em tons de azul) sobre a Bolívia, Paraguai, Norte da Argentina e Sul do Brasil e uma mais quente sobre o centro-oeste do Brasil (cores em tons de vermelho). A interface entre as duas massas de ar é a região frontal. As posições das frentes fria (em azul) e quente (em vermelho) são destacadas na Figura 4.7B. Essa também mostra a umidade integrada na atmosfera por meio de informação de satélite. Sobre o continente, a região da massa de ar frio é caracterizada por cores mais escuras (na retaguarda da frente fria), o que indica ar seco. Já no lado equatorial da frente fria e quente, as cores mais acinzentadas na imagem indicam a presença de vapor d'água na atmosfera. Por fim, a Figura 4.7C apresenta o acumulado de precipitação, que mostra chuva tanto na região das frentes quanto ligeiramente na retaguarda e dianteira do sistema. Isso é um indicativo da chuva pós e pré-frontal.

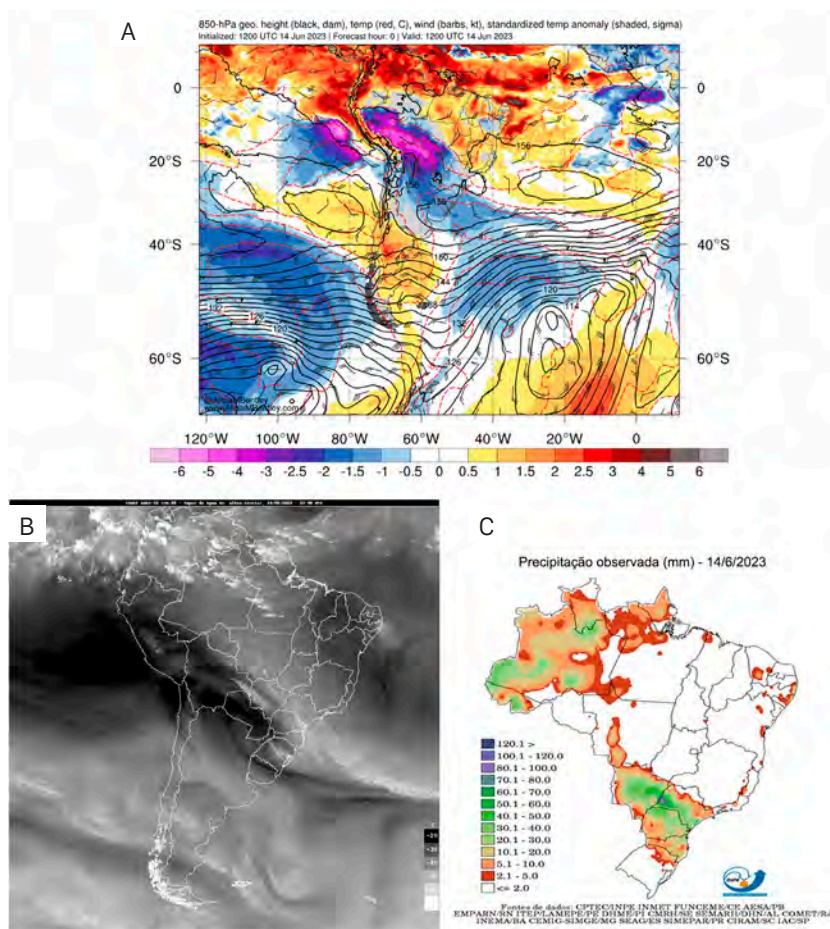


Figura 4.7. Exemplo de atuação de uma frente fria às 1200 UTC do dia 14 de junho de 2023. Campos meteorológicos em 850 hPa de temperatura do ar (°C, linhas vermelhas tracejadas), anomalia de temperatura do ar (°C, cores), altura geopotencial (mgp, linhas pretas) e direção e intensidade do vento (barbelas, nós) (A); imagem de satélite do canal vapor d'água do satélite GOES-16 (B) e precipitação acumulada (mm) entre às 9 horas local dos dias 13 e 14 de junho de 2023 (C)¹.

¹ Disponível em: (A) <https://www.atmos.albany.edu/student/abentley/realtime/>; (B) <http://satellite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>; (C) <http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>

Nem todas as frentes frias que adentram o continente conseguem chegar até o bioma Cerrado, pois muitas adquirem uma trajetória mais zonal e se deslocam para o oceano Atlântico. O estudo de Carmo et al. (2023) sobre a atuação de frentes frias em Cuiabá, MT indica que a frequência média anual de frentes frias no Cerrado é de 16 sistemas. Escobar et al. (2019) mencionam que, não apenas a região Norte do Brasil apresenta episódios de friagem, a região Centro-Oeste e, portanto, o Cerrado, também é afetada por esses eventos. Segundo os autores, o termo friagem é utilizado para definir a queda de temperatura do ar nas latitudes tropicais, um exemplo é mostrado em Nobre et al., 2009, portanto, isso não é uma característica peculiar da Amazônia. Em Cuiabá, os episódios de friagem estão associados com declínios diários da temperatura máxima superiores a 10 °C e que podem ocorrer no dia da chegada de uma frente fria em Cuiabá ou um dia após. O padrão sinótico mais frequente associado com as friagens em Cuiabá mostra um anticiclone pós-frontal que se desloca do oceano Pacífico Sul em direção ao continente, como exemplificado na Figura 4.8, favorecendo uma forte advecção de ar frio sobre a porção central do Brasil.

O ar frio, associado ao anticiclone pós-frontal, das frentes frias que conseguem chegar ao bioma Cerrado também pode causar geadas. Na Figura 4.8, é mostrado um caso de frente fria ocorrida no final do mês de julho de 2021. A massa de ar frio (indicada na figura com as iniciais APF) atuou entre os dias 27/7/2021 e 1º/8/2021 sobre grande parte do país e causou queda de neve nas serras gaúcha e catarinense, friagem no sul e sudoeste da Amazônia e geadas em amplas áreas das regiões sul, sudeste e centro-oeste do país. As temperaturas mínimas atingiram valores negativos em diversas cidades. Por exemplo, no dia 30 de julho, a temperatura mínima na cidade de Iguatemi, MS chegou a -3,3 °C. No relatório publicado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2021) e nas análises de chuva do CPTEC/INPE², não consta precipitação no bioma Cerrado associada a esse episódio frio. As geadas

² Disponíveis em: <http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>

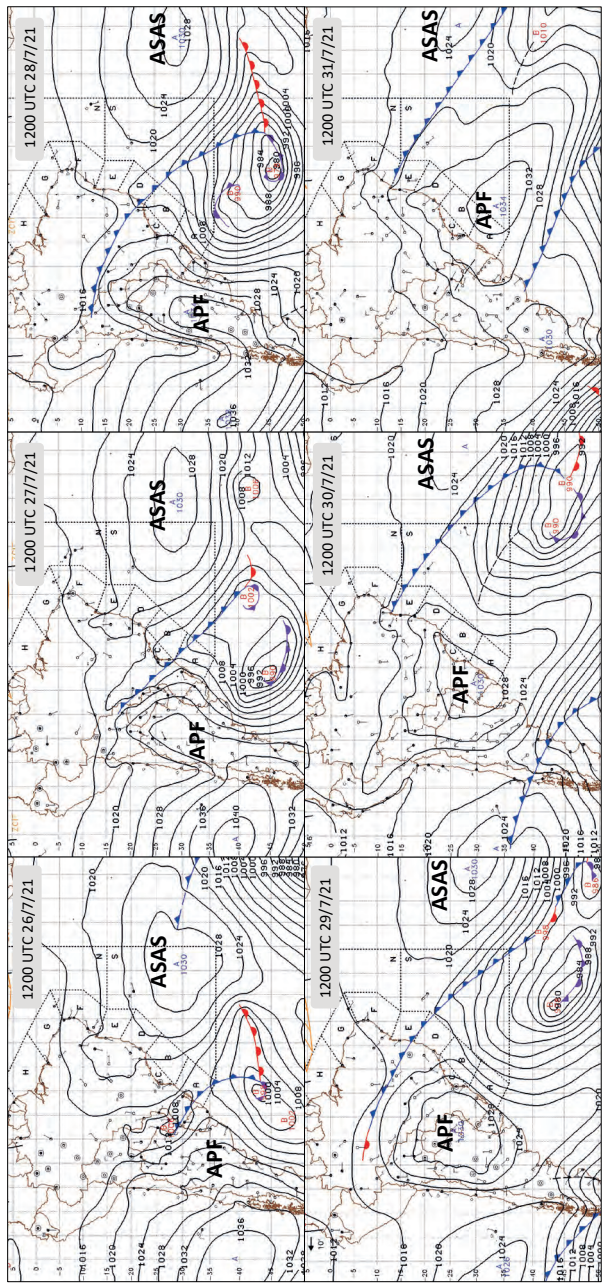
no bioma Cerrado também podem ocorrer na ausência de massas de ar pós-frontal. Nesse caso, estão associadas com o ciclo diurno das temperaturas e com a umidade do ar; durante o inverno, não há muita disponibilidade de vapor d'água na atmosfera no bioma Cerrado, que é um gás de efeito estufa e impede que a maior parte da energia liberada pela superfície deixe o sistema climático, indo para o espaço. Com pouco vapor d'água, a maior parte da energia recebida do sol ao longo do dia é perdida para o espaço à noite, pois o efeito estufa é limitado. Isso faz com que as temperaturas mínimas sejam baixas na manhã seguinte, podendo chegar a zero ou abaixo desse valor na superfície (relva), o que leva à formação de geadas (Ahrens; Henson, 2019). Quando uma dada área é de topografia elevada, o fator altitude também contribui para as temperaturas mais baixas e formação das geadas.

Um outro exemplo de sistema precipitante no Cerrado durante o período seco é exemplificado na Figura 4.9. Em maio de 2023, a precipitação foi escassa ao longo do mês em grande parte do país. Entretanto, no final do referido mês, um sistema frontal adentrou o Sul do país no dia 27, chegou à região Sudeste no dia 29 e deslocou-se para o oceano, estando totalmente afastado da costa brasileira no dia 31. A chuva causada pela passagem do sistema frontal foi volumosa no Sul do Brasil e no estado do Mato Grosso do Sul entre os dias 27 e 28 (Figuras 4.10B e 4.10C). Após a passagem da frente fria, a alta pós-frontal ocupou parte das regiões Sul e Sudeste do país e, consequentemente, parte do Cerrado. Com o domínio da alta pós-frontal, não seria esperada a ocorrência de precipitação no estado de Mato Grosso do Sul e nem na região Sudeste a partir do dia 30. Entretanto, em vários setores da região Centro-Oeste e Sudeste ocorreu precipitação entre o final do dia 30 até o final do dia 31, o que leva ao questionamento sobre qual sistema foi responsável pelo episódio de precipitação.

A resposta para o episódio descrito está associada à circulação da atmosfera em níveis altos (250 hPa). Na sequência de imagens para os dias 29 a 31 de maio de 2023, nas Figuras 4.11A e 4.11C, nota-se a presença de um cavado em altos níveis que no dia 29 localiza-se sobre a

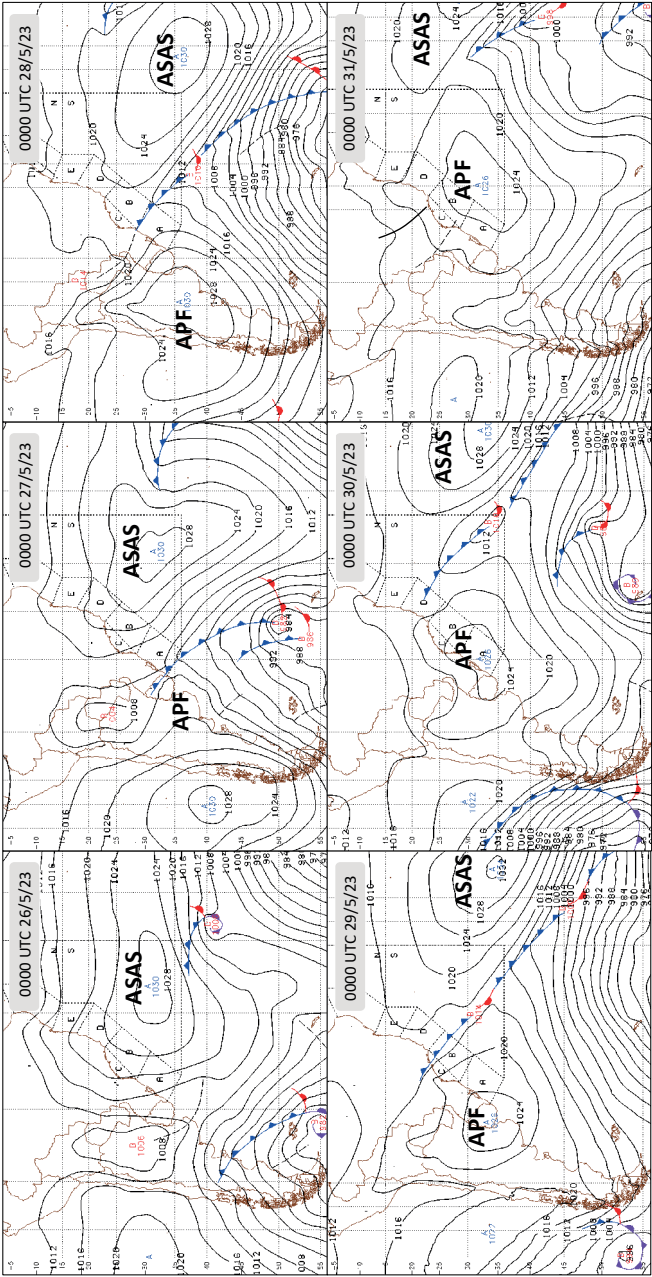
costa oeste da AS, mas que migra para leste atingindo o centro do país no dia 31. Por relações da dinâmica da atmosfera, sabe-se que a leste do eixo dos cavados em níveis médios e altos predomina divergência de massa, o que indica que o ar está deixando aquele local. Mas, como a atmosfera tende ao equilíbrio, para compensar a retirada de massa, movimentos ascendentes se desenvolvem, o que significa que há ar sendo transportado de níveis mais baixos para os altos (Figuras 4.11E e 4.11F). Isso implica em queda de pressão na superfície e um sinal desse processo aparece por meio do cavado invertido no campo da pressão ao nível médio do mar (PNMM) nas cartas sinóticas dos dias 30 e 31 (Figura 4.9). Essa área de menor pressão embebida na alta pós-frontal contribui para a convergência dos ventos em baixos níveis para tal região, isso é mostrado nas Figuras 4.11H e 4.11I. Assim, a convergência irá fortalecer ainda mais os movimentos ascendentes e, nesse processo, ar úmido é transportado para níveis médios da atmosfera. Como consequência, haverá condensação e formação de nuvens e precipitação. Portanto, episódios de chuva no Cerrado não são exclusivos da passagem de frentes frias, mas também da passagem de ondas em níveis médios e altos da atmosfera bem como pela divergência causada pelo jato subtropical (Figura 4.12). Um outro fato interessante na Figura 4.11C é que há uma configuração similar à de um bloqueio atmosférico, pois há a bifurcação dos jatos de altos níveis na imagem.

A Figura 4.12 mostra uma situação de ocorrência de jato subtropical sobre o Brasil contribuindo para nebulosidade no Cerrado e região Sudeste do país. Não seria esperada essa banda de nebulosidade nas áreas mencionadas já que o ASAS está atuando sobre elas de forma a inibir os movimentos ascendentes na atmosfera. Porém, o jato subtropical propicia, em alguns de seus trechos, divergência de massa, o que leva a movimentos ascendentes que se contrapõem aos de subsidência, favorecendo, então, o desenvolvimento de nebulosidade.



Legenda: APF = alta pós-frontal ASAS = Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

Figura 4.8. Cartas sinóticas mostrando a evolução temporal do avanço de uma massa de ar frio (alta pós-frontal) sobre o bioma Cerrado no mês de julho de 2021.
Fonte: Marinha do Brasil.



Legenda: APF = alta pós-frontal; ASAS = Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul; - - - - - = cavado

Figura 4.9. Cartas sinóticas mostrando a evolução temporal do avanço de uma massa de ar frio (alta pós-frontal) sobre o bioma Cerrado no mês de maio de 2023.
Fonte: Marinha do Brasil.

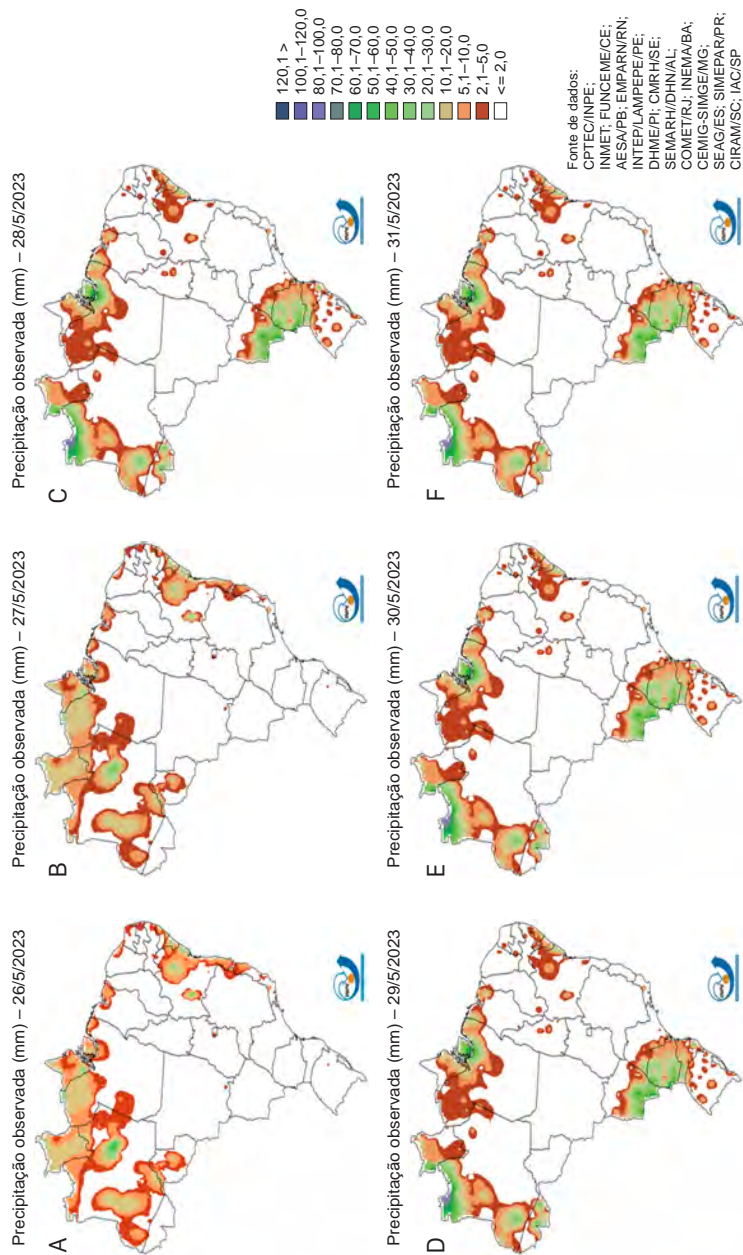


Figura 4.10. Precipitação acumulada diária (mm) entre 26 e 31 de maio de 2023.

Fonte: INPE.

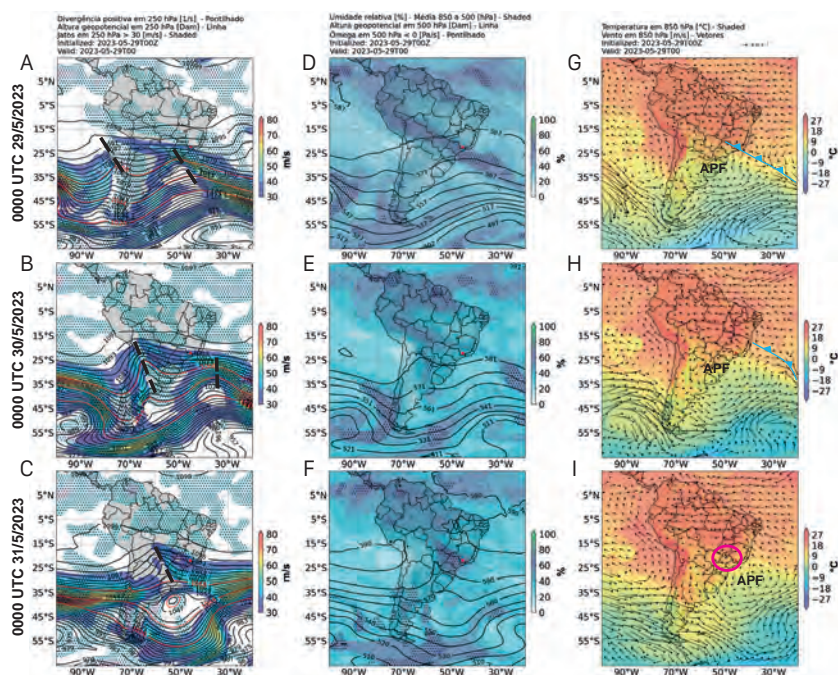


Figura 4.11. Campos atmosféricos às 0000 UTC entre os dias 29 e 31 de maio de 2023. Jatos em altos níveis (intensidade do vento superior a 30 m/s em 250 hPa), divergência de massa (s^{-1} ; somente valores positivos são mostrados com pontilhados), altura geopotencial em 250 hPa (gpm/10; linhas) e indicação de cavados mediante linhas tracejadas (A–C); umidade relativa média na camada entre 850 e 500 hPa (%; cores), altura geopotencial em 500 hPa (gpm/10; linhas) e movimento ascendente em 500 hPa (Pa/s; pontilhado e somente valores negativos que são indicadores de ar ascendendo) (D–F) e temperatura do ar em 850 hPa ($^{\circ}C$), direção do vento (vetores em preto), localização da frente fria em azul, indicação da localização da alta pós-frontal (APF) e em círculo rosa, local de convergência dos ventos próximo à superfície (G–I)³.

O período entre meados do outono e primavera pode ser devastador para a agricultura e ecossistemas em geral, não só pela falta de precipitação e ocorrência de geadas, mas também pelas queimadas, que

³ Análises do Global Forecast System (GFS) e imagens produzidas por Thales Chile e Michelle Reboita, disponível em: <https://meteorologia.unifei.edu.br/produtos/gfs/20230531/>

na sua maioria são atribuídas às atividades humanas (Oliveira-Júnior et al., 2021). No estado de Minas Gerais, as queimadas são mais frequentes entre agosto e setembro, que corresponde ao final do inverno e início da primavera, quando a água no solo também se torna mais escassa (Figura 4.13) (Santos et al., 2019).

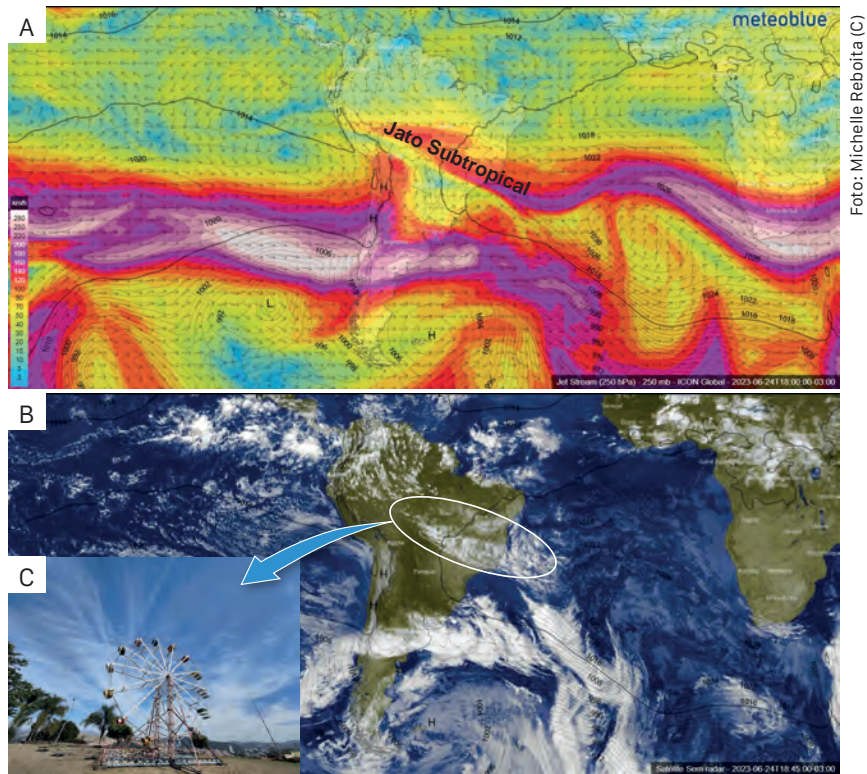


Figura 4.12. Exemplo da ocorrência do jato subtropical em 250 hPa (A) e da nebulosidade decorrente desse sistema sobre parte do Cerrado e sudeste do Brasil, indicada com o círculo vermelho, no dia 24 de junho de 2023 às 2100 UTC (1800 hora local) (B). Em A e B, a pressão ao nível médio do mar (hPa), em linhas pretas contínuas, também é mostrada. A nebulosidade decorrente da influência do jato está configurada na forma de nuvens cirrus, como também mostra fotografia à esquerda, no dia prévio (C).

Fonte: Adaptado de Meteoblue (2023).

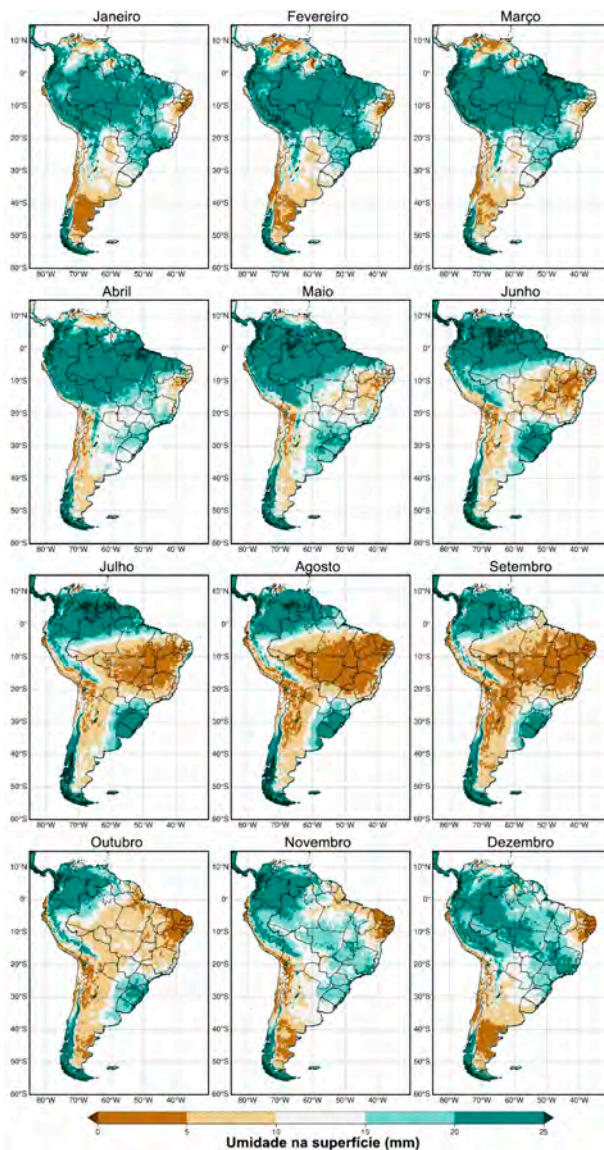


Figura 4.13. Média da umidade no solo (mm), na camada superficial (até 5 cm de profundidade), entre 2 de abril de 2015 a 2 de agosto de 2022, calculada com o produto NASA-USDA Enhanced SMAP Global Soil Moisture Data pertencente à Mission Soil Moisture Active Passive (SMAP) da NASA.

Queimadas com causas naturais ocorrem no Cerrado devido às descargas elétricas (Coutinho, 1982; Ramos-Neto; Pivello, 2000). As descargas elétricas normalmente ocorrem durante a estação chuvosa (outubro–abril), produzindo queimadas de baixa intensidade que favorecem o crescimento de espécies gramíneas (Abreu et al., 2017). Queimadas resultantes de atividades antrópicas são mais intensas e persistentes por um período maior e ocorrem principalmente na estação seca (maio–setembro) (Fidelis et al., 2018). Enquanto a ocorrência de queimadas na região pode estar associada a fatores climáticos de grande escala (Teodoro et al., 2022), atividades humanas também promovem sua intensificação no bioma (Oliveira-Júnior et al., 2021). Queimadas antrópicas no Cerrado se devem a práticas de manejo agropecuário e desmatamento, pois o fogo é utilizado na gestão de pastagens e na renovação e expansão de áreas agrícolas (Gomes et al., 2018; Oliveira-Júnior et al., 2021; Abreu et al., 2022). Geralmente, os pecuaristas queimam a vegetação anual ou bianualmente, para promover a rebrota do capim para os animais. Como essa queima acontece no meio ou final da estação seca, as queimadas antrópicas ficam mais intensas que as naturais, porque há mais biomassa morta acumulada (Fidelis et al., 2018). Essas queimadas desencadeiam mudanças na composição florística e na estrutura da comunidade de vegetação arbórea-arbustiva (Rissi et al., 2017; Ramos-Neto; Pivello, 2000; Silva Junior et al., 2020), além da emissão de poluentes e agravamento da qualidade do ar regional (Pope et al., 2020). Entre 1999 e 2018, cerca de 41,56% dos focos de queimadas identificados no Brasil ocorreram no Cerrado (Silva Junior et al., 2020).

As queimadas no Cerrado afetam o acúmulo de biomassa vegetal aérea e causam redução da biomassa de espécies sensíveis à queimada, transformando o bioma de um sumidouro de carbono para uma fonte de emissão de CO₂ (Bustamante et al., 2012; Burton et al., 2022). As queimadas também têm causado o avanço do Cerrado em direção ao bioma do Pantanal, dado que elas favorecem a ocorrência de espécies do Cerrado que são mais adaptadas aos eventos (Oliveira-Júnior et al., 2020). Além disso, as queimadas no Cerrado têm contribuído

para o aumento da frequência de queimadas na Amazônia, devido à proximidade dos dois biomas (Silva Júnior et al., 2020). Estimativas futuras indicam que o Cerrado sofrerá um aumento substancial na ocorrência de queimadas, podendo ser afetado por mais 900 mil focos de queimadas até setembro de 2030 (Silva Júnior et al., 2020). Além disso, queimadas antrópicas alteram o regime das queimadas naturais, visto que o desmatamento também está associado a uma redução da ocorrência de descargas elétricas na AS (Bekenshtein et al., 2023).

4.3 Modos de variabilidade natural do clima

O padrão climatológico mostrado nas Figuras 4.1 a 4.4 nem sempre se repete ano após ano, pois anomalias climáticas de origem natural em locais distantes do bioma Cerrado podem perturbar a atmosfera, causando alterações na localização, intensidade e/ou frequência dos sistemas atmosféricos precipitantes no Cerrado, o que, por consequência, leva ao excesso ou déficit de precipitação nesse bioma. Exemplos de déficit de chuva são mostrados na Figura 4.14 para o trimestre janeiro, fevereiro e março dos anos de 2014, 2015, 2016 e 2021. A seca de 2014 é discutida em Coelho et al. (2016), a de 2015 em Reboita et al. (2015) e a de 2021 em Freitas et al. (2022, 2023).

As perturbações na atmosfera que se originam em um dado local e afetam o clima de regiões distantes são chamadas de teleconexões ou modos de variabilidade natural do clima (Liu; Alexander, 2007). Grande parte dessas perturbações tem origem em fontes de calor no oceano, ou seja, surgimento "natural" de áreas com anomalias positivas na temperatura da superfície do mar (TSM) que perduram por semanas ou períodos mais longos. Essas áreas anormalmente quentes facilitam a convecção e a liberação de calor latente por condensação, que são os principais responsáveis pelos distúrbios atmosféricos nos trópicos e que têm propagação através de ondas (An et al., 2021). As mudanças na TSM também afetam o padrão de circulação de grande escala em latitudes tropicais associado às células de circulação zonal de Walker (leste-oeste) e meridional de Hadley (norte-sul). Portanto, uma vez que

essas células são perturbadas, podem servir como “pontes atmosféricas” para causar variabilidade no clima de regiões distantes (Liu; Alexander, 2007; An et al., 2020).

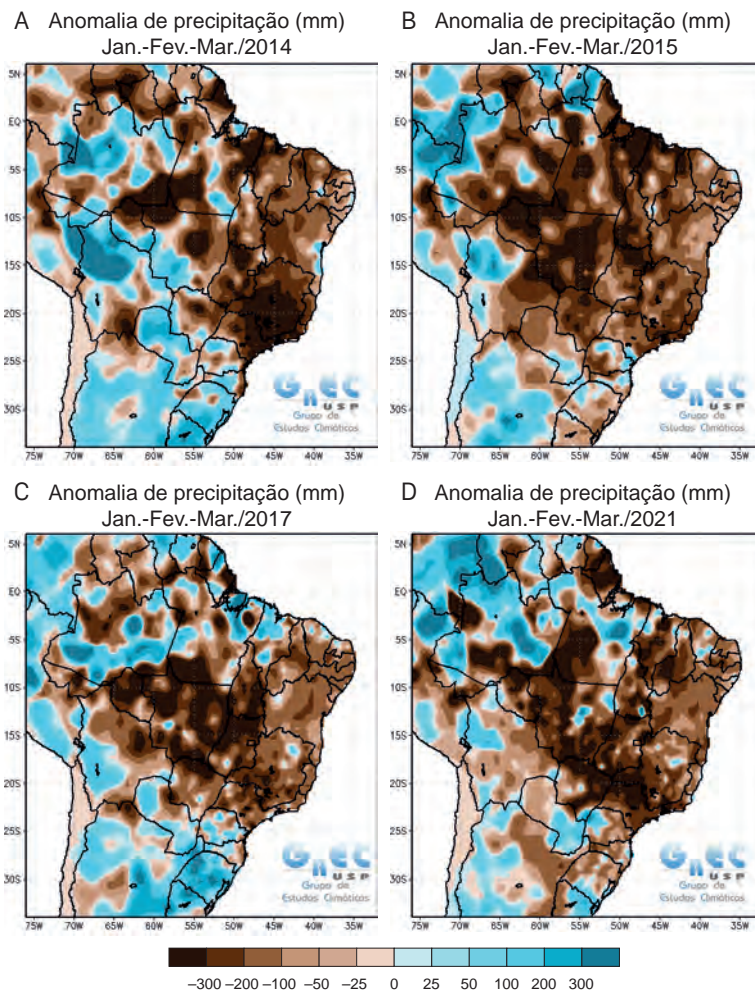


Figura 4.14. Anomalias de precipitação (mm) no trimestre janeiro-fevereiro-março dos anos 2014 (A); 2015 (B); 2017 (C) e (D) 2021 com base na climatologia do período de 1981 a 2010 obtida com os dados do Climate Prediction Center (CPC).

Fonte: GrEC-USP.

O padrão de teleconexão mais amplamente conhecido e discutido é o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS, ou em inglês, El Niño Southern Oscillation – ENSO). Entretanto, também há outros modos de variabilidade, com diferentes escalas temporais de atuação, que impactam o clima do Cerrado, como: Oscilação de Madden-Julian, Dipolo do Oceano Índico, Dipolo do Atlântico Subtropical, Modo Anular Sul e Padrão Pacífico-América do Sul. Além disso, a ocorrência concomitante de diferentes padrões de variabilidade pode acentuar os efeitos anômalos no clima de uma dada região; já quando os efeitos se contrapõem, podem causar pouco ou nenhum impacto. O conhecimento desses padrões e de suas persistências são informações básicas nos prognósticos climáticos nas escalas subsazonal e sazonal (Silva et al., 2021; Reboita et al., 2022). Para auxiliar os previsores de clima, há índices que monitoram o padrão das teleconexões (Souza et al., 2021), e alguns portais, como o da Universidade Federal de Itajubá, disponibilizam uma ferramenta online para monitoramento de vários índices atmosféricos e oceânicos⁴ que afetam a AS e, consequentemente, o bioma Cerrado.

4.4 Oscilação de Madden-Julian

A Oscilação de Madden-Julian (OMJ; ou no inglês Madden-Julian Oscillation – MJO) é uma célula de circulação zonal que se inicia na região equatorial no oceano Índico, associada à intensa convecção, e se propaga para leste com uma frequência de 30 a 60 dias; por isso, é denominada de oscilação intrassazonal (Jones et al., 2021). A localização do núcleo convectivo, que se inicia no oceano Índico tropical e se propaga para leste, irá definir as fases da OMJ que variam de 1 (local inicial) a 8. Durante as fases da OMJ, há regiões na banda tropical que têm favorecimento para a convecção (formação de chuva) enquanto outras têm para subsidência (desfavorecimento à precipitação).

Na AS, a OMJ afeta a precipitação nos trópicos e subtropicais, e um exemplo se dá por meio da modulação da ZCAS (Carvalho et al., 2004).

⁴ Disponível em: <https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/>

A organização da precipitação na AS ocorre nas fases 8, 1 e 2 da OMJ, como é mostrado na Figura 4.15 obtida de Grimm (2019). Já o desfavorecimento ocorre, principalmente, nas fases 4, 5 e 6.

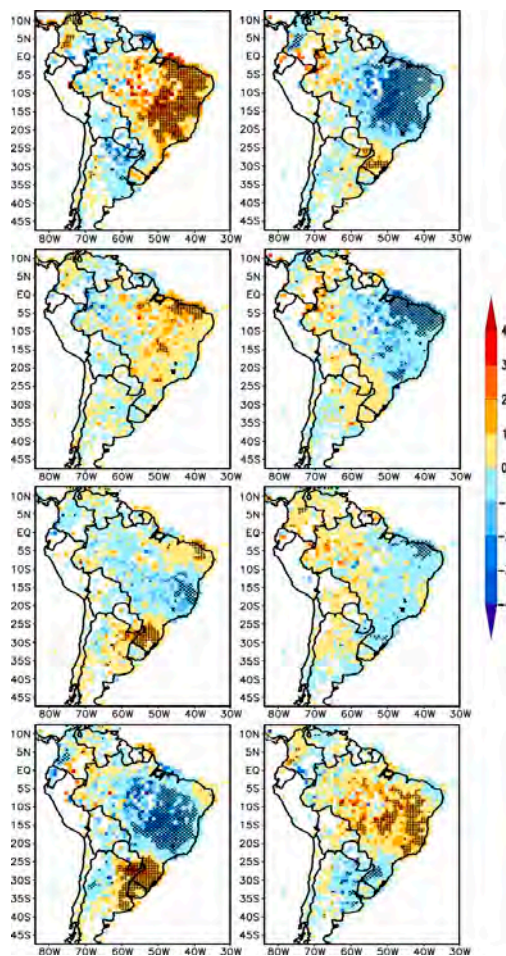


Figura 4.15. Composição das anomalias de precipitação (mm/dia) em cada fase da Oscilação de Madden-Julian (OMJ) durante o verão austral, filtradas na banda de 20 a 90 dias. Cores tendendo ao marrom indicam anomalias positivas e tendendo ao azul, negativas. As regiões hachuradas indicam anomalias com significância estatística maior do que 90%.

Fonte: Grimm (2019).

4.5 El Niño-Oscilação Sul

O ENOS é um fenômeno de acoplamento oceano-atmosfera, cuja componente oceânica é o El Niño (La Niña), caracterizada por anomalias positivas (negativas) de TSM (Figura 4.16) no Pacífico tropical central e leste (Philander, 1985, 1990), e a atmosférica é a Oscilação Sul, caracterizada por mudança no sinal das anomalias de pressão atmosférica entre Tahiti e Darwin, com pressão abaixo (acima) da média no setor central-leste (oeste) do Pacífico tropical, durante a ocorrência de El Niño (La Niña). Um evento ENOS dura, em média, de 6 a 18 meses e ocorre com frequência de 2 a 7 anos, por isso a denominação de evento com variabilidade interanual (Philander, 1985, 1990; Taschetto et al., 2020).

Durante a fase quente do ENOS, isto é, o El Niño, os ventos alísios ficam enfraquecidos, enquanto que na fase fria, La Niña, eles são mais intensos. Existem estudos que mostram que o El Niño possui três configurações (Andreoli et al., 2017; Cai et al., 2020; Reboita et al., 2021b), às quais também se atribui o nome de diversidade (ou flavors) do ENOS: o El Niño Pacífico Leste, também chamado de canônico, em que o aquecimento da TSM inicia na costa oeste da AS e migra em direção ao centro do Pacífico tropical (Cane, 1986); o El Niño Modoki, em que as anomalias positivas de TSM surgem no centro do oceano Pacífico tropical; e o MIX, em que as águas quentes surgem quase de forma concomitante nos setores central e leste do Pacífico equatorial. Em geral, esses tipos de El Niño causam mais variabilidade na intensidade das anomalias de precipitação na AS do que na localização delas (Andreoli et al., 2017; Reboita et al., 2021b).

A ocorrência de eventos ENOS modifica a posição e intensidade das células de circulação de Walker (zonal) e de Hadley (meridional), contribuindo para a dispersão de ondas de Rossby em direção aos extratropicais (teleconexão trópicos-extratropicais). Essas mudanças na circulação global impactam o clima do Brasil. Os eventos de El Niño, ao deslocarem a atividade convectiva do setor oeste para o setor central

e leste do oceano Pacífico equatorial, favorecem movimentos subsidentes sobre o oceano Atlântico equatorial e regiões Norte e Nordeste do Brasil. Enquanto na Amazônia, a subsidência da célula de Walker enfraquece a convecção, no Nordeste a subsidência é dominante, levando a episódios de déficit de precipitação. Durante os eventos de La Niña, a célula de Walker se torna mais intensa, contribuindo para fortalecer os movimentos ascendentes na Amazônia, o que favorece o aumento da precipitação (Ambrizzi et al., 2004; Hastenrath, 2012; Wiedermann et al., 2021).

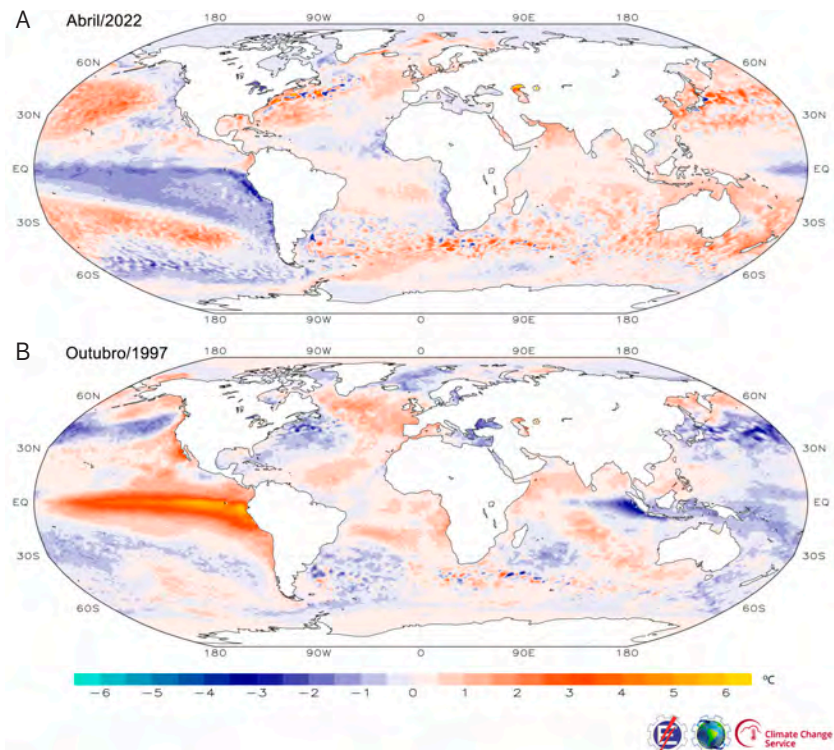


Figura 4.16. Anomalias da temperatura da superfície do mar (°C) indicando um episódio de (a) La Niña e (b) El Niño.

Fonte: Souza e Reboita (2021).

Grimm (2021) apresenta uma figura esquemática das anomalias das células de Hadley e Walker durante eventos de El Niño na primavera austral (outubro a dezembro), indicando um enfraquecimento da célula de Hadley durante esses eventos. Portanto, isso configura outro fator que ajuda a reduzir a precipitação na região Norte do Brasil. Pereira et al. (2017) também apresentam uma figura esquemática, mas mostrando os impactos do evento El Niño no ano de 2015 na circulação atmosférica e precipitação na AS (Figura 4.17). É mostrado que as anomalias negativas de precipitação dominaram na maior parte do continente, enquanto as anomalias positivas se concentraram no Rio Grande do Sul e Uruguai.

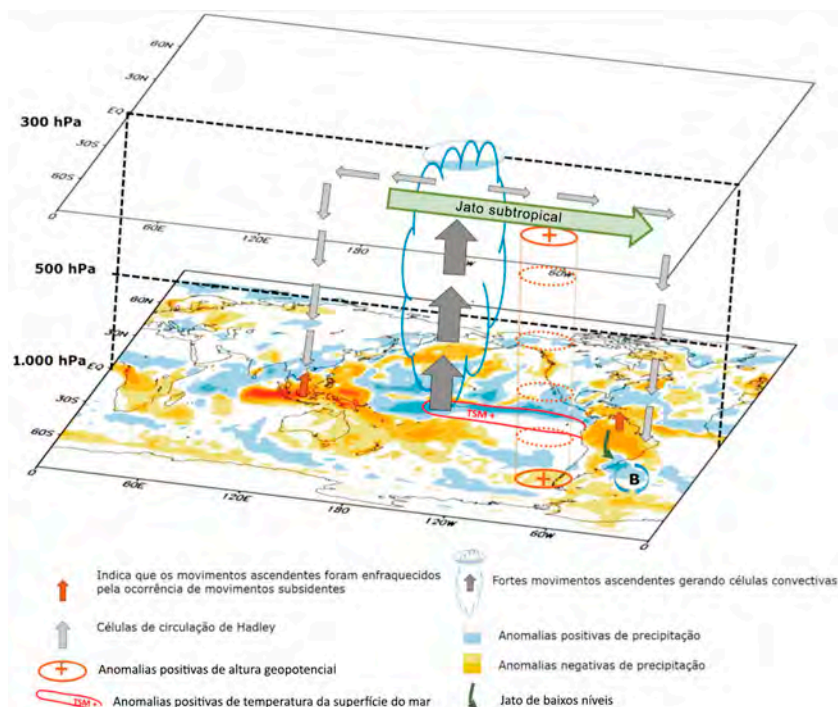


Figura 4.17. Exemplo dos impactos do evento El Niño no ano de 2015 na circulação geral da atmosfera durante os meses de setembro, outubro e novembro de 2015.

Fonte: Pereira et al. (2017).

Durante os eventos El Niño, ocorre a configuração de ondas de Rossby quase estacionárias para os extratropicais, sendo esse padrão de onda no hemisfério sul chamado de Padrão Pacífico-América do Sul (PSA) (Mo; Nogués-Paegle, 2001; Irving; Simmonds, 2016). A configuração do PSA durante os eventos El Niño (Figura 4.18) mostra um padrão de onda barotrópico (com características similares em toda a troposfera), com anomalias ciclônicas no sudoeste da AS, que se estendem para sudeste cruzando a AS e tendo maior intensidade no oceano Atlântico, e anomalias anticiclônicas na costa do sudeste do Brasil (região dos subtropicais) (Grimm et al., 1998a). Esse padrão de onda ajuda a modular a trajetória do JBN a leste dos Andes para o sudeste da AS (Silva et al., 2009; Martinez; Dominguez, 2014; Pereira et al., 2017; Grimm, 2021) e também para gerar anomalias de baixa pressão no oceano próximo ao Uruguai e sul do Brasil (Figura 4.17), que, por sua vez, ajudam na modulação do JBN para as maiores latitudes. A combinação do suporte de calor e umidade transportado pelo JBN com mecanismos de divergência de massa em altos níveis propiciados pelo jato subtropical sobre o continente cria condições favoráveis à formação de sistemas convectivos de mesoescala e, consequentemente, ao aumento da precipitação no sudeste da AS (Grimm et al., 1998a; Salio et al., 2007). Portanto, a umidade transportada pelo JBN até passa pelo Cerrado, mas a contribuição para a precipitação ocorre no sudeste da AS. Assim, em geral, esperam-se anomalias negativas de precipitação no Cerrado. Essas anomalias secas são mais configuradas sobre Goiás, Tocantins e parte de Mato Grosso. Já o setor mais ao sul do Cerrado pode ter sinal mais variável e/ou se assemelhar ao padrão das anomalias do sul do Brasil (Grimm et al., 1998b).

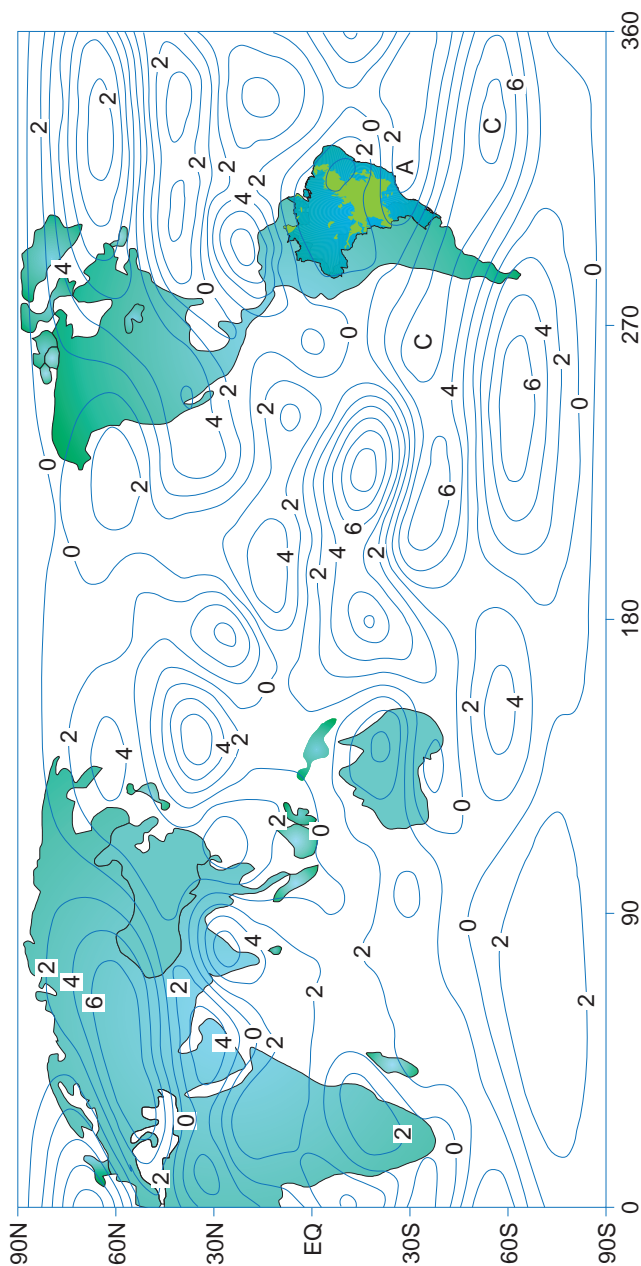


Figura 4.18. Composição das anomalias de função de corrente em 200 hPa em eventos de El Niño registrados nos meses de novembro de 1979, 1982 e 1986 (intervalos de contorno são de $2 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$). Valores positivos (negativos) das anomalias de função de corrente indicam anomalias de circulação ciclônica – C – (anticiclônica – A) no hemisfério sul.

Fonte: Adaptado de Grimm et al. (1998a).

Durante os episódios de La Niña, o PSA possui padrão praticamente oposto ao mostrado na Figura 4.18 (Grimm et al., 1998a; Grimm, 2021), de forma que as anomalias de circulação anticiclônica dominam do sudoeste da AS ao oceano Atlântico e as ciclônicas, acerca da costa do sudeste do Brasil. Enquanto esse padrão inibe o deslocamento do JBN para o sudeste da AS, facilita seu deslocamento para a costa sudeste do Brasil, contribuindo com a chuva no Centro-Oeste e Sudeste do país. Esse padrão é mostrado no Atlas virtual⁵ que complementa o estudo de Reboita et al. (2021a). Portanto, em anos de La Niña, também é comum ver episódios da ZCAS deslocados para norte, isto é, sobre o norte de Minas Gerais.

Até aqui, mencionou-se que os episódios de ENOS afetam o volume da precipitação. Por exemplo, a precipitação é geralmente suprimida sobre a região tropical da AS devido ao reforço da subsidência em grande escala pela circulação de Walker sobre a Amazônia em eventos de El Niño. Entretanto, o ciclo de vida da estação chuvosa (início e fim do período chuvoso) também pode ser afetado. Os eventos de El Niño (La Niña) intensos podem atrasar (adiantar) o início da estação chuvosa na AS (Nieto-Ferreira; Rickenbach, 2011), o que pode estar associado à disponibilidade dos fluxos de calor latente e sensível de superfície durante o período pré-estação chuvosa, como discutido por Fu e Li (2004) e sumariado em Reboita et al. (2023).

Fernandes e Grimm (2023) analisaram o impacto das fases do ENOS nas fases da OMJ e como isso afeta o período chuvoso (o período de monção) na AS. Os autores destacam que o ENOS pode modificar a relação entre a OMJ e as chuvas na AS, não apenas porque altera as características das anomalias convectivas e da propagação da OMJ, mas também porque cria diferentes estados básicos pelos quais as perturbações se propagam em direção à AS. Um dos resultados obtidos é que em ambas as fases do ENOS (El Niño e La Niña), há anomalias positivas de precipitação na região da ZCAS nas fases 8 e 1 e anoma-

⁵ Disponível em: <https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/atlas/?ind=SAD&var=precwnd850>

lias negativas nas fases 4 e 5 da OMJ quando a comparação é realizada com períodos de neutralidade do ENOS. A modulação das fases do ENOS com outros modos de teleconexão e a chuva na AS também pode ser visualizada no Atlas virtual que complementa o estudo de Reboita et al. (2021a).

4.6 Oscilação Decadal do Pacífico

Os impactos dos episódios de El Niño e La Niña no clima da AS podem ser fortalecidos ou enfraquecidos quando da ocorrência concomitante com as fases da Oscilação Decadal do Pacífico (ou no inglês Pacific Decadal Oscillation – PDO), que têm duração de 20 a 30 anos (NASA, 2023). Assim, a PDO é uma resposta às variações lentas na TSM. Na fase positiva da PDO, o oeste do oceano Pacífico Norte apresenta TSM mais fria que a média climatológica, e a costa dos Estados Unidos em direção às latitudes tropicais apresenta águas mais quentes. Além disso, a fase positiva está associada a um sistema de baixa pressão atmosférica, conhecido como baixa das Aleutas. Na fase negativa da PDO, o padrão de anomalias é inverso.

Tanto em Kayano e Andreoli (2021) quanto em Reboita et al. (2021a) são apresentadas as anomalias de precipitação na AS combinadas em eventos El Niño/La Niña e as diferentes fases da PDO. Em geral, quando há ocorrência do fenômeno El Niño (La Niña) e fase positiva (negativa) da PDO, os impactos no clima da AS, descritos no item anterior, são intensificados. Além disso, Kayano e Andreoli (2021) mencionam que a célula anômala de Walker se torna mais intensa quando da ocorrência de El Niño e PDO positiva.

4.7 Dipolo do Oceano Índico

Outro mecanismo de teleconexão que pode impactar o Cerrado é o Dipolo do Oceano Índico (ou no inglês Indian Ocean Dipole – IOD), caracterizado por anomalias de TSM com sinais opostos entre os setores leste e oeste do Oceano Índico Tropical. Na fase positiva (negativa),

predominam águas mais quentes (frias) no setor oeste e frias (quentes) no setor leste do oceano Índico (Saji et al., 1999). O IOD contribui para a propagação de ondas de Rossby nas latitudes médias do hemisfério sul, o que afeta a circulação atmosférica sobre o oceano Atlântico e AS (Cai et al., 2012; Sena; Magnúsdóttir, 2020). Como exemplos desses efeitos, têm-se as mudanças na intensidade do ASAS que, por sua vez, afetam o JBN, e a alteração na posição climatológica da ZCIT e da ZCAS, tendo como consequência a mudança no regime de precipitação na região onde esses sistemas sinóticos atuam (Sena; Magnúsdóttir, 2020; Reboita et al., 2021a). Conforme mostra Reboita et al. (2021a), numa dada fase do IOD, em anos sem eventos ENOS, há uma resposta variável na precipitação da AS. Por exemplo, em dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), na fase negativa, há excesso de chuva entre o sudeste do Brasil e a Bahia (Figura 4.19), enquanto em MAM ocorre déficit (figura não mostrada).

Alguns estudos têm indicado que a fase positiva do IOD tem sinal mais claro na AS durante a primavera (Chan et al., 2008), com anomalias positivas de precipitação no sudeste da AS e negativas no centro do Brasil. Esse padrão é influenciado por um trem de ondas emanado do oceano Índico, que favorece uma anomalia anticiclônica em baixos níveis na costa do Brasil que atua intensificando os ventos alísios e, esses, o JBN a leste dos Andes. Com o predomínio dessas anomalias anticiclônicas na costa do Brasil, o deslocamento do JBN para tal região é dificultado, e ele migra para o sudeste da AS. Esse fato, associado com a divergência anômala no Leste e Centro do Brasil causada pela extensão para norte (40°W 20°S) do anticiclone anômalo em baixos níveis da atmosfera, inibe a convecção, resultando em diminuição da precipitação nessas áreas (Chan et al., 2008). Ressalta-se que o padrão descrito pode ser reforçado quando da ocorrência concomitante de El Niño, pois este causa anomalias de circulação similares às da fase positiva do IOD na AS (Figura 4.19 A e 4.19 B).

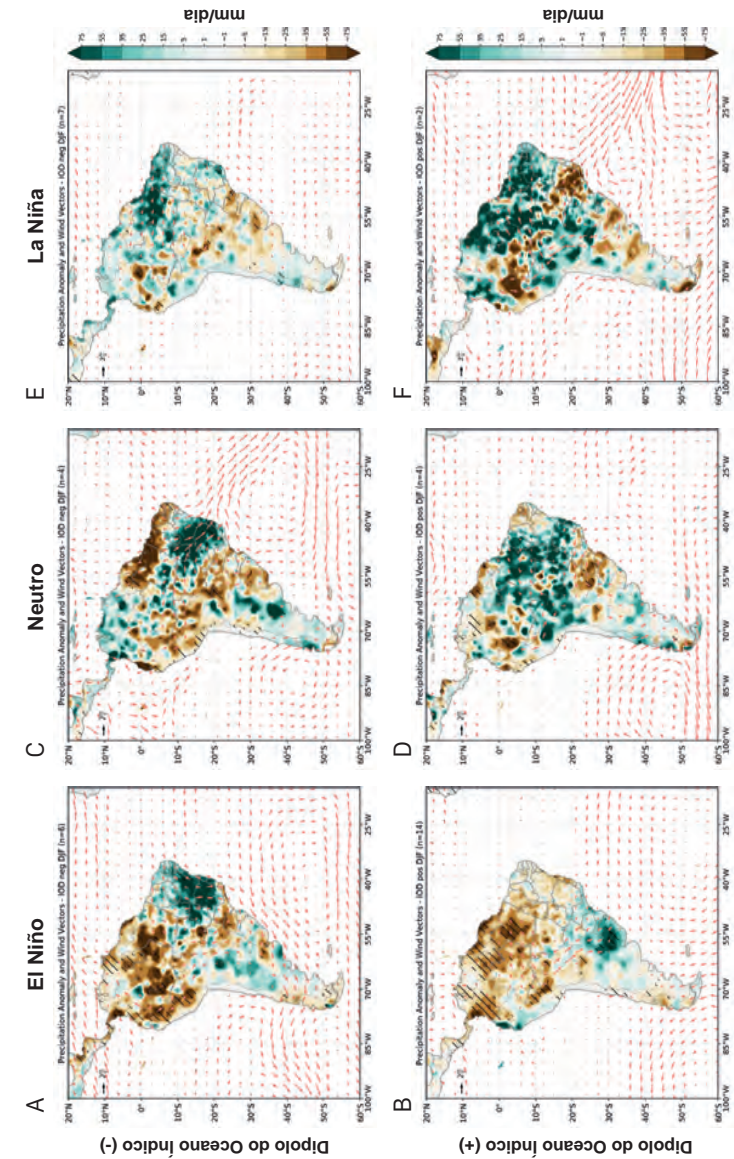


Figura 4.19. Impacto do Dipolo do Oceano Índico (IOD) na precipitação (mm/dia) do verão na América do Sul nas suas diferentes fases e ocorrendo concomitantemente com episódios de El Niño (A e B); anos neutros (C e D); episódios de La Niña (E e F).

No ano de 2019, o índice do IOD⁶ mostrou valores extremos entre setembro e novembro (0,893, 0,964 e 0,835, respectivamente). Concomitantemente com esses valores extremos, apareceram anomalias de altura geopotencial mais configuradas na média troposfera do que em baixos níveis no Brasil Central, região Sudeste e Oceano Atlântico. A Figura 4.20 indica que nos 3 meses ocorreram anomalias negativas de precipitação no Brasil Central e região Sudeste, e em outubro também ocorreu um núcleo com anomalias positivas no sudeste da AS; esse padrão se assemelha ao do estudo de Chan et al. (2008).

Em 500 hPa, fica evidente que o ASAS esteve mais intenso em setembro e outubro de 2019 (Figura 4.20). Como o ASAS é uma característica da circulação geral na atmosfera, apresenta subsidência que pode ter sido reforçada pelo trem de ondas associado ao IOD (note que aqui é apenas um estudo exploratório e que não leva em conta a influência de outros padrões de teleconexão importantes na AS). Logo, a subsidência do ASAS pode ter contribuído para inibir a convecção no Cerrado e sudeste do Brasil, resultando nas anomalias negativas de precipitação mostradas na Figura 4.20 e também nas anomalias positivas de temperatura do ar em alguns setores do continente. Por fim, ressalta-se que a fase positiva da IOD pode impactar o início da estação chuvosa, causando atraso no centro e sudeste do Brasil.

⁶ Disponível em: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data

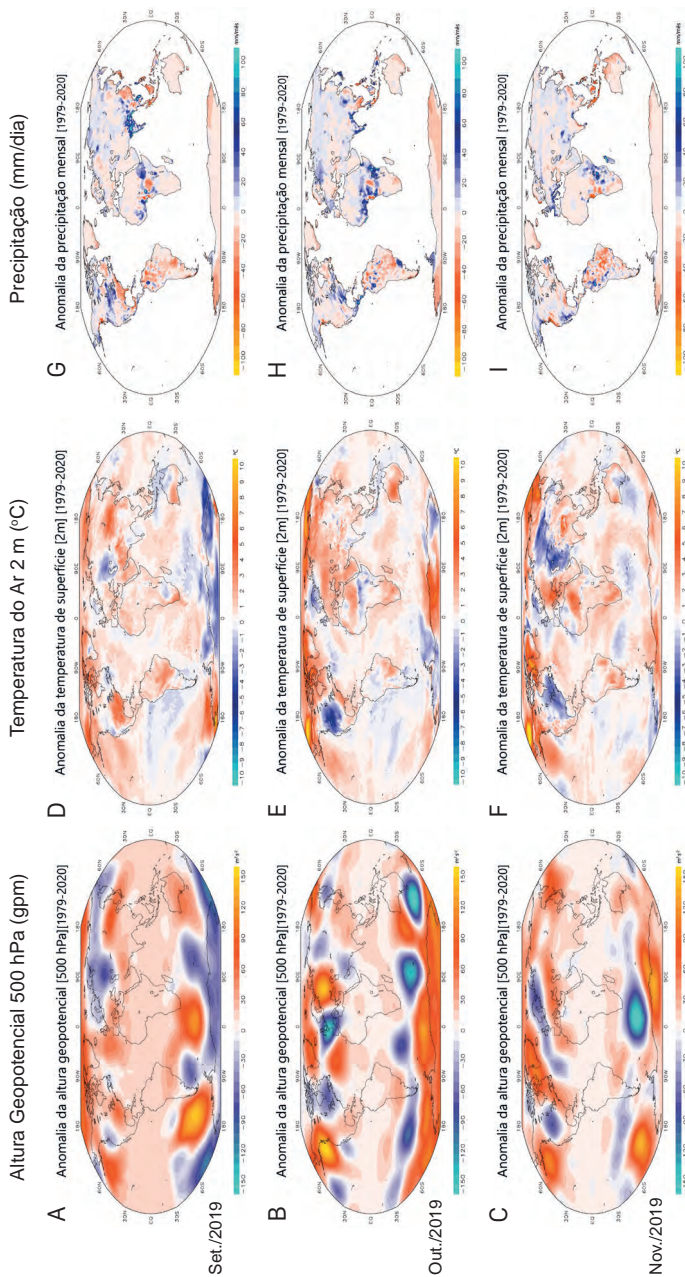


Figura 4.20. Anomalias, nos meses de setembro, outubro e novembro de 2019, de altura geopotencial (gpm) em 500 hPa, temperatura do ar a 2 m e altura (°C) e precipitação (mm/dia).
Fonte: Souza e Reboita (2021).

4.8 Modo Anular Sul

O Modo Anular Sul (ou no inglês Southern Annular Mode – SAM ou Antarctic Oscillation – AAO) – é o principal modo de variabilidade climática extratropical no hemisfério sul, caracterizado por anomalias de altura geopotencial em 700 hPa com sinais opostos entre as cercanias da Antártica e as latitudes próximas a 45°S. A fase positiva (negativa) da AAO é definida quando há anomalias negativas de altura geopotencial (positivas) nas cercanias da Antártica e positivas (negativas) nas latitudes médias (Thompson; Wallace, 1998, 2000).

Na fase positiva da AAO, observa-se um tripolo na frequência dos ciclones no Atlântico, com maior frequência desses sistemas na costa sudeste do Brasil, menor na costa sul da Argentina e mais próximo à Antártica (Reboita et al., 2015, 2021a). Os ciclones na costa sudeste podem ser favorecidos pela anomalia negativa de pressão atmosférica associada a um trem de onda de Rossby extratropical que se propaga do Pacífico ao Atlântico (Figura 4.21). Esse padrão parece contribuir para a organização da umidade, que é transportada do continente para o oceano, podendo causar chuva em Minas Gerais e déficit no sul do país. Alguns estudos também sugerem que a configuração do trem de onda de Rossby durante a fase positiva da AAO seja importante para modular a ocorrência da ZCAS, contribuindo para aumentar a precipitação na região de atuação desse sistema. Na fase negativa da AAO, a precipitação aumenta no sul do país (Silvestri; Vera, 2003; Carvalho et al., 2005; Reboita et al., 2009, 2015; Vasconcellos; Cavalcanti, 2010; Rosso et al., 2018).

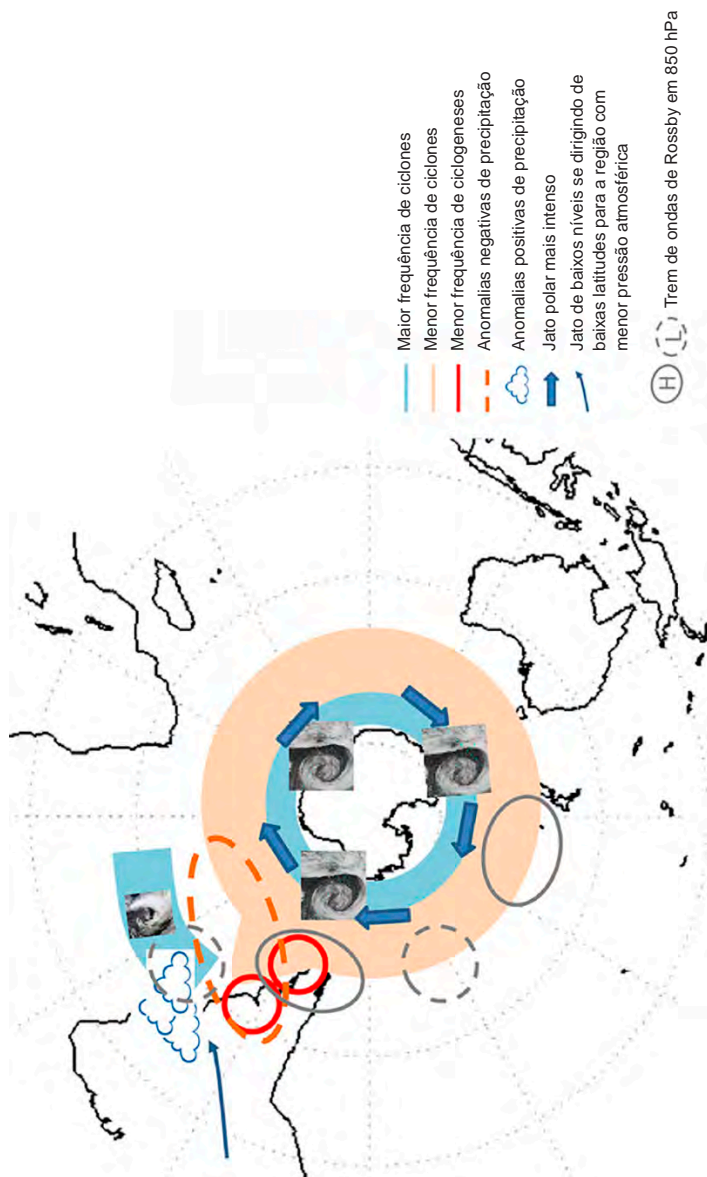


Figura 4.21. Modelo conceitual dos sistemas atmosféricos em períodos com fase positiva do Modo Anular Sul.
Fonte: Reboita et al. (2021a).

4.9 Dipolo Subtropical do Atlântico Sul

O Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (em inglês South Atlantic Subtropical Dipole – SASD) (Morioka et al., 2011), também conhecido como Dipolo do Oceano Atlântico Sul (South Atlantic Ocean Dipole – SAOD) (Nnamchi et al., 2011), é caracterizado por anomalias de TSM de sinais opostos entre o Atlântico Sul tropical e extratropical. O índice do SASD é calculado nas áreas entre 10° – 30° W e 30° – 40° S (0° – 20° W e 15° – 25° S), enquanto o do SAOD é calculado considerando as áreas entre 0° – 40° W e 25° – 40° S (10° E– 20° W, 0° – 15° S). A razão dessa distinção nas áreas decorre da sazonalidade na posição do ASAS (Nnamchi et al., 2016). Existem estudos mostrando que o SASD ocorre independentemente das condições do ENOS (Bombardi et al., 2014). O SASD, quando caracterizado por anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Sul extratropical e negativas em direção ao norte, incluindo a costa sudeste do Brasil (fase negativa do SASD), está relacionado ao aumento da ciclogênese próximo ao sudeste do Brasil, o que ajuda a organizar a convecção da ZCAS, aumentando a precipitação durante o período chuvoso (Bombardi et al., 2014).

4.10 Dipolo de precipitação entre as regiões Sul e Sudeste do Brasil

O ASAS é um sistema de alta pressão semipermanente no oceano Atlântico Sul, com variabilidade longitudinal (deslocamento leste-oeste), latitudinal (norte-sul) e sazonal (Reboita et al., 2019). No inverno, o ASAS está intensificado e expandido para o oeste, atuando sobre o sudeste do Brasil, enquanto no verão está retraído para leste e auxilia no transporte de umidade do oceano para o leste do Brasil. A variabilidade longitudinal do ASAS em escala sinótica pode afetar a precipitação nas regiões sul e sudeste do país. Assim, Souza e Reboita (2021) apre-

sentam o Índice do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (IASAS), o qual é calculado mediante a diferença de anomalias mensais de PNMM entre as regiões sudeste (SE: 25°S–15°S, 50°W–40°W) e sul (SUL: 37,5°S–27,5°S, 60°W–50°W). Quando o índice é positivo (negativo), as anomalias de pressão ao nível médio do mar são positivas (negativas) no sudeste e negativas (positivas) no sul, sugerindo menores (maiores) volumes de precipitação no sudeste (sul) do país.

4.11 Considerações finais

Esse capítulo abordou os principais sistemas atmosféricos atuantes no Cerrado e os mecanismos de teleconexões associados à variabilidade climática. Entre os sistemas atmosféricos que contribuem para a estação chuvosa destaca-se a Zona de Convergência do Atlântico Sul. Já no período seco, quando há precipitação, os principais causadores são os sistemas frontais e as perturbações em médios e altos níveis da atmosfera. A estação chuvosa (seca) em anos sucessivos pode apresentar grandes variações, o que decorre da influência dos mecanismos de variabilidade climática como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul. Entretanto, vale ressaltar que há diferentes modos de variabilidade atuando concomitantemente e que podem atuar reforçando ou enfraquecendo os impactos por eles causados no clima. Assim, o monitoramento e previsão de tempo e clima no Cerrado brasileiro é de grande importância para várias atividades socioeconômicas como as agrícolas.

4.12 Referências

- ABREU, M. C.; LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SOUZA, A.; POBOČÍKOVÁ, I.; FRAGA, M. S.; ABREU, R. C. R. Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 844, 157138, 2017.
- ABREU, R. C. R.; HOFFMANN, W. A.; VASCONCELOS, H. L.; PILON, N. A.; ROSSATTO, D. R.; DURIGAN, G. The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. **Science Advances**, v. 3, e1701284, 2022.

AMBRIZZI, T.; SOUZA, E. B.; PULWARTY, R. S. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on the South American seasonal rainfall. In: DIAZ, H. F.; BRADLEY, R. S. (ed.). **The hadley circulation: present, past and future**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. Cap.3, p. 203-235. (Advances in global change research, 21).

AN, S.-I.; WANG, C.; MECHOSO, C. R. Teleconnections in the atmosphere. In: MECHOSO, C. R. (ed.). **Interacting climates of ocean basins: observations, mechanisms, predictability, and impacts**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Cap. 2, p. 54-88.

ANDREOLI, R. V.; OLIVEIRA, S. S. de; KAYANO, M. T.; VIEGAS, J.; SOUZA, R. A. F. de; CANDIDO, L. A. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374-1390, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4783>

ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R. de; SILVA, F. A. M. da. Veranicos na região dos Cerrados brasileiros: frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 9, p. 993-1003, 1993. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/105462>. Acesso em: 15 mar. 2024.

BEKENSSTEIN, R.; PRICE, C.; MAREEV, E. Is Amazon deforestation decreasing the number of thunderstorms over South America? **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 149, n. 755, p. 2514-2526, July 2023. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.4518>.

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; REBOITA, M. S. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 1553-1568, 2014.

BURTON, C.; KELLEY, D. I.; JONES, C. D.; BETTS, R. A.; CARDOSO, M.; ANDERSON, L. South American fires and their impacts on ecosystems increase with continued emissions. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, e8, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/cli2.8>

BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; PINTO, A. S.; RESENDE, J. C. F.; TAKAHASHI, F. S. C.; VIEIRA, L. C. G. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 655-671, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>

CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAU, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y. -G.; SANTOSO, A.; Ng, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; Geng, T.; Jo, H. -S.; Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Osman, M.; Li, S.; Wu, L.; Karamperidou, C.; Takahashi, K.; Vera, C. Climate

impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, p. 215–31, 2020.

CAI, W.; VAN RENSCH, P.; COWAN, T.; HENDON, H. H. An asymmetry in the IOD and ENSO teleconnection pathway and its impact on Australian climate. **Journal of Climate**, v. 25, p. 6318–6329, 2012.

CANE, M. A. El Niño. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 14, n. 1, p. 43–70, 1986.

CARMO, E. L. I. do; REBOITA, M. S.; MARQUES, R. Evolução temporal das variáveis atmosféricas associadas a casos de frentes frias fortes em Cuiabá, MT, entre 1996 e 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, p. 145–154, 2023.

CARVALHO, L. M. V. de; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.

CARVALHO, L. M. V. de; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of Climate**, v. 18, p. 702–718, 2005.

CHAN, S. C.; BEHERA, S. K.; YAMAGATA, T. Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 14, 2008.

CLIMATE VISUALIZATIONS & ANIMATIONS. Disponível em: climvis.org. Acesso em: 26 jun. 2024.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. da.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3737–3752, 2016. DOI: 10.1007/s00382-015-2800-1.

COUTINHO, L. M. Ecological effects of fire in Brazilian Cerrado. In: HUNTLEY, B. J.; WALKER, B. H. (ed.). **Ecology of tropical savannas**. Berlin: Springer, 1982. p. 273–291. (Ecological Studies, 42).

DURÁN-QUESADA, A. M.; REBOITA, M. S.; GIMENO, L. Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n. 4, p. 612–624, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.673723>

- ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Relationship between daily atmospheric circulation patterns and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events. **Atmosfera**, v. 35, p. 1-25, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.52936>.
- ESCOBAR, G. C. J.; VAZ, J. C. M.; REBOITA, M. S. Circulação atmosférica em superfície associada às friagens no centro-oeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, p. 241-54, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_241_254.
- EUMETRAIN. Bolivian high and its relationship with deep convection over Northern Argentina. 2012. Disponível em: <https://resources.eumetrain.org/satmanu/CM4SH/BoHi/index.htm>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- FERNANDES, L. G.; GRIMM, A. M. ENSO modulation of global MJO and its impacts on South America. **Journal of Climate**, v. 36, n. 22, p. 7715-7738, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0781.1>
- FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A new look into the South America precipitation regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, 873, 2022.
- FIDELIS, A.; ALVARADO, S. T.; BARRADAS, A. C. S.; PIVELLO, V. R. The year 2017: megafires and management in the Cerrado. **Fire**, v. 1, n. 3, 49, 2018. DOI:10.3390/fire1030049.
- FREITAS, A. A.; DRUMOND, A.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S.; SILVA, B. C.; UVO, C. B. Drought assessment in São Francisco river basin, Brazil: characterization through SPI and associated anomalous climate patterns. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, 41, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13010041>.
- FREITAS, A. A.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B.; DRUMOND, A.; FERRAZ, S. E. T. Atmospheric and oceanic patterns associated with extreme drought events over the Paraná Hydrographic Region, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 1, 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli11010012>.
- FU, R.; LI, W. The influence of the land surface on the transition from dry to wet season in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 97-110, 2004. DOI 10.1007/s00704-004-0046-7.
- GOMES, L.; MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? **Forest Ecology and Management**, v. 417, p. 281-290, May 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.032>.
- GrEC-USP. **Monitoramento Climático**. Disponível em http://www.grec.iag.usp.br/data/index_BRA.php. Acesso em: 20 nov. 2023.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul. In: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J. (org.). **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 176 p.

GRIMM, A. M. Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 907-932, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04622-6>.

GRIMM, A. M.; CARDOSO, A. D. O.; FERRAZ, S. E.; SORIANO, B. Há impacto significativo de eventos El Niño e La Niña no Centro-Oeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO DA FLISMET, 8., 1998, Brasília, DF. [Anais]. [S.l.: s.n., 1998b.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998a. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2).

HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. **Climatic Change**, v. 112, p. 243-251, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1>.

INMET. **Levantamento da onda de frio que atuou sobre o Brasil no final de julho de 2021**. 2021. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/LEVANTAMENTO_MASSA-DE-AR-FRIO-FINAL-DE-JULHO_vCGMADP.pdf#page=1&zoom=auto,-100,842. Acesso em: 29 maio 2023

INPE. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Centro de Previsão de tempo e estudos climáticos**. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 20 nov. 2023

IRVING, D.; SIMMONDS, I. A new method for identifying the Pacific–South American pattern and its influence on regional climate variability. **Journal of Climate**, v. 29, n. 17, p. 6109-6125, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0843.1>.

JONES, C.; KAYANO, M. T.; SILVA DIAS, P. L.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade intrassazonal. In: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J. (org.). **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. p. 85-95.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste. In: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J. (org.). **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. p. 25-42.

LENTERS, J. D.; COOK, K. H. On the origin of the Bolivian High and related circulation features of the South American climate. **Journal of the**

Atmospheric Sciences, v. 54, n. 5, p. 656-678, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<3C0656:OTOOTB>3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<3C0656:OTOOTB>3E2.0.CO;2).

LIU, Z.; ALEXANDER, M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007. Paper number 2005RG000172. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005RG000172>.

MARINHA DO BRASIL. **Cartas sinóticas**. Disponível em <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>. Acesso em: 18 nov. 2023

MARKOWSKI, P. An overview of atmospheric convection. In: GIAIOTTI, D. B.; STEINACKER, R.; STEL, F. (ed.). **Atmospheric convection: research and operational forecasting aspects**. Vienna: Springer, 2007. p. 1-6. (International Centre for Mechanical Sciences. Courses and Lectures, 475).

MARTINEZ, J. A.; DOMINGUEZ, F. Sources of atmospheric moisture for the La Plata river basin. **Journal of Climate**, v. 27, p. 6737-6753, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.1>.

METEOBLUE. Disponível em <https://www.meteoblue.com>. Acesso em: 24 jun. 2023.

MO, K. C.; NOGUÉS-PAEGLE. The Pacific–South American modes and their downstream effects. **International Journal of Climatology**, v. 21, p. 1211-1229, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.685>.

MORIOKA, Y.; TOZUKA, T.; YAMAGATA, T. On the growth and decay of the subtropical dipole mode in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 24, n. 21, p. 5538-5554, Nov. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4010.1>.

NASA. **El Niño/La Niña Watch & PDO**. 2023. Disponível em: <https://shre.ink/DhFI>. Acesso: 31.05.2023.

NIETO-FERREIRA, R.; RICKENBACH, T. M. Regionality of monsoon onset in South America: a three-stage conceptual model. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 9, p. 1309-1321, July 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2161>.

NNAMCHI, H. C.; LI, J.; ANYADIKE, R. N. C. Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean? **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D15, Aug. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JD015579>.

NNAMCHI, H. C.; LI, J.; KUCHARSKI, F.; KANG, I-S.; KEENLYSIDE, N. S.; CHANG, P.; FARNETI, R. An equatorial–extratropical dipole structure of the Atlantic Niño. **Journal of Climate**, v. 29, n. 20, p. 7295-7311, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0894.1>.

NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian climate: main features. **Amazonia and Global Change**, v. 186, p. 149-162, 2009. DOI:10.1029/GM186.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2).

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; MENDES, D.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SILVA JÚNIOR, C. A.; GOIS, G. de; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, M. V.; LYRA, G. B.; TEODORO, P. E.; PIMENTEL, L. C. G.; LIMA, M.; SANTIAGO, D. B.; ROGÉRIO, J. P.; MARINHO, A. A. R. Fire foci in South America: impact and causes, fire hazard and future scenarios. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, Part 2, 103623, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103623>.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; TEODORO, P. E.; SILVA JUNIOR, C. A.; BAILO, F. H. R.; GAVA, R.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; GOIS, G. de; CORREIA FILHO, W. L. F.; LIMA, M.; SANTIAGO, D. B.; FREITAS, W. K.; SANTOS, P. J.; COSTA, M. S. Fire foci related to rainfall and biomes of the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 282-283, 107861, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107861>.

PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293-310, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863220011.

PHILANDER, S. G. El Niño and La Niña. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 23, p. 2652-2662, 1985. DOI:10.1175/1520-0469(1985)042<2652:ENALN>2.0.CO;2.

PHILANDER, S.G. **El Niño and La Niña and the Southern Oscillation**. San Diego, CA: Academic Press, 1990. (International Geophysics Series, 46).

POPE, R. J.; ARNOLD, S. R.; CHIPPERFIELD, M. P.; REDDINGTON, C. L. S.; BUTT, E. W.; KESLAKE, T. D.; FENG, W.; LATTER, B. G.; KERRIDGE, B. J.; SIDDANS, R.; RIZZO, L.; ARTAXO, P.; SADIQ, M.; TAI, A. P. K. Substantial increases in Eastern Amazon and Cerrado biomass burning-sourced tropospheric ozone. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 3, e2019GL084143, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL084143>.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna national park: rethinking management strategies. **Environmental Management**, v. 26, p. 676-684, 2000.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; FERREIRA, G. W. S.; REHBEIN, A.; DRUMOND, A.; ROCHA, R. P. da; SOUZA, C. A. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New**

York Academy of Sciences, v. 1504, n. 1, p. 116-153, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1111/nyas.14592>.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; ROCHA, R. P. da The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, 8, 2019.

REBOITA, M. S.; FERREIRA, G. W. D. S.; RIBEIRO, J. G. M., ROCHA, R. P. da; RAO, V. B. South American Monsoon Lifecycle Projected by Statistical Downscaling with CMIP6-GCMs. **Atmosphere**, v. 14, n. 9, 1380, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14091380>.

REBOITA, M. S.; KUKI, C. A. C.; FERREIRA, G. W. S.; TORRES, F. L. R.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M. "Drivers" da previsão climática sazonal: uma revisão da literatura. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 1-25, 2022.

REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, D. M.; FREITAS, C. H.; OLIVEIRA, G. M.; PEREIRA, R. A. A. Anomalias dos padrões sinóticos da atmosfera na América do Sul nos meses de janeiro de 2014 e 2015. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 1-12, 2015.

REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, K. R.; CORRÊA, P. Y. C.; RODRIGUES, R. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 729-742, 2021b.

REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, Mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005>.

RISSI, M. N.; BAEZA, M. J.; GORGONE-BARBOSA, E.; ZUPO, T.; FIDELIS, A. Does season affect fire behaviour in the Cerrado? **International Journal of Wildland Fire**, v. 26, p. 427-433, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF14210>.

ROSSO, F. V.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T.; ROBLES, T. C. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9, 431, 2018. DOI: [10.3390/atmos9110431](https://doi.org/10.3390/atmos9110431).

SAJI, N. H.; GOSWAMI, B. N.; VINAYACHANDRAN, P. N.; YAMAGATA, T. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. **Nature**, v. 401, p. 360-363, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1038/43854>.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1290-1309, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>.

SANTOS, B. A.; OLIVEIRA, M. D. S.; SIVA, P. N.; SANTOS, J. G. M.; MATTOS, E. V.; REBOITA, M. S. Distribuição espaço-temporal dos focos de calor no estado de

Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p.64-84, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_3_64_84.

SENA, A. C. T.; MAGNUSDOTTIR, G. Indian Ocean Dipole induces rainfall anomalies in the South American Monsoon. January 15, 2020. 2020. Accessed September 12, 2020. <https://ams.confex.com/ams/2020Annual/webprogram/Paper367320.html>.

SILVA JUNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; DELGADO, R. C.; TEODORO, L. P. R.; LIMA, M.; PANTALEÃO, A. A.; BAIO, F. H. R.; AZEVEDO, G. B.; AZEVEDO, G. T. O. S.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; ARVOR, D.; FACCO, C. U. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, 16246, 2020.

SILVA, G. M. de C.; GOZZO, L. F.; REBOITA, M. S. Etapas de uma previsão climática sazonal. **Terrae Didactica**, v. 17, e021026-e, 2021.

SILVA, G. A. M.; AMBRIZZI, T.; MARENGO, J. A. Observational evidences on the modulation of the South American low-level jet east of the Andes according to the ENSO variability. **Annales Geophysicae**, v. 27, p. 645-657, 2009.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 355-377, 2019.

SILVESTRI, G. E.; VERA, C. S. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, 2115, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003GL018277>.

SNYDER, R. L.; MELO-ABREU, J. D. **Frost protection: fundamentals, practice and economics**. Rome: Fao, 2005. v. 2. Disponível em: https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/4727/1/REP-FROST_Volume1.pdf . Acesso: 29 maio 2023.

SOUZA, C. A.; REBOITA, M. S. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terrae Didactica**, v. 17, p. e021009-e021009, 2021. DOI:10.20396/td.v17i00.8663474.

TASCHETTO, A. S.; UMMENHOFER, C. C.; STUECKER, M. F.; DOMMENGET, D.; ASHOK, K.; RODRIGUES, R. R.; YEH, S. ENSO atmospheric teleconnections. In: MCPHADEN, M. J.; SANTOSO, A.; CAI, W. (ed.). **El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate**. Hoboken: Wiley ; Florida: American Geophysical Union, 2020, Cap. 14, p. 309-335.

TEODORO, P. E.; SILVA JUNIOR, C. A.; DELGADO, R. C.; LIMA, M.; TEODORO, L. P. R.; BAIO, F. H. R.; AZEVEDO, G. B.; AZEVEDO, G. T. O. S.; PANTALEÃO, A. A.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; FACCO, C. U. Twenty year impact of fire foci and its relationship with climate variables in Brazilian regions. **Environmental**

Monitoring and Assessment, v. 194, 90, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09702-x>.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. **Geophysical Research Letters**, v. 25, p. 1297-1300, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, p. 1000-1016, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2).

VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Extreme precipitation over southeastern Brazil in the austral summer and relations with the southern hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21-26, Jan./Mar. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.247>.

WANG, B.; LIU, J.; KIM, H. -J.; WEBSTER, P. J.; YIM, S. -Y. Recent change of the global monsoon precipitation (1979–2008). **Climate Dynamics**, v. 39, p. 1123-1135, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1266-z>.

WIEDERMANN, M.; SIEGMUND, J. F.; DONGES, J. F.; DONNER, R. V. Differential imprints of distinct ENSO flavors in global patterns of very low and high seasonal precipitation. **Frontiers in Climate**, v. 3, 618548, 2021.

YNOUE, R. Y.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, G. A. M. **Meteorologia: noções básicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 184 p.

CAPÍTULO 5

O Clima do Cerrado

Daniel Althoff

Lineu Neiva Rodrigues

Edson Eyji Sano

Giovana Maranhão Bettiol



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 4 e primeiro plano); Fabiano Bastos (da esquerda para a direita - 2, 3).

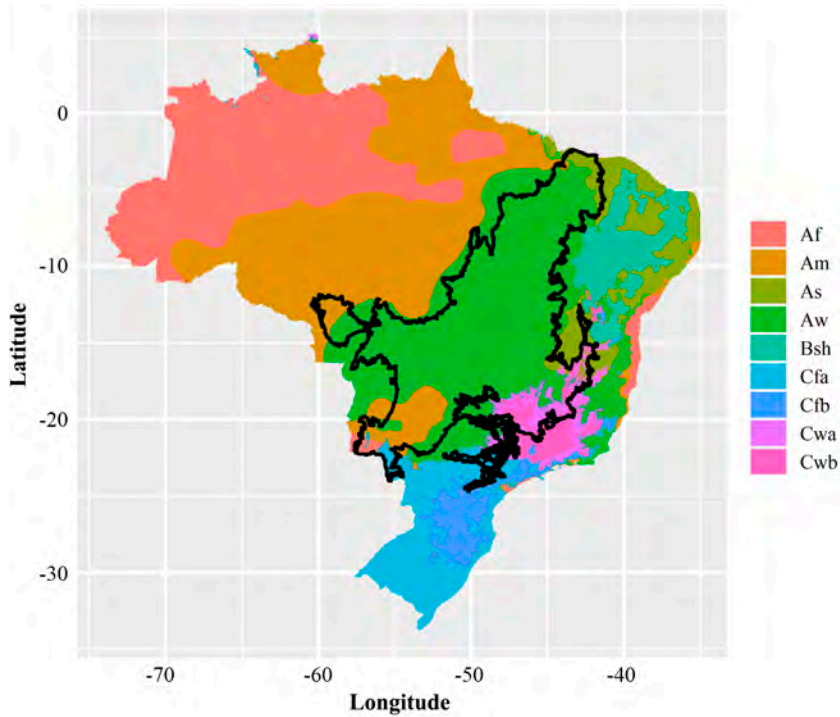
5.1 Introdução

De acordo com a classificação climática de Köppen (Köppen, 1936), cerca de 74,6% do bioma Cerrado pode ser classificado como clima tropical de savana e inverno seco (Aw) (Figura 5.1). Essa classificação climática é caracterizada por apresentar temperatura média acima de 18°C em todos os meses do ano e precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm. Como o próprio nome sugere, a estação seca coincide com o inverno e se estende de maio a setembro. A estação chuvosa se concentra no verão e se estende de outubro a abril.

Além do clima tropical de savana, pode-se observar na região a ocorrência de outros climas. Aproximadamente 9,2% da região apresenta clima tropical subúmido ou de monção (Am), uma transição entre o clima tropical de inverno seco e clima tropical superúmido ou equatorial (Af), quando não há estação seca. Cerca de 0,8% da região apresenta clima equatorial (Af); 3,4%, clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno (Cwb); 5,6%, clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa); 2,4%, clima subtropical com verão quente (Cfa); e 0,3%, clima temperado com verão ameno (Cfb). Nos estados da Bahia, Maranhão e Piauí, há porções do Cerrado, cerca de 3,7%, com clima tropical de verão seco (As) e proximidade com a transição para clima semiárido quente (BSh).

Na Tabela 5.1, estão apresentadas as descrições, as abreviações e os critérios para a classificação climática de Köppen das zonas identificadas no Cerrado.

A sazonalidade e a caracterização do clima são de grande importância para a agricultura irrigada. A concentração das chuvas em poucos meses e a ocorrência de veranicos fazem da irrigação uma tecnologia essencial para a produção agrícola e o desenvolvimento da região.



Af = clima tropical superúmido ou equatorial
 Am = clima tropical subúmido ou de monção
 As = clima tropical de verão seco
 Aw = clima tropical de savana e inverno seco
 Bsh = clima semiárido quente
 Cfa = clima subtropical com verão quente
 Cfb = clima temperado com verão ameno
 Cwa = clima subtropical de inverno seco e verão quente
 Cwb = clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno

Figura 5.1. Classificação climática de Köppen.

Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013).

Tabela 5.1. Critérios de temperatura e precipitação para classificação climática de Köppen dos principais climas do Cerrado.

Temperatura ⁽¹⁾		Precipitação ⁽²⁾			Clima	
T _{cold}	Thot	Tann	Pm	Pann	Grupo	Subtipo
≥ 18			P _{dry} ≥ 60			f
			P _{dry} < 60	≥ 25 (100 - P _{dry})	A	m
				< 25 (100 - P _{dry})		s
				< 25 (100 - P _{dry})		w
		≥ 18		≥ 5 P _{lim}	B	S
-3 < T _{cold} < 18	≥ 22		P _{dry} > 40			a
	< 22 & T _{M10} ≥ 4				C	b
	≥ 22		P _{dry} > 40			a
	< 22 & T _{M10} ≥ 4		P _{wet} ≥ 10 R _{dry}			w
						b

⁽¹⁾T_{cold} = temperatura do mês mais frio (°C); T_{net} = temperatura do mês mais quente (°C); T_{ann} = temperatura média anual (°C).
⁽²⁾Pm = precipitação mensal (mm); P_{ann} = precipitação anual (mm); P_{dry} = precipitação do mês mais seco (mm); P_{wet} = precipitação do mês mais chuvoso (mm); T_{M10} = número de meses cuja temperatura excede 10 °C; P_{lim} = 2 x T_{ann}, se 70% da P_{ann} ocorrer no verão, então P_{lim} = 2 x T_{ann} + 28; se entre 30 e 70% da P_{ann} ocorrer no verão, P_{lim} = 2 x T_{ann} + 14. Para o hemisfério sul, o verão é considerado o período de seis meses mais quente (outubro a março).

5.2 Precipitação

Na região do Cerrado, a precipitação pluvial é a principal fonte de entrada de água e a principal responsável pelas variações no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Além disso, ela é a principal fonte de água para produção agrícola no mundo (Dastane, 1978). A água azul, água disponível nos rios e aquíferos, que é utilizada na irrigação, constitui apenas uma fração da água que é utilizada para satisfazer a demanda hídrica das culturas.

De acordo com Rockström et al. (1999), em média, a quantidade de água verde utilizada no mundo, ou seja, a água proveniente da chuva que é armazenada no solo, nas agriculturas de sequeiro e irrigada é da ordem de 5 mil quilômetros cúbicos por ano. Esse valor representa mais de três vezes a quantidade de água azul utilizada para fins de irrigação (Rost et al., 2008). É importante destacar que a água verde é responsável pela manutenção de todo o ecossistema terrestre não agrícola, com estimativas de uso variando entre 49 mil e 56,5 mil quilômetros cúbicos por ano (Rockström et al., 1999).

Grande parte da região do Cerrado é carente de dados hidrometeorológicos e de informações técnicas básicas que possam ser utilizadas para estimativas confiáveis da demanda e da oferta hídrica em trechos específicos de uma bacia hidrográfica. Dados de precipitação são ainda mais críticos, em virtude da grande variabilidade espacial das chuvas.

Antes da consolidação e popularização dos sistemas de informações geográficas (SIG) na década de 1990, as informações climáticas do bioma Cerrado eram basicamente provenientes de estações pluviométricas convencionais ou de poucas estações meteorológicas disponíveis. Tais informações são essencialmente pontuais no espaço, isto é, representam apenas uma área em torno de 10 km (ou menos) a 100 km, dependendo do tipo de aplicação ao longo das estações. Além disso, a coleta e o envio desses dados para as bases sempre foram um gargalo.

No Brasil, várias instituições são responsáveis pela coleta e manutenção de dados de precipitação. A base de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), é possivelmente a mais completa disponível. Essa base agrega dados de várias instituições, tais como a do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE-SP), da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa-MG), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), entre outras.

A coleta desses dados de precipitação é tradicionalmente feita por meio de pluviômetros e pluviógrafos instalados em locais estrategicamente definidos. A coleta e o envio desses dados para as bases sempre foram um gargalo. A rede de coleta de dados pluviométricos produz dados pontuais, restritos à área de abrangência das estações. Desde 1990, o número de estações telemétricas tem crescido significativamente, o que tem possibilitado visualizar problemas quase em tempo real.

Atualmente a rede básica que envolve a ANA e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é composta por ~942 estações na região do Cerrado. Na base de dados dessas redes, existem estações com registro histórico de dados desde 1911. Contudo, muitas dessas estações foram descomissionadas ao longo do tempo e a representatividade do banco de dados pluviométricos passou a depender da densidade espacial de suas estações.

Além disso, essas séries de dados apresentam muitas falhas, sendo necessário um intenso trabalho para a organização e consistência das mesmas. Em virtude disto, vem ganhando força o uso de dados provenientes de radares (sensoriamento remoto ativo) a bordo de satélites. Esses dados são especialmente úteis em regiões não monitoradas.

Com o advento do SIG, surgiram os primeiros trabalhos de espacialização de dados climáticos do Cerrado, notadamente dos dados de precipitação, pois tais dados eram muito mais numerosos do que os

outros oriundos de estações meteorológicas, como é o caso dos dados de temperatura. O livro denominado *Chuva no Cerrado: análise e espacialização*, editado em 1994, foi a primeira publicação em que a chuva no Cerrado foi caracterizada do ponto de vista espacial. Nessa obra, os dados pontuais de chuva, obtidos a partir de 250 estações pluviométricas com pelo menos 30 anos de observações contínuas, foram espacializados por meio da técnica de interpolação matemática denominada inverso do quadrado da distância.

O primeiro satélite a ser lançado com essa finalidade foi o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), lançado em conjunto pelas agências espaciais dos Estados Unidos (Nasa) e do Japão (Jaxa) (Simpson et al., 1996), que fornece dados diários de precipitação com resolução espacial de $0,25 \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 25×25 km) de regiões tropicais e subtropicais da Terra desde 1997. No estudo de avaliação da acurácia dos dados do TRMM para o Brasil, conduzido por Pereira et al. (2013), chegou-se a uma concordância de aproximadamente 97% em relação aos dados registrados por 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil.

Com base no sucesso do TRMM, a Nasa, em conjunto com a Jaxa, lançou o satélite sucessor do TRMM, denominado Global Precipitation Measurement (GPM), em 28 de fevereiro de 2014. O GPM adquire dados de precipitação com resolução espacial aproximada de 10 km a cada 30 minutos de intervalo, os quais são processados por meio do algoritmo Global Precipitation Measurement (IMERG). De acordo com Gadelha et al. (2019), que avaliaram o potencial do produto GPM IMERG para estimar precipitação do Brasil por meio de 4.911 pluviômetros distribuídos em todo o território nacional, esses dados conseguem estimar chuva com boa acurácia, apesar de uma leve tendência em superestimar precipitação, independentemente da escala temporal (diário, mensal ou anual).

Em 1981, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e a Universidade de Califórnia de Santa Bárbara lançaram o produto denominado Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations

(CHIRPS). Nesse produto, são disponibilizadas estimativas de precipitação a partir de diversas fontes de informações como, por exemplo, os dados satelitais obtidos na faixa do infravermelho termal, satélites geoestacionários da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e diversas observações de precipitação obtidas por estações meteorológicas (Funk et al., 2015). Os seus dados, agrupados em 1 dia, 5 dias e 30 dias, são disponibilizados com resolução espacial de 0,05°, isto é, em torno de 5 km próximo à linha do equador. Costa et al. (2019) avaliaram a confiabilidade dos dados do CHIRPS para o Brasil por meio da análise de dados de chuva registrados por 183 estações meteorológicas distribuídas em todo o território nacional. Os seguintes coeficientes de determinação foram obtidos para as cinco regiões geográficas: 93% para a região Centro-Oeste; 91% para a região Sul; 93% para a região Norte; 98% para a região Sudeste; e 97% para a região Nordeste. Para todo o Brasil, o coeficiente de determinação foi de 97%.

A precipitação média anual no Cerrado, de acordo com os dados obtidos pelo produto CHIRPS, é de 1.415 mm (Figura 5.2). A precipitação mínima anual é de 479 mm, concentrada principalmente na porção leste do bioma, na região de transição com o bioma Caatinga, enquanto a precipitação máxima anual é de 2.512 mm, encontrada principalmente na porção oeste do bioma, na região de transição com o bioma Amazônia, além da região litorânea no estado do Maranhão. O Maranhão é praticamente o único estado que apresenta dois padrões nítidos de precipitação, sendo mais chuvoso na porção norte e mais seco na porção sul. Os estados que apresentam maior regime de chuva em termos de média anual são o Mato Grosso e Tocantins, com índices superiores a 1,6 mil milímetro por ano (Figura 5.3). Por outro lado, os estados que possuem os menores índices de precipitação são a Bahia e o Piauí, com índices inferiores a mil milímetro por ano. As outras sete unidades federativas (Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e São Paulo) apresentam índices variando de 1,2 mil a 1,5 mil milímetro por ano.

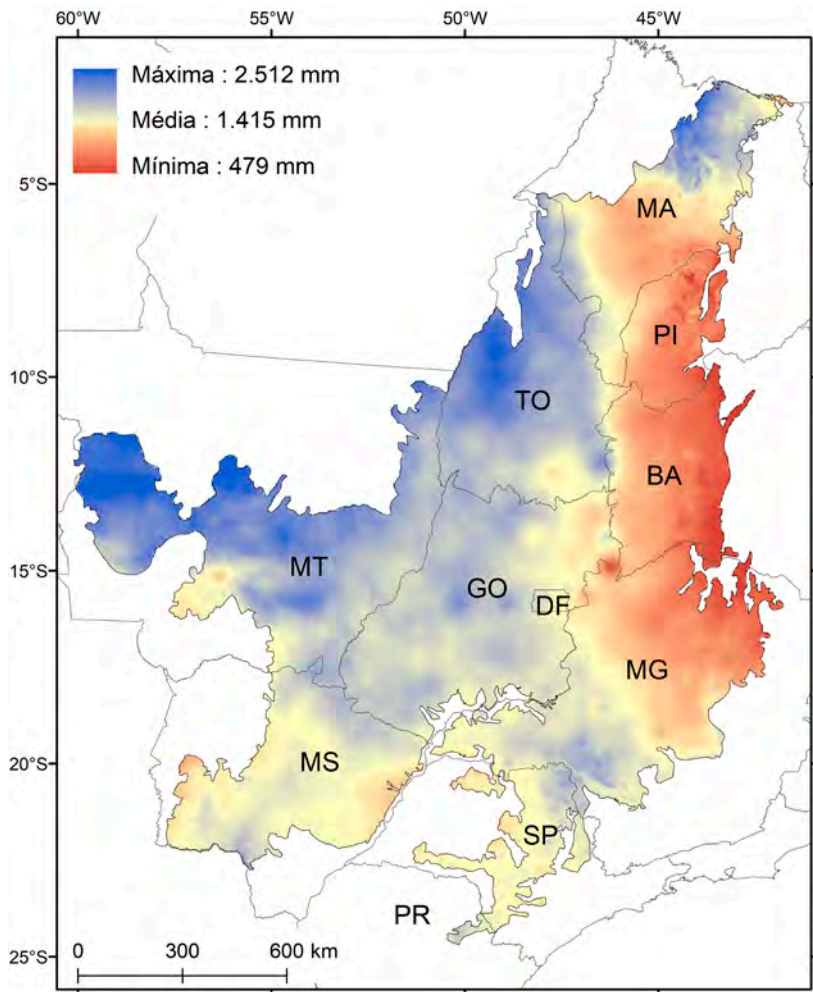


Figura 5.2. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado (período: 1981–2021).

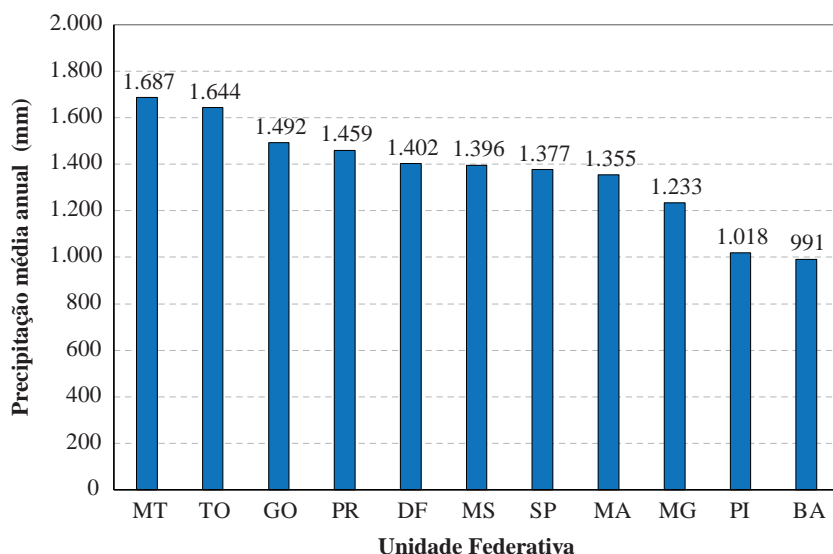


Figura 5.3. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado, discriminada por unidade federativa (período: 1981–2021).

Na Figura 5.4, é mostrada a precipitação total anual do bioma Cerrado dividida em quatro décadas: 1981–1990; 1991–2000; 2001–2010; e 2011–2021. Em termos de precipitação média anual, há uma ligeira, porém, consistente tendência de diminuição da precipitação, passando de 1.428 mm na primeira década para 1.397 mm na última década, ou seja, uma redução de 31 mm ao longo das quatro décadas.

A variabilidade das chuvas, representada pelo valor de desvio-padrão (DP) foi maior na primeira década (DP = 166 mm) e menor na última década (DP = 92 mm). O maior índice de precipitação foi verificado em 1985 (1.652 mm), enquanto o menor índice ocorreu em 1990 (1.176 mm). Aparentemente não houve interferência perceptível dos efeitos dos fenômenos climáticos regionais conhecidos como El Niño e La Niña nos índices de precipitação no bioma Cerrado, corroborando com os resultados de pesquisas anteriores. O El Niño provoca aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico tropical, enquanto a La

Niña está associada ao resfriamento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico. Há um consenso na literatura de que esses dois fenômenos alteram com maior intensidade o regime de chuvas da região Nordeste e Sul do Brasil. No entanto, para a região Centro-Oeste, os seus efeitos são menos proeminentes.

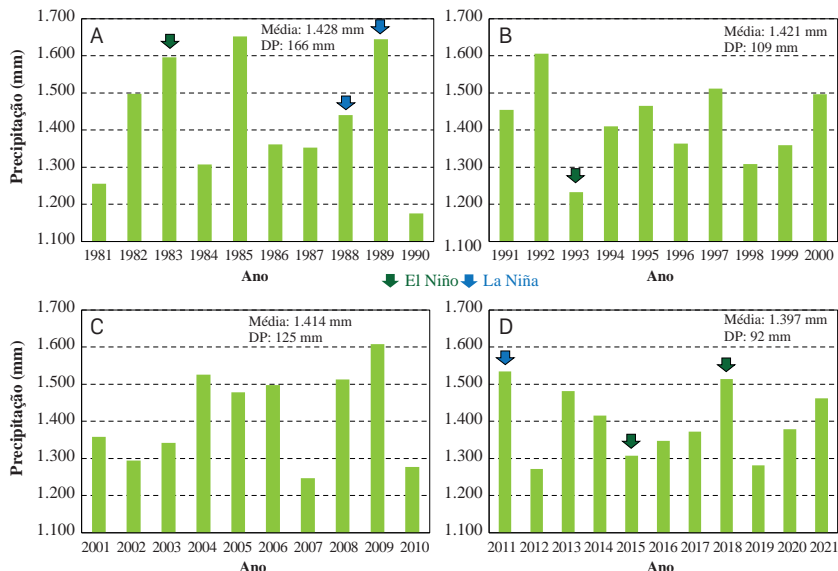


Figura 5.4. Distribuição anual de chuva no Cerrado nas décadas de 1981–1990 (A), 1991–2000 (B), 2001–2010 (C) e 2011–2021 (D).

Na Figura 5.5, é apresentada a distribuição mensal de chuvas no bioma Cerrado, com base nos dados do CHIRPS referentes ao período de 1981–2021. É possível notar a existência de três grupos distintos de precipitação: (a) período seco, que corresponde aos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, com precipitação média mensal inferior a 50 mm; (b) período intermediário ou de transição, composto pelos meses de abril e outubro, com precipitação média mensal em torno de 100 mm; e (c) período chuvoso, que engloba os meses de novembro,

dezembro, janeiro, fevereiro e março, com precipitação média mensal superior a 150 mm.

O padrão de precipitação, observado no boxplot apresentado na Figura 5.5, é bastante similar ao do estado de Mato Grosso que foi produzido por Oliveira-Filho et al. (2021), utilizando a mesma base de dados disponibilizada pelo projeto CHIRPS. Analisando esta figura, pode-se constatar que há uma incerteza na afirmação, encontrada em diversas publicações, de que existem duas estações climáticas bem definidas no Cerrado, ou seja, 6 meses de seca e 6 meses de chuva. Quais são os 6 meses de chuva? De outubro a março ou de novembro a abril? No Cerrado, o mais correto seria afirmar que, existem de fato duas estações bem definidas: 5 meses de chuva (de novembro a março) e 5 meses de seca (de maio a setembro). Os 2 meses restantes, outubro e abril, correspondem a meses de transição de seca para chuva e de chuva para seca, respectivamente.

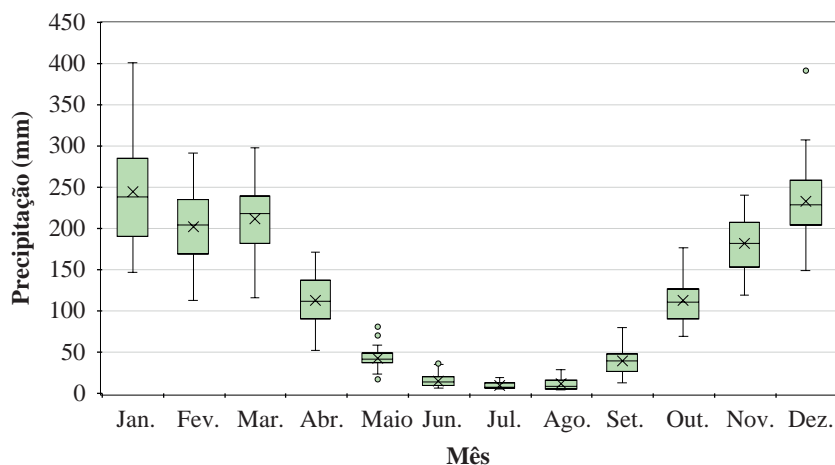


Figura 5.5. Boxplot de precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

Na Figura 5.6, é apresentada a distribuição da precipitação média mensal no bioma Cerrado, com base nos dados da plataforma CHIRPS

para o período de 1981–2021. Observa-se uma distribuição típica de regiões tropicais, com as maiores intensidades de chuva no verão e as menores no inverno. Mais de 80% da precipitação total anual ocorre no período de outubro a abril. Durante o período chuvoso, os valores mais altos de precipitação são encontrados na porção leste do bioma, notadamente no estado de Mato Grosso e na porção litorânea do estado do Maranhão. Esse regime é influenciado principalmente pelas correntes do Anticiclone do Atlântico Sul (SSA, do inglês *South Atlantic Anticyclone*), um sistema atmosférico de alta pressão que cobre o país no verão, de sudeste para noroeste e também pelo Anticiclone Polar (PA, do inglês *Polar Anticyclone*) durante o inverno. No verão, a circulação do PA em regiões de baixa latitude é limitada pela influência do centro de baixa pressão que se forma na região do Chaco do Paraguai (Baixa do Chaco) (Sano et al., 2007). No litoral maranhense, o clima é influenciado pelas massas de ar Equatorial Atlântica e Equatorial Continental, com predomínio de alta pluviosidade e temperaturas elevadas.

Na maior parte das vezes, a quantidade precipitada durante a estação chuvosa é suficiente para suprir a demanda hídrica de diversas culturas. Por exemplo, a demanda hídrica do ciclo completo da cultura da soja varia de 450 a 825 mm; do milho, de 450 a 750 mm; do algodão, de 550 a 950 mm; e do feijão, 250 a 500 mm (Doorenbos; Pruitt, 1977a).

Considerando que há diversos estudos baseados nos dados do GPM na literatura, realizou-se uma análise comparativa entre os dados produzidos pelo GPM e CHIRPS (Figura 5.7). Para tal, foram utilizadas as precipitações totais anuais do bioma Cerrado no período de 2001 a 2020, que correspondem aos dados GPM que estavam disponíveis em 05 de agosto de 2022. O coeficiente de determinação (R^2) de 0,88 indica que há uma boa correlação entre os dois projetos, com uma tendência de superestimação do GPM em relação ao CHIRPS para valores relativamente mais altos de precipitação (> 1.500 mm). Por outro lado, há uma tendência de subestimação do GPM para valores mais baixos (< 1.250 mm).

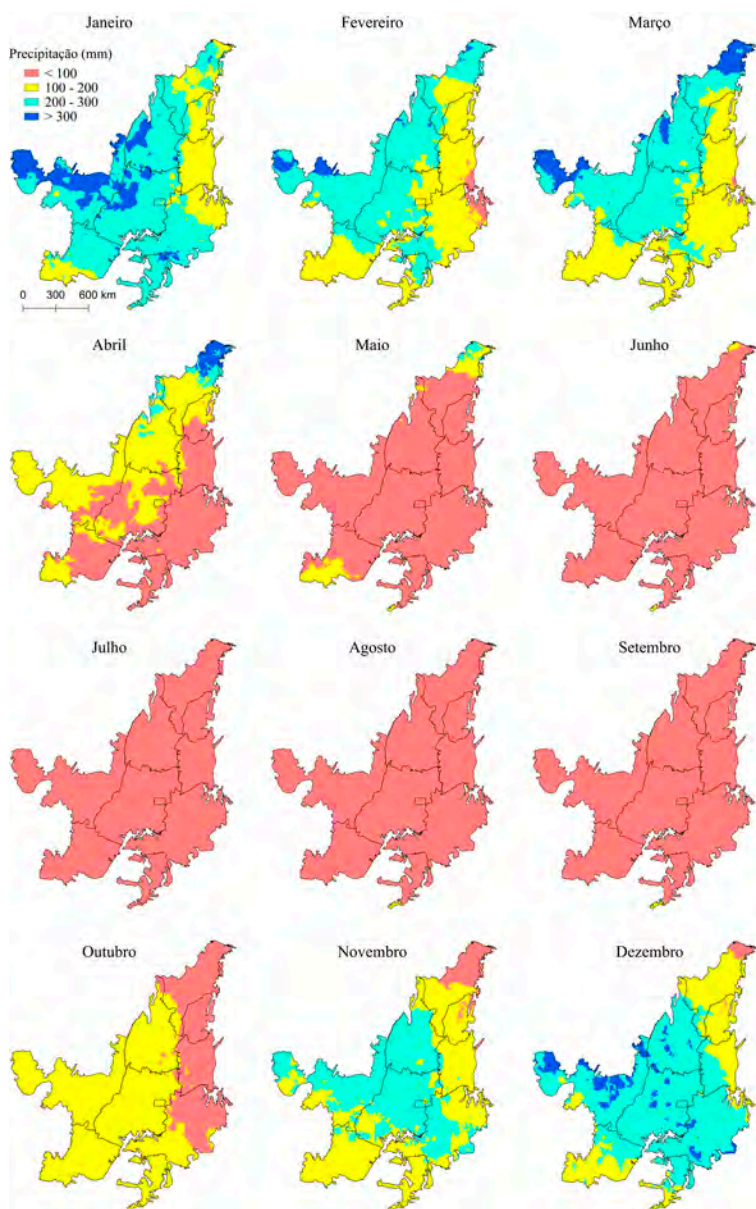


Figura 5.6. Distribuição espacial da precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

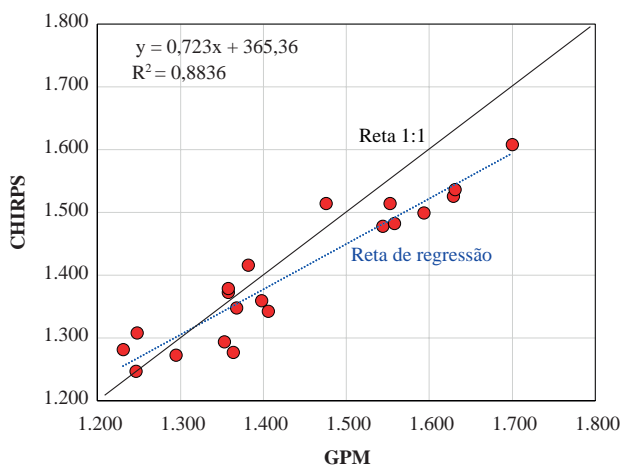


Figura 5.7. Comparação entre os dados de precipitação total anual (mm) produzidos pelo GPM e CHIRPS para o bioma Cerrado no período 2001–2020.

Na Figura 5.8A, são apresentados, com base nos dados do GPM, seis locais distintos do Cerrado e suas respectivas precipitações médias mensais. Na Figura 5.8B, são apresentadas as curvas de permanência no tempo da precipitação mensal baseada na série histórica. Pode-se notar, por exemplo, que a região Norte, próxima à divisa entre o Maranhão e o Piauí (ponto/linha verde-água – região 1), apresenta médias mensais de precipitação inferiores às demais regiões de setembro a dezembro. Contudo, o fim de sua estação chuvosa também é mais tardio que nas demais regiões, apresentando precipitação média mensal superior de abril a maio. O início tardio da estação chuvosa resulta no início tardio da principal safra quando comparado às demais regiões. Nota-se a maior pluviosidade, com precipitação média anual de aproximadamente 1.752 mm, na região do Mato Grosso (ponto/linha laranja – região 2).

Utilizando-se, como critério, os valores das curvas de probabilidades de ocorrência de precipitação, é possível tomar decisões com risco mais baixo. Por exemplo, para o mês de setembro, a região 6 apresenta uma precipitação maior ou igual a 71 mm por mês em 60% do tempo

e maior ou igual a 131 mm por mês em 20% do tempo. Já a região 4, para o mesmo período, apresenta precipitação maior ou igual a 7 mm por mês em 60% do tempo e maior ou igual a 22 mm por mês em 20% do tempo. Assim sendo, a transição da estação seca para a chuvosa é mais tardia para região 4, com expectativa de menor pluviosidade para o mês de setembro (Figura 5.8B).

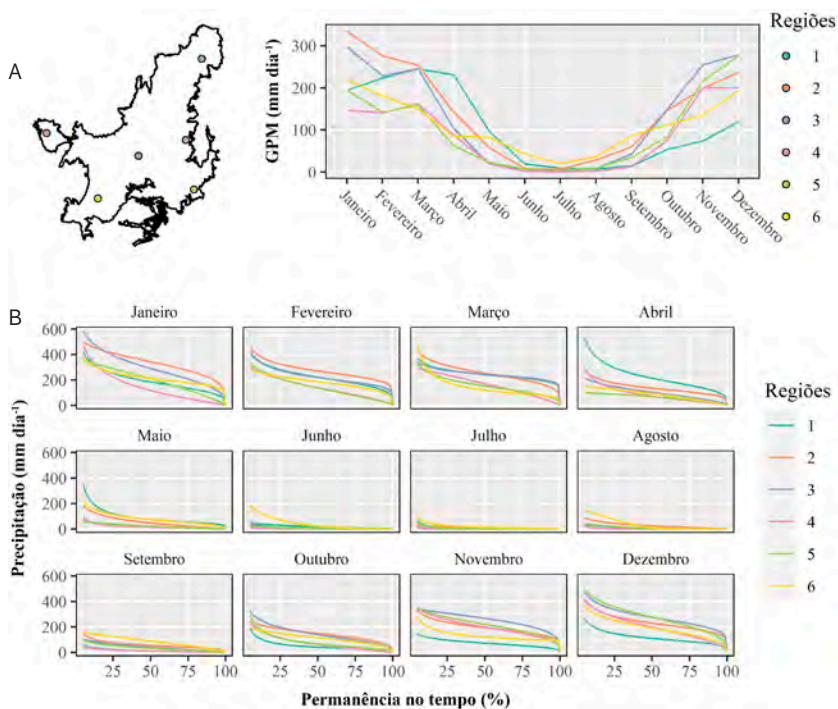


Figura 5.8. Médias mensais de precipitação e curvas de permanência (função distribuição acumulada) associadas à série histórica mensal de precipitação para seis regiões distintas no Cerrado. Médias mensais (A); e curvas de permanência (B).

Para fins de produção agrícola, entretanto, a forma como a precipitação se distribui ao longo do tempo é tão importante quanto a quantidade precipitada, isto é, o ideal para a produção agrícola é que a pre-

precipitação seja mais bem distribuída no tempo e menos concentrada. Outro aspecto a ser destacado é que o importante para a cultura é a precipitação efetiva, ou seja, aquela precipitação que fica armazenada na zona do sistema radicular da cultura disponível para evapotranspiração. A quantidade de chuva que será retida na forma de precipitação efetiva dependerá, entre outras coisas, das características da precipitação, do tipo de solo e da profundidade do sistema radicular da cultura.

Assim, para fins de planejamento de irrigação, é importante avaliar a frequência de ocorrência de dias sem chuva. O Cerrado apresenta elevada frequência de dias sem chuva de maio a setembro (Figura 5.9), caracterizado por sua estação seca. Mesmo em períodos na estação chuvosa, como de novembro a março, observa-se a ocorrência de veranicos. Em janeiro, por exemplo, em média, 48,1% do Cerrado apresenta ocorrências de 8 a 12 dias sem chuvas, enquanto 41,8% do bioma apresenta mais de 12 dias sem chuva. Já em abril, mais de 94% do Cerrado apresenta uma média de mais de 12 dias sem chuva.

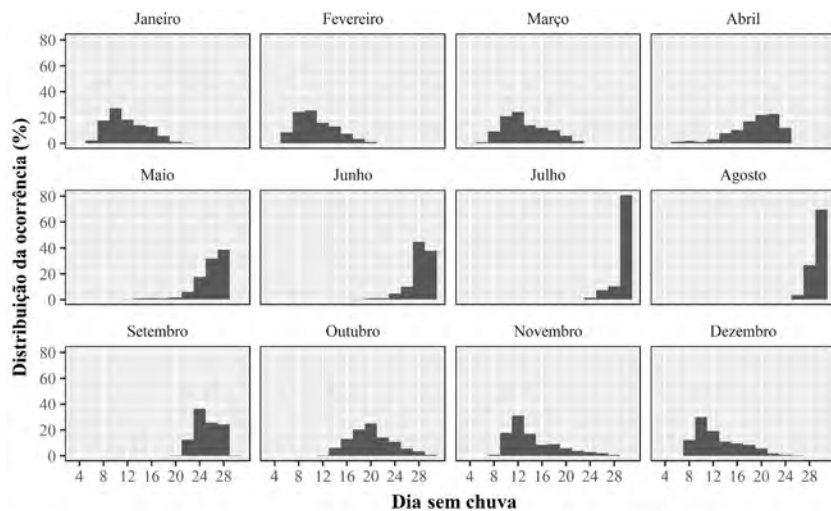


Figura 5.9. Distribuição da ocorrência de média de dias sem chuva mensalmente para todo o Cerrado.

É importante avaliar a distribuição espacial da média de dias sem chuva ao longo do Cerrado. Por exemplo, o estado do Mato Grosso apresenta, em geral, menos de 12 dias sem chuva de novembro a fevereiro (Figura 5.10). Já o Oeste Baiano apresenta maior número de dias sem chuva. Mesmo no período mais chuvoso, de novembro a março, a proporção da região que apresenta menos de 15 dias sem chuvas mensalmente varia de 22 a 57%. Já o período de maio a setembro configura, para quase todo o Cerrado, um período de grande risco com baixa ocorrência de chuvas e baixo volume precipitado.

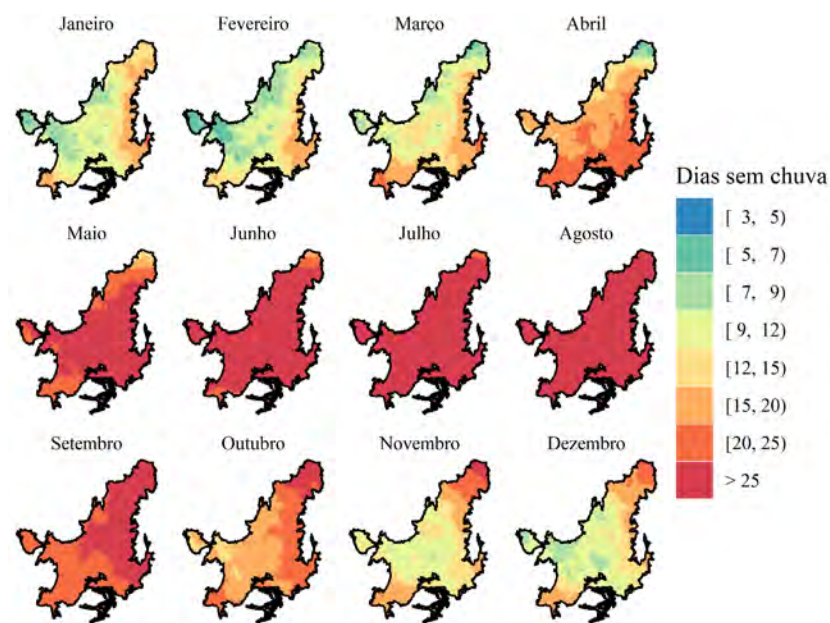


Figura 5.10. Número médio de dias sem chuva em cada mês do ano para o Cerrado.

5.3 Evapotranspiração

Se não for bem planejado, o crescimento da irrigação no Cerrado pode implicar no surgimento e no aumento das disputas pelo uso de

água nas bacias hidrográficas, especialmente nas que já possuem disponibilidade hídrica reduzida. Por isso, é importante desenvolver estratégias para reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais para os diversos usos. As estratégias adotadas devem ser efetivas para aumentar a eficiência de todos os usos, principalmente da irrigação, a principal usuária.

Qualquer estratégia de melhoria da eficiência da irrigação deve priorizar o ajuste do manejo, com base em um adequado entendimento do comportamento da evapotranspiração da cultura (ET_c). A ET_c é a transferência de água (na forma de vapor) do sistema solo-planta para a atmosfera e depende da energia disponível para a evaporação (Reichardt, 1985). A transferência de água do solo para a atmosfera é chamada de evaporação (E) e da planta para a atmosfera é chamada de transpiração (T). Embora sejam processos fisicamente similares, há diferenças importantes entre a evaporação da água do solo e a transpiração. A resistência à difusão de vapor de água é maior nas folhas do que na água livre, mesmo com a abertura estomática total (Chang, 1968).

Existem vários métodos descritos na literatura que podem ser utilizados para a estimativa da ET_c, tais como: tanques de evaporação, lisímetros, covariância de vórtice turbulento, modelos de superfície da terra (LSMs), modelagem de balanço de água superficial e métodos de balanço de água do solo (Wang et al., 2015). A utilização de sensoriamento remoto para estimativa da ET_c vem ganhando espaço nos estudos relacionados ao manejo de irrigação em grandes áreas. Algoritmos que utilizam dados de sensoriamento remoto são utilizados em estudos de irrigação e relacionados à gestão de recursos hídricos, auxiliando estabelecer relações entre uso do solo e uso da água para o planejamento de bacias hidrográficas, modelagem hidrológica, desempenho da irrigação, condições de monitoramento da degradação da vegetação nativa, entre outros (Bastiaanssen et al., 2005).

Entre os modelos existentes, aquele proposto por Doorenbos e Pruitt (1977b), que calcula a evapotranspiração potencial da cultura

por meio da relação entre a evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) e um coeficiente de cultura (K_c), é o mais utilizado por sua simplicidade e facilidade de programação e operacionalização. A ET_o, por sua vez, é a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência, sendo, no Brasil, mais comumente utilizada a grama batatais (*Paspalum Notatum* L.). A ET_o representa a demanda atmosférica e varia de acordo com a localidade. Já o K_c varia de acordo com a cultura, seu estágio de desenvolvimento e o clima. A equação Penman-Monteith (Allen et al., 1998) é utilizada como referência para o cálculo da ET_o, incorporando parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos.

No Brasil, a principal instituição responsável pela coleta e disponibilização de dados meteorológicos é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Atualmente, a base de dados do INMET conta com cerca de 277 estações convencionais e 595 estações automáticas, sendo algumas já descomissionadas. Os dados de estações convencionais estão disponíveis desde 1905, e o número de estações automáticas aumentou significativamente a partir de 2006 (Althoff et al., 2020a).

Diante do expressivo crescimento da agricultura irrigada no Cerrado brasileiro, é fundamental melhorar as estimativas da precipitação e da evapotranspiração de referência. Para tal, existem diversas bases de dados, com diferentes resoluções temporais e espaciais (Xavier et al., 2016; Abatzoglou et al., 2018; Althoff et al., 2020b), que podem ser utilizadas para essa finalidade.

O ET_o-Brazil (Althoff et al., 2020b) é uma das bases de dados de ET_o disponível para todo o território brasileiro. Essa base de dados foi derivada de dados ET_o calculados para estações meteorológicas e especializados por meio de algoritmos de inteligência artificial e com o auxílio de dados de climatologia e satélite. Esse produto fornece a ET_o, independentemente da existência de estações meteorológicas, para qualquer região do Brasil e com resolução temporal em base diária e espacial de 0,10° x 0,10° (aproximadamente 10 x 10 km). Para que seja efetivo ao longo do tempo, entretanto, é necessário que esse produto seja constantemente atualizado.

A ETo total média anual do Cerrado varia entre 1.080 mm, na região de transição entre Cerrado e Mata Atlântica, no estado de São Paulo, e 1.905 mm no Piauí. Na Figura 5.11, são apresentadas as médias mensais de ETo para todo o Cerrado. Pode-se observar que o período de maior demanda hídrica ocorre de agosto a novembro, em especial no leste e no norte do Cerrado, no estado da Bahia, Maranhão e Piauí. Em outubro, por exemplo, a ETo varia de 3,4 a 6,7 mm por dia, com mais de 50% do Cerrado apresentando valores entre 4,6 e 5,1 mm por dia. As elevadas demandas de agosto a setembro são particularmente críticas, pois representam um período de transição entre a estação seca e a estação chuvosa, quando as precipitações são irregulares.

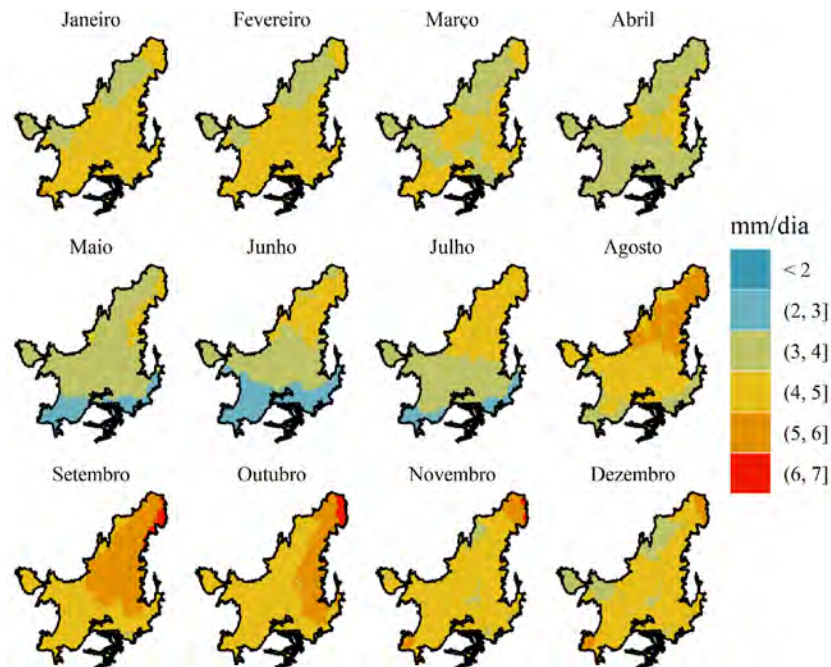


Figura 5.11. Evapotranspiração de referência média mensal para o Cerrado. Período de referência: junho de 2000 a dezembro de 2019 produto.

Em termos de volume de água demandado, o Oeste Baiano, por exemplo, apresenta uma demanda média de ETo entre 5 e 6 mm por dia, no mês de outubro, o que representaria um total de 5 mil a 6 mil metros cúbicos por dia para uma área irrigada de cem hectares. Já para o Mato Grosso do Sul, no mês de maio, a demanda pela ETo ficaria entre 2 a 3 mm por dia e, portanto, 2 mil a 3 mil metros cúbicos por dia para os mesmos cem ha.

Na Figura 5.12A, apresenta-se a ETo média mensal, como exemplo, para seis regiões distintas, enquanto, na Figura 5.12B apresenta-se as curvas de permanência da ETo no tempo baseada na série histórica. Pode-se notar, por exemplo, que a região do Oeste Baiano (ponto/linha rosa – região 4) apresenta médias mensais de ETo superiores ao da região do Mato Grosso (ponto/linha laranja – região 2), principalmente no período da principal safra, de outubro a março. Além disso, a região do Mato Grosso é caracterizada por maior pluviosidade, o que pode indicar maiores chances de sucesso da agricultura de sequeiro quando comparado com as demais regiões consideradas.

Uma estratégia interessante de ser adotada é a de se trabalhar com a probabilidade de ocorrência de evapotranspiração. Por exemplo, para o mês de dezembro, a região 2 apresenta uma ETo maior ou igual a ~3,6 mm por dia, em 60% do tempo, e maior ou igual a ~4,4 mm por dia, em 20% do tempo. Já a região 5, para o mesmo período, apresenta ETo maior ou igual a ~4,0 mm por dia, em 60% do tempo, e maior ou igual a 5,8 mm por dia, em 20% do tempo. Logo, não só é maior a ETo para a região 5, no mês de dezembro, como também o é a sua variabilidade (maior inclinação da linha verde em relação à linha laranja – região 5 em relação à região 2, dezembro, conforme ilustra a Figura 5.12B). Por outro lado, a região 2 apresenta maior ETo média de maio a agosto, estação seca, o que indica maior demanda hídrica para culturas irrigadas neste período.

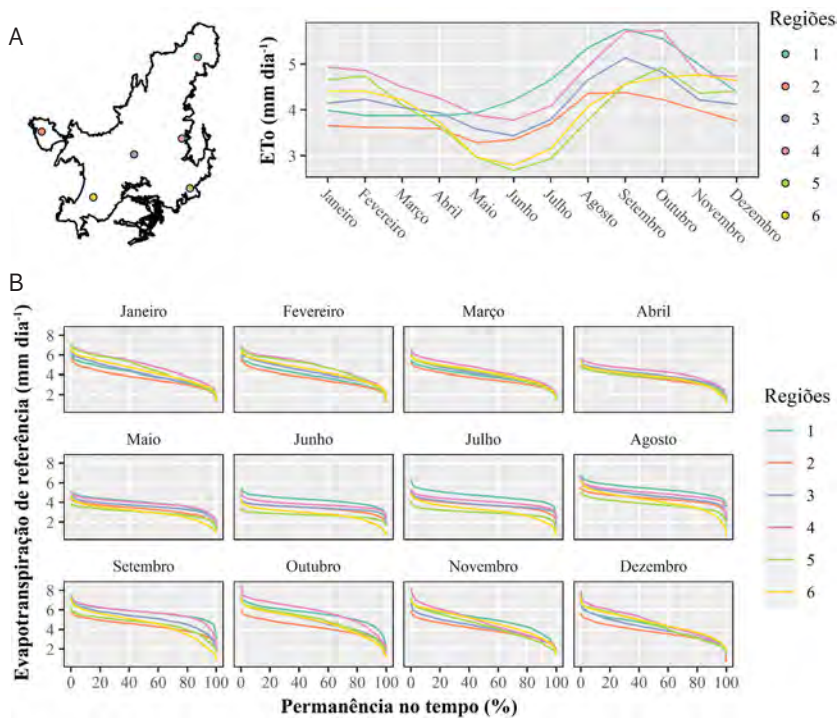


Figura 5.12. Médias mensais de evapotranspiração de referência (ETo) (A); e curvas de permanência associadas à série histórica diária de ETo para seis regiões distintas no Cerrado (B).

A sazonalidade da demanda atmosférica, combinada com a sazonalidade das precipitações, é um fator determinante para épocas de semeadura e viabilidade da dupla safra em algumas regiões do Cerrado. Na Figura 5.13, apresenta-se o índice de aridez mensal para o Cerrado, calculado com base na evapotranspiração de referência do banco de dados do ETo-Brazil e nas estimativas de precipitação provenientes do IMERG. Valores de índice de aridez menores que um indicam que a ETo mensal acumulada é menor que a precipitação mensal acumulada. Entretanto, é importante ressaltar que o índice de aridez menor que um não indica necessariamente que toda a precipitação foi aproveitada pela cultura. Esse índice indica as regiões que podem sofrer

escassez de água verde. Além disso, ele oferece uma indicação de regiões onde a agricultura irrigada pode se desenvolver com uma menor necessidade de irrigação complementar.

Os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, por exemplo, na região oeste do Cerrado, apresentam índices de aridez inferiores a um em diversos meses do ano e o período comum para o plantio de soja é entre o fim de setembro e início de outubro. Já para o estado da Bahia, na região leste do Cerrado, é mais comum o plantio de soja entre outubro e novembro. E para os estados do Maranhão e Piauí, ao norte do Cerrado, o período de plantio preferencial é ainda mais tardio, entre novembro e dezembro.

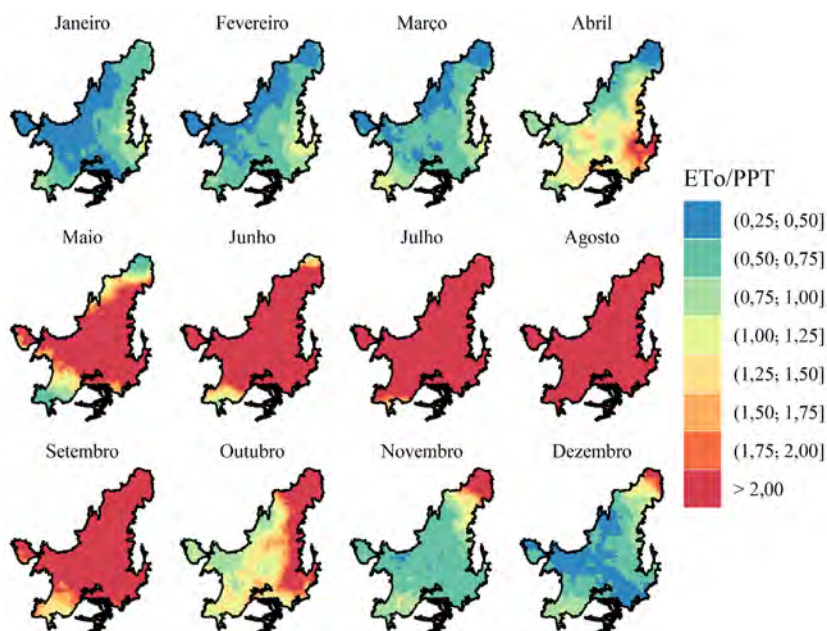


Figura 5.13. Índice de aridez mensal para o Cerrado baseado nos dados de evapotranspiração de referência do ETo-Brazil e estimativas de precipitação de satélite do IMERG.

Na Figura 5.14, foram destacadas as mesmas seis regiões distintas e o índice de aridez mensal correspondente a cada uma. É possível observar que o eixo Y (aridez) foi limitado a 2,0, devido ao fato que para precipitações próximas a zero, o índice tende a infinito. Índices de aridez elevados indicam condições similares relacionados à restrição da evapotranspiração devido à limitação hídrica frente à oferta de energia. As regiões 2 e 6 (pontos/linhas laranja e amarelo) apresentam período mais curto, em que o índice de aridez é maior do que 2,0. Em geral, essas regiões apresentam maior pluviosidade e estação seca mais curta. Já as regiões 1 e 4 (pontos/linhas verde-água e rosa) têm maior período com índice de aridez maior que 2,0. Essas regiões são caracterizadas por elevadas taxas de ETo na maior parte do ano.

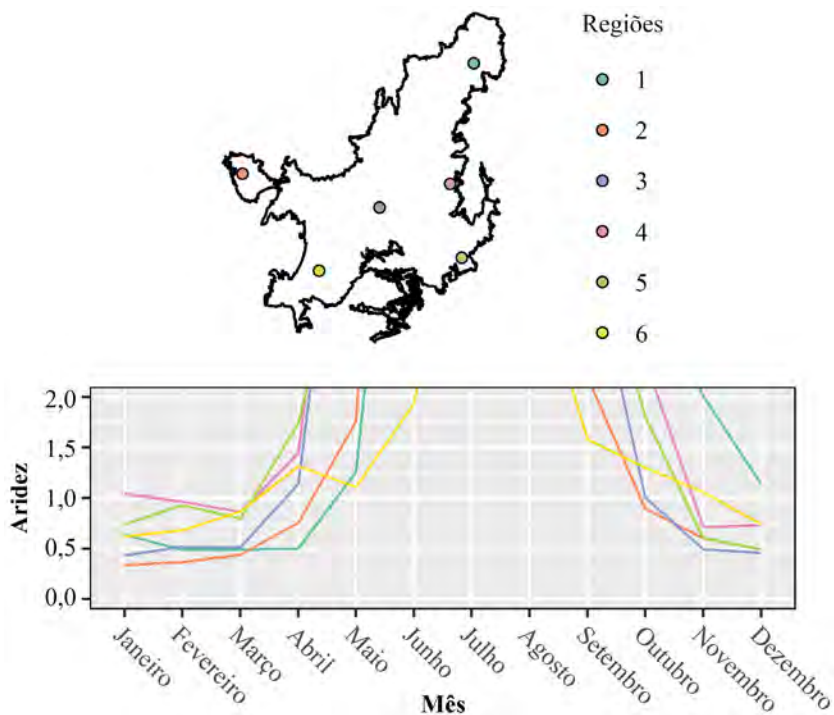


Figura 5.14. Índice de aridez mensal para seis regiões distintas do Cerrado.

5.4 Considerações finais

Este capítulo apresenta uma análise da precipitação e da evapotranspiração de referência no Cerrado. Essas duas variáveis são fundamentais para o planejamento e manejo da irrigação.

A precipitação média anual no Cerrado é de 1.415 mm. A precipitação mínima anual é de 479 mm, concentrada principalmente na região de transição com o bioma Caatinga, enquanto a precipitação máxima anual é de 2.512 mm, encontrada principalmente na região de transição com o bioma Amazônia. A evapotranspiração de referência total média anual do Cerrado varia entre 1.080 mm, na região de transição entre Cerrado e Mata Atlântica e 1.905 mm no Piauí. Os maiores valores de evapotranspiração de referência ocorrem entre agosto e novembro, no leste e no norte do Cerrado.

A agricultura irrigada no Brasil, assim como em outros países, sempre terá grandes desafios a serem enfrentados. Grande parte desses desafios tem relação com o clima, em especial com a precipitação e com a evapotranspiração. Informações sintetizadas sobre essas variáveis, que indique a sua variabilidade no tempo e no espaço, são fundamentais para os tomadores de decisão e formuladores de política pública.

Os avanços necessários para manejar o aumento da escassez hídrica e outros problemas emergentes na região dependerão fortemente da constituição de bases de conhecimento, de novas tecnologias, de estratégias de manejo e certamente de políticas públicas que tragam segurança para o irrigante.

5.5 Referências

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 170191, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **FAO Irrigation and drainage paper 56: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil - Repository. **Mendeley Data**, v. 3, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.17632/sstjw74ryh.3>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil (2000–2018). **Water Resources Research**, v. 56, n. 7, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020WR027562>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL. Model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85–93, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)). Acesso em: 20 jul. 2020.
- CHANG, J.-H. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine Publishing, 1968.
- COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para todo o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 228–243, 2019.
- DASTANE, N. G. **FAO Irrigation and drainage paper 25: effective rainfall in irrigated agriculture**. Rome: FAO, 1978.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **FAO Irrigation and drainage paper 24: Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977a.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Roma, Italy: FAO, 1977b.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015.

GADELHA, A. N.; COELHO, V. H. R.; XAVIER, A. C.; BARBOSA, L. R.; MELO, D. C. D.; XUAN, Y.; HUFFMAN, G. J.; PETERSEN, W. A.; ALMEIDA, C. das N. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. **Atmospheric Research**, v. 218, p. 231-244, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.001>. Acesso em: 20 jul. 2020.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimare. In: HANDBUCH der klimatologie. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. v. 1, part C., p. 1-44.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SILVA JÚNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; ROSSI, F. S.; BLANCO, C. J. C.; LIMA, M.; GOIS, G.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. B.; VANDERLEY, M. H. G. S. Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 9, p. 4478-4493, 2021.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985.

ROCKSTRÖM, J.; GORDON, L.; FOLKE, C.; FALKENMARK, M.; ENGWALL, M. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. **Conservation Ecology**, v. 3, n. 2, 1999. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26271715>. Acesso em: 30 mar. 2021.

ROST, S.; GERTEN, D.; BONDEAU, A.; LUCHT, W.; ROHWER, J.; SCHAPHOFF, S. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. **Water Resources Research**, v. 44, n. 9, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007WR006331>. Acesso em: 30 mar. 2021.

SANO, E.E.; FERREIRA, L.G.; ASNER, G.P.; STEINKE, E.T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2739-2752, 2007.

SIMPSON, J.; KUMMEROW, C.; TAO, W. K.; ADLER, R. F. On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 60, p. 19-36, 1996.

WANG, S.; PAN, M.; MU, Q.; SHI, X.; MAO, J.; BRÜMMER, C.; JASSAL, R. S.; KRISHNAN, P.; LI, J.; BLACK, T. A. Comparing evapotranspiration from eddy

covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 4, p. 1540–1560, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0189.1>. Acesso em: 30 mar. 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>. Acesso em: 30 mar. 2021.

CAPÍTULO 6

Geologia do Cerrado

Marcelo Ferreira da Silva

Márcio José Remédio

Mauricio Pavan Silva

Jônatas de Sales Macêdo Carneiro

Joanna Chaves Souto Araújo

Gilmar José Rizzotto

Ivan Pereira



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 3 e primeiro plano); Jônatas S. M. Carneiro (da esquerda para a direita - 1 e 2).

6.1 Introdução

Apesar de a geologia não despontar como elemento definitivo na composição dos biomas, o substrato sobre o qual se desenvolvem fauna e flora é fortemente controlado pela natureza, composição e estruturação das rochas de uma região. O mundo mineral fornece os elementos fundamentais para a viabilização da vida que se desenvolve sobre a litosfera e dita a necessidade ou não do uso de fertilizantes e outros aditivos para seu cultivo. Também é a estruturação dos componentes litológicos que condiciona a altitude e as feições do relevo. Dessa forma, o substrato rochoso é o componente que subjaz todo o bioma, e a Geologia, como ciência que estuda a Terra, é elemento fundamental para a melhor compreensão da distribuição do Cerrado em nosso território.

As diversas paisagens no Cerrado resultam da geodiversidade formada por rochas de variadas composições, idades e origens (Figura 6.1). Portanto, a complexidade de vincular o Bioma Cerrado a uma determinada formação rochosa é intrínseca às características do solo, aos fatores climáticos, bem como à altitude, relevo e evolução do solo, além do manto de alteração da rocha (regolito), que, por sua vez, depende da composição mineralógica da rocha.

Em um mesmo bioma, os padrões fitogeográficos estão, em geral, vinculados a determinantes físicos e químicos como solo, relevo e topografia (Allaby, 1992). Diante dessas premissas, o Cerrado mostra-se amplamente disseminado e é considerado o segundo maior bioma do Brasil, cobrindo uma área de 1,8 milhões a 2 milhões de quilômetros quadrados, o que corresponde a 204 milhões de hectares, equivalentes a cerca de 25% de toda a extensão territorial do País. O bioma Cerrado é encontrado nas unidades federativas de Goiás, Distrito Federal, Tocantins, Mato Grosso do Sul, sul de Mato Grosso, oeste de Minas Gerais, sul do Maranhão, oeste do Piauí, oeste da Bahia, e porções dos estados de São Paulo e Paraná, bem como há manchas de Cerrado Amazônico nos estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima.



Figura 6.1. Área de abrangência do bioma Cerrado (área limitada em vermelho) sobre mapa geológico do Brasil ao milionésimo⁷.

6.2 Conceitos geológicos fundamentais

A contextualização da geologia regional, assim como de alguns termos geológicos, proporciona melhor compreensão sobre os ambientes nos quais as unidades geológicas foram formadas e sua evolução tectônica. Por isso, será apresentada uma breve conceituação sobre

⁷ Para mais informações sobre a geologia apresentada, sugere-se a consulta das folhas 1:1.000.000 do território brasileiro no Repositório Institucional de Geociências (<https://rigeo.cprm.gov.br>). A base em SIG da geologia integrada do Brasil pode ser obtida em <http://geosgb.sgb.gov.br>, no item "Serviços > Downloads".

tectônica para que o leitor possa compreender a complexidade das unidades litológicas (associação de rochas) que compõem o arcabouço tectônico da Plataforma Brasileira, e sua relação com aspectos geomorfológicos e processos pedogenéticos.

Os constituintes básicos das rochas são os minerais, cuja variedade química e estrutura cristalográfica determinam suas características. De maneira geral, os minerais de estrutura mais complexa (por exemplo, tectossilicatos como quartzo) tendem a ser mais resistentes ao intemperismo, enquanto os de estrutura mais simples (por exemplo, nesossilicatos como olivina) são facilmente alterados pela ação da água, do vento e do tempo (intemperismo). Nesse mesmo sentido, os minerais mais ricos em magnésio e ferro, e mais pobres em sílica, comumente denominados máficos, são mais facilmente desagregados e frequentemente são ricos em elementos importantes para o crescimento das plantas, enquanto os minerais ricos em sílica e alumínio, denominados félsicos, tendem a ser mais resistentes ao intemperismo químico e mais pobres em cátions e ânions necessários para o crescimento saudável da maioria das plantas (Teixeira, 2000).

As rochas podem ser classificadas de acordo com sua origem, sendo que as rochas formadas pela cristalização do magma (massa mineral fluida ou pastosa, em estado de fusão, gerada a grande profundidade da superfície terrestre, cuja mobilidade e ascensão determinam os fenômenos vulcânicos ou plutônicos e que, ao resfriar, cristaliza-se, dando origem às rochas ígneas) são denominadas ígneas ou magmáticas e as rochas formadas pela deposição de fragmentos de rocha e grãos acumulados ou precipitados em uma bacia de sedimentação são denominadas sedimentares. As rochas formadas a partir da transformação das rochas ígneas ou sedimentares, por aumento da temperatura e pressão, são denominadas metamórficas (Teixeira, 2000). (Figura 6.2).

De maneira geral, a grande maioria das rochas metassedimentares, ou seja, aquelas formadas pelo metamorfismo de rochas sedimentares, são ricas em cristais de minerais mais resistentes ao intempe-

rismo e apresentam composição mais rica em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Rochas formadas pelo acúmulo de componentes precipitados quimicamente são denominadas rochas sedimentares químicas, cujo principal representante é o calcário, formado por carbonatos de cálcio ou magnésio (calcita e/ou dolomita). Por sua vez, uma parte das rochas ígneas e suas derivações metamórficas podem ser ricas em minerais máficos (ricos em cálcio, ferro e magnésio e pobres em sílica), portanto mais suscetíveis ao intemperismo e à erosão, ou outras rochas ígneas ricas em minerais félsicos (ricos em potássio e sílica), portanto mais resistentes à alteração.

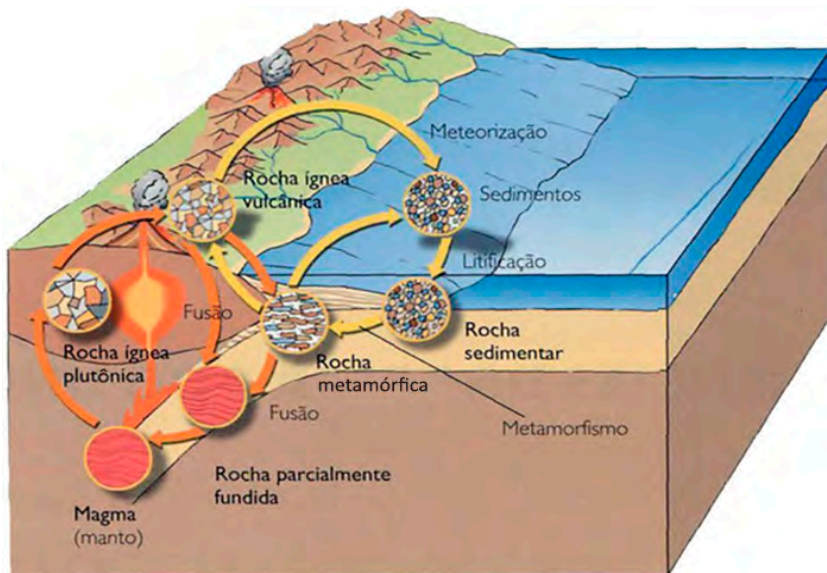


Figura 6.2. Tipos de rochas e seus ambientes de formação.

Fonte: Modificado de Agência Nacional de Águas (2023).

A maior parte das rochas de composição básica é gerada nas cordilheiras meso-oceânicas, um conjunto de montanhas vulcânicas submarinas onde ocorre a extrusão e posterior solidificação do magma basáltico, como nos oceanos Atlântico e Pacífico. As rochas formadas nesse ambiente constituem a crosta oceânica, cuja densidade é maior

do que a média das rochas encontradas nos continentes, fazendo com que o assoalho oceânico esteja invariavelmente em altitude mais baixa do que a média da topografia continental. Eventualmente, em ambientes tectônicos colisionais, como na costa do Pacífico, parte da densa crosta oceânica pode mergulhar sob o continente e se fragmentar, formando a zona de subducção de placas litosféricas relacionada ao processo de tectônica de placas.

À medida que a crosta oceânica de composição basáltica se desloca e mergulha profundamente, o aumento de pressão e temperatura no interior do planeta leva às transformações metamórficas, e nos casos extremos favorecem a fusão dessas rochas gerando novos magmas. Esses magmas tendem a ascender, formando cordilheiras vulcânicas de composição mais félsica (intermediária), como os andesitos, como na Cordilheira dos Andes (Blatt et al., 2006).

A disposição atual das rochas em um continente é, na verdade, reflexo de uma longa e complexa dinâmica de interação e formação de rochas durante longos períodos de sua história geológica, cujo resultado levará à formação de regiões mais ou menos férteis para o desenvolvimento de um determinado bioma. Da mesma forma, a morfologia de um terreno é fruto dessa complexa história e condiciona a existência de determinados padrões de fauna e flora.

De maneira geral, a geologia de grandes regiões pode ser compartimentada em províncias estruturais, cuja divisão no Brasil foi proposta por Almeida et al. (1981), conforme observado na Figura 6.3, em que, na maioria, ocorrem rochas metamórficas e ígneas com feições que sugerem uma história comum, e, em outras, representam bacias sedimentares, onde predominam sucessões de rochas sedimentares e, subordinadamente, rochas ígneas de maneira contígua.

Na região de predominância do bioma Cerrado, ocorrem unidades geológicas que compõem a Província Estrutural Tocantins, disposta em forma de arco com disposição predominantemente norte-sul e pequena ramificação para nordeste e sudoeste, tendo como principais unidades geotectônicas os cinturões Brasília, Araguaia e Paraguai

(Figura 6.3). Esse conjunto de rochas metamórficas e ígneas delimita blocos de rochas com mais de 2,5 bilhões de anos (tempo geológico), que representam antigos continentes do período Arqueano (Cráton do São Francisco a leste e Cráton Amazônico a oeste). No entanto, em suas porções sul, nordeste e oeste, a área de distribuição do bioma Cerrado tem seu substrato formado por rochas sedimentares e vulcânicas das bacias fanerozoicas do Paraná, do Parnaíba e do Parecis, respectivamente.

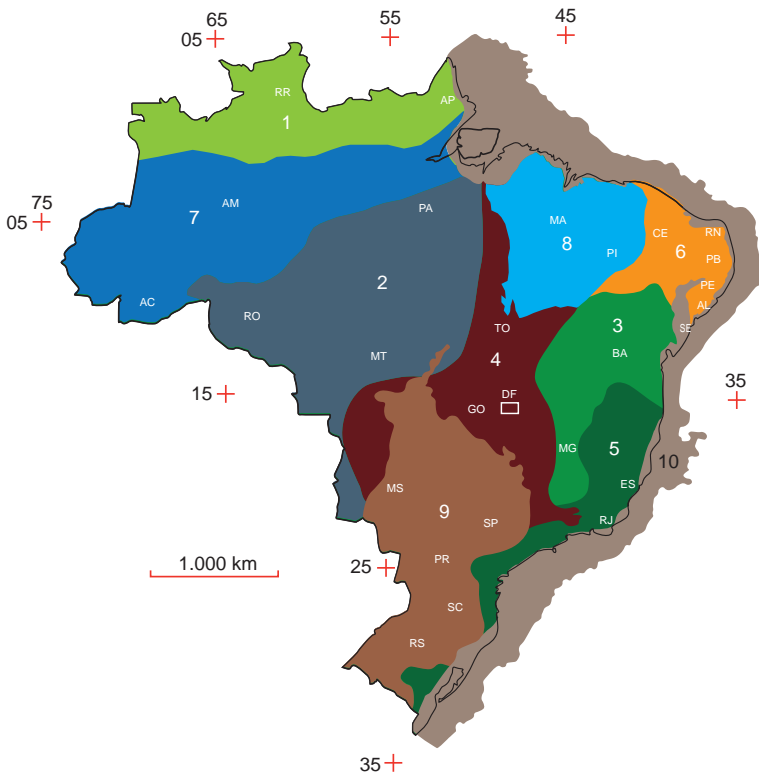


Figura 6.3. Mapa das províncias estruturais do Brasil. Os números correspondem às seguintes unidades tectônicas: 1 – Rio Branco; 2 – Tapajós; 3 – São Francisco; 4 – Tocantins; 5 – Mantiqueira; 6 – Borborema; 7 – Amazônica; 8 – Parnaíba; 9 – Paraná e 10 – Província Costeira e Margem Continental.

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (1981).

A Província Estrutural Tocantins compreende as faixas Araguaia, Paraguai e Brasília. É composta por rochas metamórficas predominantemente de origem ígnea em seu eixo central (Arco Magmático de Goiás, Maciço de Goiás e Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu), com rochas metassedimentares nos flancos leste e oeste, em cujas extremidades, especialmente no leste do estado de Goiás e na região central do estado de Mato Grosso, afloram rochas calcárias (Delgado et al., 2003) (Figura 6.4). Entre o domínio central e as faixas de rochas metassedimentares, ocorrem extensas áreas de rochas máficas e ultramáficas ricas em Mg e Ca (Complexos Máfico-Ultramáficos Barro Alto, Niquelândia e Canabrava).

A província consiste em sistema orogênico edificado no neoproterozoico, resultado da convergência entre os crátons Amazônico (a oeste) e São Francisco – Congo (a leste), além de blocos e/ou fragmentos cratônicos menores (blocos Parnaíba, Parapanema e Maciço de Goiás), durante a consolidação ocidental do paleocontinente Gondwana (Almeida et al., 1981; Pimentel; Fuck, 1992a; Pimentel et al., 2000; Mantovani; Brito Neves, 2009).

Resumidamente, Fuck et al. (1993, 2017), Fuck (1994), subdividem a Província Tocantins na Faixa Brasília, com os seguintes compartimentos: O seu segmento norte está orientado no sentido norte-sul, e se estende para leste até o cráton do São Francisco. A zona externa da Faixa Brasília é um cinturão de dobras e empurrões de rochas metassedimentares de margem passiva de baixo grau, bem como sequências sedimentares sin-orogênicas relacionadas a um arco magmático. A zona interna inclui sedimentos de mar profundo associados a uma mélangé ofiolítica, rochas vulcânicas e intrusivas cálcio-alcalinas do tipo arco, e granitos colisionais do tipo S. O grau metamórfico da Faixa Brasília aumenta para oeste, passando de rochas não metamórficas e de baixo grau, a leste, para rochas de fácies anfibolito de alta temperatura, culminando em granulitos de ultra-alta temperatura no núcleo metamórfico. A convergência dos crátons envolveu a subducção de uma ampla litosfera oceânica e o desenvolvimento de sistemas primitivos de arcos de ilhas. A convergência também aprisionou o Maciço de Goiás, um fragmento continental exótico, composto por terrenos gra-

nito-greenstone arqueanos, granito-gnaiss paleoproterozoico, complexos estratificados neoproterozoicos e rochas de cobertura proterozoicas, expostos entre o arco magmático e o núcleo metamórfico na parte central da faixa, e a zona externa mais ao norte (Fuck et al., 2017); além das faixas Paraguai e Araguaia (Figura 6.4). Eles constituem cinturões orogênicos, que representam cadeias de montanhas antigas no centro do Brasil, destacando-se como uma das mais importantes feições tectônicas do pré-cambriano do território brasileiro.

A Faixa Paraguai constitui um cinturão dobrado posicionado na borda meridional do Cráton Amazônico, na porção ocidental da Província Tocantins (Almeida, 1984). Essa unidade geotectônica é representada por uma espessa sequência de rochas sedimentares glaciomarinhas, turbiditos, carbonatos e rochas siliciclásticas depositadas em ambiente de margem passiva (Alvarenga; Saes, 1992; Alvarenga; Trompette, 1992, 1993; Alvarenga et al., 2000). A associação entre rochas metavulcânicas e glaciomarinhas com idades entre 750 e 700 Ma na Faixa Paraguai Oriental é representada por hialoclastitos, metabasaltos e metatufos intercalados com formações ferríferas bandadas, diamictitos e calcários dentro do mesmo ambiente deposicional (Silva et al., 2022). As faixas coevas Paraguai e Araguaia, no Brasil Central, podem ser consideradas um único cinturão dobrado Brasileiro (Almeida, 1974) por serem estratigraficamente semelhantes, hospedando formações ferríferas bandadas Neoproterozoicas e depósitos plataformais de rochas carbonáticas ricas em fósseis (Alvarenga et al., 2000; Osborne, 2001).

A Faixa Araguaia exposta no centro-norte do Brasil é formada por uma longa estrutura principal linear norte-sul de mais de 1,2 mil quilômetros, localizada entre a margem leste do Cráton Arqueano Amazônico e o Bloco Parnaíba e pelo Cráton São Luís a nordeste. É um domínio geotectônico neoproterozoico constituído principalmente por sucessões metassedimentares com exposições do embasamento em janelas tectônicas (Alvarenga et al., 2000; Hasui, 2012; Assis et al., 2021), e várias rochas magmáticas (Gorayeb et al., 2023a).

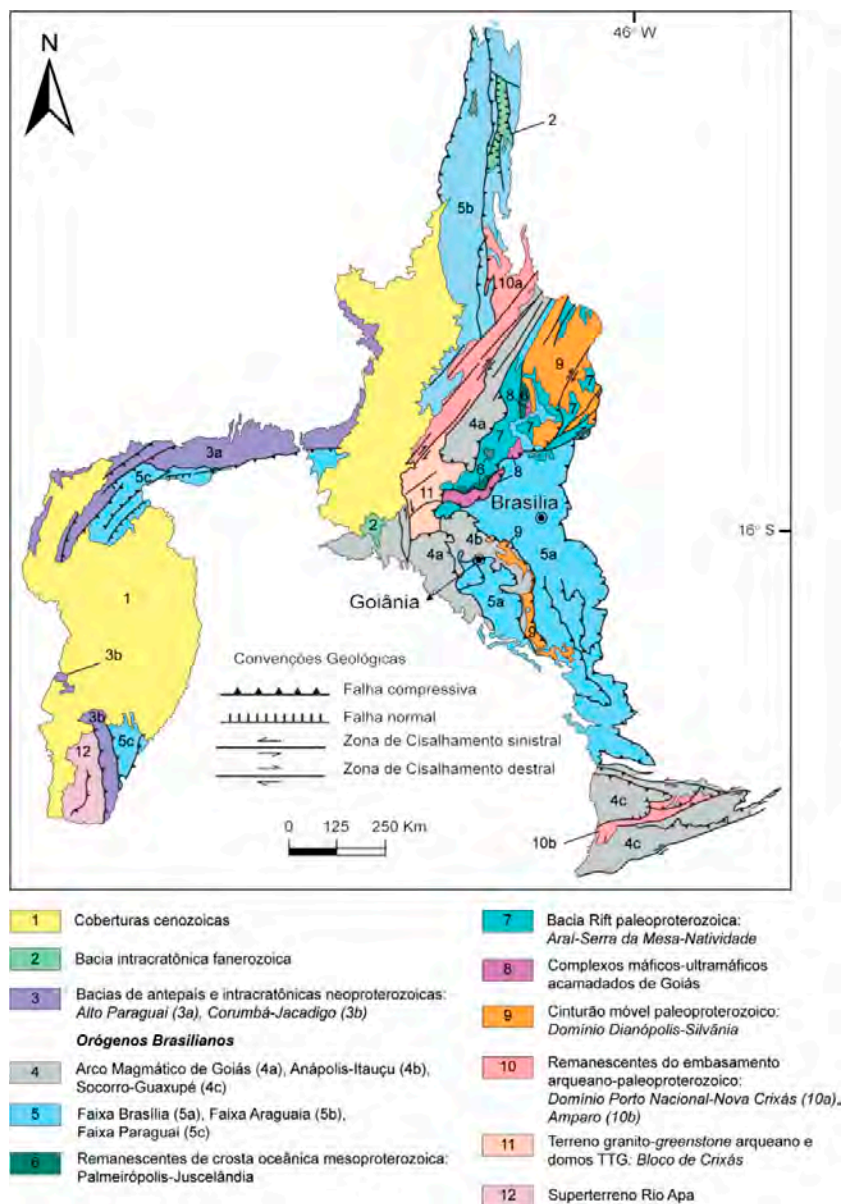


Figura 6.4. Mapa geológico simplificado da Província Estrutural Tocantins.

Fonte: Adaptado de Delgado et al. (2003).

6.3 Geologia do Cerrado em sua região de predominância no Brasil

Para uma melhor compreensão e descrição da geologia sobre a qual se desenvolveu o bioma Cerrado no país, segue descrição das unidades geológicas sob a área de abrangência do bioma, da porção mais oriental até a porção mais ocidental. Dessa forma, os diferentes compartimentos tectônicos e conjuntos de rochas devem ser melhor compreendidos.

6.3.1 Porção Oriental

Do ponto de vista geológico, a área de domínio do bioma Cerrado mais oriental ocorre sobre rochas sedimentares das bacias Sanfranciscana e do Parnaíba, bem como sobre o embasamento dessas unidades. Refere-se à porção leste do estado do Tocantins, bem como ao oeste da Bahia, oeste do Piauí e leste do Maranhão. Abrange ainda a região nordeste de Goiás e noroeste de Minas Gerais (Figura 6.5).

6.3.1.1 *Bacia Sanfranciscana*

A ampla distribuição do Cerrado, em grande parte preservado, na divisa entre os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia recobre estratos sedimentares da Bacia Paleozoica do Parnaíba, bem como arenitos eólicos das formações Posse e Serra das Araras, pertencentes ao Grupo Urucuia que, por sua vez, integra a sucessão sedimentar da Bacia Sanfranciscana (Kattah, 1991; Campos; Dardenne, 1994, 1997).

Na porção oeste da Bahia, esse conjunto rochoso dá forma ao Chapadão Ocidental Baiano, sustentado por arenitos e conglomerados cretáceos do Grupo Urucuia. O topo do chapadão é frequentemente sustentado por cornijas de arenitos silicificados e cangas lateríticas. Rampas de colúvio e tálus se espalham junto ao sopé das escarpas. Apesar de serem rochas muito aluminosas e pobres em nutrientes, sua disposição em amplos planaltos facilita a mecanização do solo. Além disso, os arenitos que subjazem a chapada atuam como aquíferos po-

rosos de alta condutividade hidráulica. Esses fatores combinados permitiram a utilização desse espaço para a agricultura.

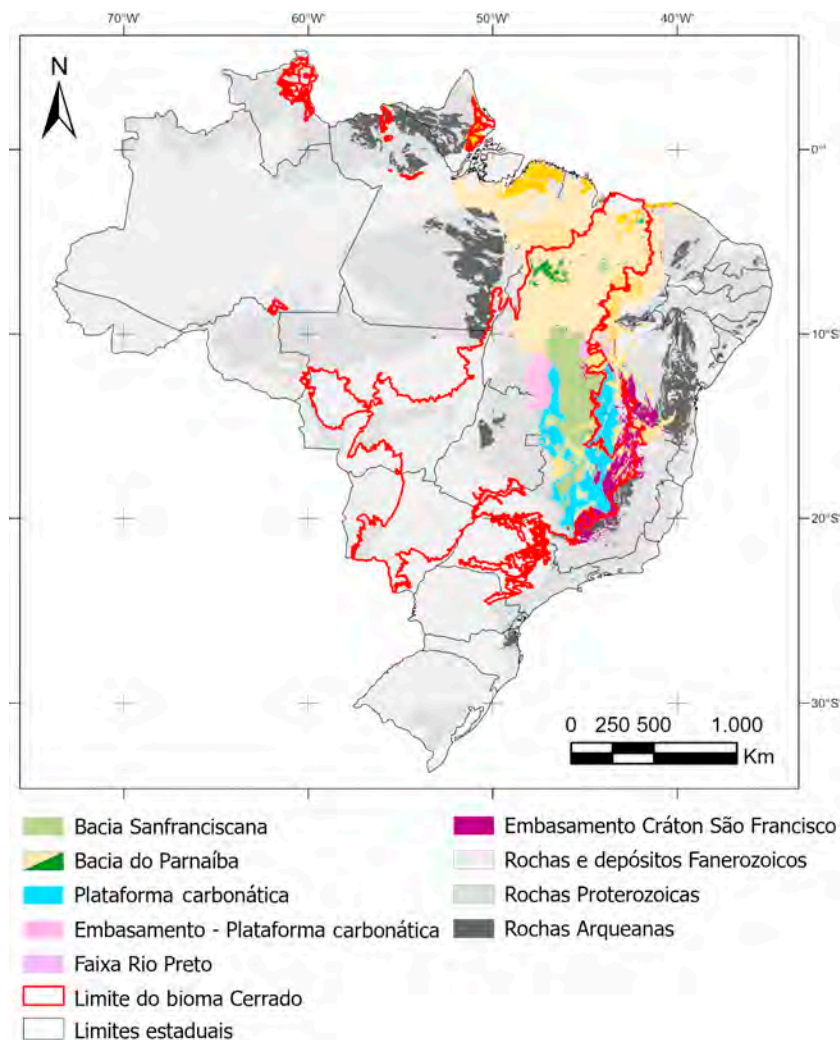


Figura 6.5. Mapa geológico simplificado do Brasil com destaque para as principais unidades geológicas sobre as quais o Cerrado se desenvolveu em sua porção mais oriental. Base geológica utilizada é a integração dos mapas do Brasil ao Milionésimo.

Por outro lado, a vegetação de Cerrado nativo ainda está conservada na divisa quádrupla entre os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, onde ocorre na denominada Chapada das Mangabeiras, que representa extensa superfície de cume regional denominada de Espigão Mestre (Dantas et al., 2013). Esse domínio delimita-se a oeste com os Baixos Platôs do Jalapão e os Patamares do Jalapão; e a leste, estende-se para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia. A fisiografia do platô do Espigão Mestre, assim como as escarpas erosivas que a circundam, é sustentada por arenitos e conglomerados cretáceos do Grupo Urucuia.

Em Minas Gerais, as rochas da Bacia Sanfranciscana são completamente cobertas pela vegetação do bioma Cerrado. Assim como em Tocantins e Bahia, essas rochas sustentam o relevo e formam serras e mesetas. Uma feição de relevo notável é a Serra das Araras, que deu nome à formação homônima. Compõem ainda a coluna estratigráfica da referida bacia as rochas dos grupos Santa Fé e Areado (conglomerados fluviais, siltitos, arenitos eólicos), de natureza predominantemente sedimentar, e dos arenitos e rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda (efusivas ultramáficas e alcalinas, conglomerados vulcânicos e arenitos vulcanoclásticos) (Silva et al., 2020).

Localmente, no sul do Piauí, o Cerrado recobre rochas metamórficas que formam o embasamento da Bacia Sanfranciscana. Essas rochas formam a Faixa Rio Preto e representam antigas bacias desenvolvidas sobre terrenos paleoproterozoicos e arqueanos (Souza et al., 2017). Na Bahia, esse embasamento é formado por rochas metamórficas de origem sedimentar das formações São Desidério, Serra da Mamona e Canabrinha e, localmente, pelo Complexo Correntina (Souza et al., 2003).

6.3.1.2 Bacia Paleozoica do Parnaíba

O Cerrado ocorre ainda sobre amplas extensões da Bacia do Parnaíba, notadamente nos estados do Piauí, Maranhão e Tocantins. A Bacia do Parnaíba, anteriormente denominada Bacia do Maranhão

ou do Piauí-Maranhão, ocupa uma área de cerca de 600 mil quilômetros quadrados, abrangendo parte dos estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (Góes; Feijó, 1994). A deposição das sucessões sedimentares da Bacia do Parnaíba é predominantemente siliciclástica, ocorrendo subordinadamente calcário, depósitos de anidrita e silexitos, além de diabásios e basaltos (Góes; Feijó, 1994).

Em sua porção mais oriental de ocorrência, o Cerrado está limitado pela área de exposição dos arenitos e conglomerados do Grupo Serra Grande, uma das unidades basais da Bacia do Parnaíba. Entretanto, a vegetação desse bioma recobre parte dos siltitos e arenitos vermelhos das formações Pimenteiras, Cabeças e Longá, pertencentes ao Grupo Canindé. Essas mesmas rochas ocorrem no limite ocidental da Bacia do Parnaíba e formam uma longa serra alinhada na direção norte-sul, denominada Serra do Estrondo, entre os vales dos rios Araguaia e Tocantins. Esse conjunto foi formado pela sedimentação de grãos e minerais ricos em sílica e alumínio em ambiente fluvial e deltaico.

Próximo ao limite entre os estados do Maranhão, Tocantins e Piauí, ocorrem as Chapadas do Alto Rio Parnaíba, que são revestidas integralmente por vegetação do bioma Cerrado (IBGE, 2007). No topo do planalto, desenvolvem-se perfis lateríticos ou detrito-lateríticos maduros e imaturos de idade paleógena. Subjacente a estas espessas formações superficiais, registra-se sequência de siltitos, folhelhos, arenitos, calcários e silexitos das formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba, pertencentes ao Grupo Balsas. Em toda essa região, encontram-se importantes depósitos de calcário agrícola e, mais raramente, de gesso, notadamente nas proximidades de Filadélfia, TO. Localmente, afloram basaltos das formações Mosquito e Sardinha, as quais são representadas por rochas vulcânicas basálticas, ricas em cálcio e magnésio.

Sobre esse conjunto, ocorrem depósitos de rochas siliciclásticas, isto é, formadas pela deposição de grãos de areia, silte e argila, reunidas nas formações Itapecuru, Grajaú, Corda e Codó. Essas unidades litoestratigráficas marcam o topo da Bacia do Parnaíba e ocorrem pre-

dominantemente no centro do Maranhão e estendem-se para o norte do Tocantins. Eventualmente, ocorrem lentes de mármore, produto do metamorfismo de rochas carbonáticas, depositadas principalmente sobre as formações Xambioá e Couto Magalhães. Podem também ocorrer camadas de siltito rico em fosfato, como observado na região de Xambioá, TO.

6.3.1.3 *Plataforma carbonática*

Adjacente à borda ocidental das bacias do Parnaíba e Sanfranciscana, na porção sudeste do Tocantins, ocorrem rochas metamórficas de origem sedimentar clástica e química, depositadas em uma antiga bacia com mais de 500 milhões de anos. Esse conjunto litológico compreende as rochas do Grupo Bambuí da Faixa Brasília, o qual se estende por todo o Nordeste de Goiás e predomina no meio-oeste de Minas Gerais. O conjunto é quase completamente coberto por vegetação do bioma Cerrado, excetuando-se apenas onde dá lugar à caatinga, no norte de Minas e no oeste da Bahia.

O Grupo Bambuí é composto, da base para o topo, por dolomitos e calcários argilosos, eventualmente com siltitos ricos em fosfato, da Formação Sete Lagoas, por folhelhos, siltitos e calcários argilosos da Formação Serra de Santa Helena, além dos calcarenitos, argilitos, margas, siltitos e calcilutitos da Formação Lagoa do Jacaré. Sobre esse conjunto ocorrem camadas de siltitos, com lentes de calcário, da Formação Serra da Saudade e por arenitos da Formação Três Marias (Martins-Neto et al., 2001; Alvarenga et al., 2007). Esse conjunto forma importantes relevos cársticos, onde se desenvolvem dolinas e cavernas, e representa volumosa fonte de insumos para a agricultura, a exemplo do que ocorre no oeste da Bahia.

6.3.1.4 *Embasamento da plataforma*

No sudeste do Tocantins, esse conjunto ocorre sobre embasamento de idade paleoproterozoica, constituído por rochas de origem ígnea, ricas em sílica, alumina e sódio, representadas por tonalitos, trondh-

jemitos e granodioritos (suítes TTG), agrupados no Complexo Almas-Cavalcante. A associação TTG é entremeada por rochas metamórficas de origem vulcânica máfica e sedimentar do Grupo Riachão do Ouro, bem como por ocorrências de rochas metamáficas do Complexo Gameleira (Ribeiro et al., 2022). Ocorrem também granitos aluminosos da Suíte Aurumina, que se estendem para o Nordeste de Goiás (Botelho et al., 1999). A Serra da Natividade compreende rochas metassedimentares em baixo grau metamórfico (xistos, metacalcários, filitos, quartzitos e metaconglomerados) do Grupo Natividade (Gorayeb et al., 1988; Toscani et al., 2021).

Em Minas Gerais, as rochas do Grupo Bambuí fazem contato com rochas do embasamento Arqueano (mais de 2,5 bilhões de anos), parte das rochas antigas do Brasil. Trata-se de gnaisses e granitoides dos complexos Divinópolis e Belo Horizonte, que compõem o Quadrilátero Ferrífero (Farina et al., 2015).

No norte de Minas Gerais, na divisa com a Bahia, o bioma Cerrado ocorre sobre rochas da Faixa Araçuaí (Almeida, 1977), integrante da Província Mantiqueira (Almeida et al., 1977). Entre os municípios de Rio Pardo de Minas e Espinosa ocorrem rochas metassedimentares das formações Ribeirão da Folha (micaxistos e rochas calcissilicáticas), Chapada Acauã (metadiamictitos), Santo Onofre (filitos, quartzitos e metaconglomerados), Nova Aurora (metadiamictitos ferruginosos), além de granitoides de idade neoproterozoica (granito pedra azul) e rochas sedimentares recentes detrito-lateríticas ferruginosas (Machado; Silva, 2010). Nessa região predomina o relevo de chapadas e platôs, havendo também vales encaixados.

A Serra do Espinhaço se destaca no relevo de Minas Gerais como um espigão norte-sul que corta o estado, desde o norte da capital Belo Horizonte até Espinosa, próximo à divisa com a Bahia. A serra é sustentada pelas formações arenosas e conglomeráticas do Supergrupo Espinhaço, como a Formação Galho do Miguel (metarenitos eólicos) e Sopa-Brumadinho (metarenitos, quartzitos e metaconglomerados, este último diamantífero) (Silva et al., 2020).

Ao sul e leste da Faixa Araçuaí ocorrem unidades relacionadas ao Cráton do São Francisco (Almeida, 1977). Nesse compartimento geotectônico, há rochas do embasamento, de idades paleoproterozoicas ou arqueanas (> 1,6 bilhão de anos) e rochas da cobertura do Cráton, com idade neoproterozoica (< 1,0 bilhão de anos) (Alkmim; Teixeira, 2017). Nos arredores de Pará de Minas, afloram rochas do embasamento granito-gnáissico (gnaisses, granodioritos, tonalitos), sequências metavulcanossedimentares de tipo greestone belt arqueanas, além de rocha do Grupo Bambuí mais ao norte. Entre a Serra do Espinhaço e as serras do oeste do estado (p. ex. Serra do Maxixe, Serra dos Alegres), tem-se um extenso domínio morfoestrutural com colinas suaves, platôs baixos, planaltos e tabuleiros, nos quais afloram as rochas da cobertura sedimentar (fracamente metamorfizada) e sequências vulcânicas do Cráton do São Francisco (Alkmim; Teixeira, 2017; Barbosa et al., 2021; Machado; Silva, 2010; Teixeira et al., 2017).

6.3.2 Porção centro-leste

Logo a leste da porção centro-leste, o Cerrado desenvolve-se sobre extensas faixas de rochas metamórficas de origem sedimentar da Faixa Brasília. Esse domínio ocupa a porção oeste de Minas Gerais, o leste de Goiás e a porção sudeste do Tocantins (Figura 6.6).

6.3.2.1 Rochas metassedimentares da Faixa Brasília

Na porção oeste de Minas Gerais, excetuando-se o Triângulo Mineiro (que será abordado a seguir), o bioma Cerrado ocorre sobre as rochas da Faixa Brasília, na divisa com o estado de Goiás. O relevo se caracteriza por colinas suaves, platôs e serras baixas. Nessa faixa de direção NNW-SSE, afloram unidades geológicas do Neoproterozoico (idade entre 1,0 bilhão e 0,5 bilhão de anos), representadas pelos grupos Vazante (metamargas, quartzitos e metassiltitos com contribuição carbonática, siltitos e carbonatos), Araxá (xistos, quartzitos e rochas metavulcânicas) e Canastra (quartzitos e filitos), expostos na Serra da Canastra (município de São Roque de Minas).

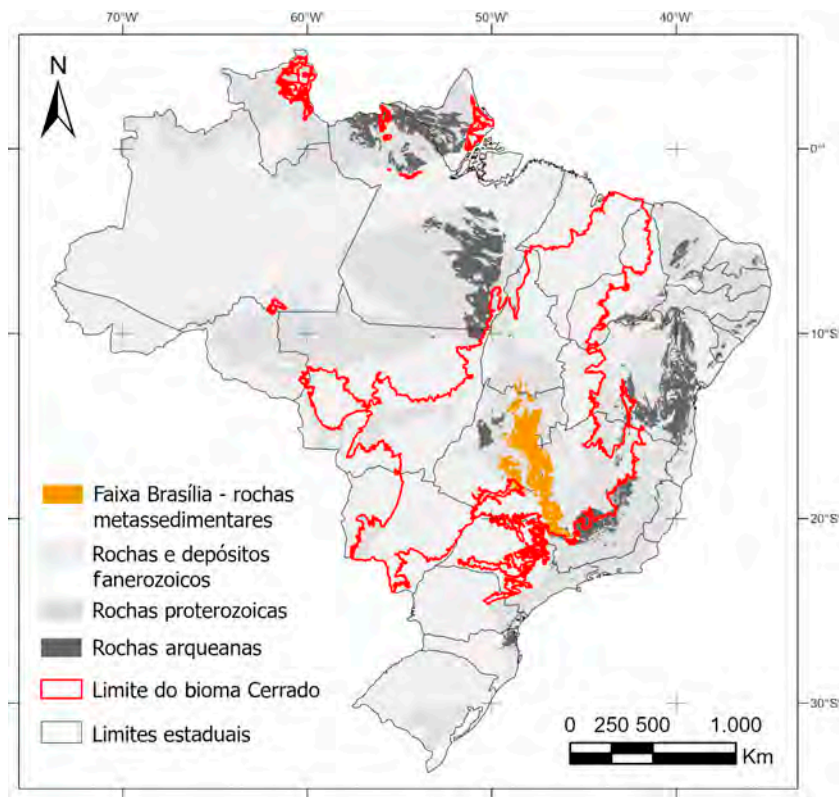


Figura 6.6. Mapa geológico simplificado do Brasil com destaque para as principais unidades geológicas sobre as quais o Cerrado se desenvolveu em sua porção centro-leste. Base geológica utilizada é a integração dos mapas do Brasil ao Milionésimo.

Uma extensa área que se prolonga da porção sudeste de Goiás e percorre toda a região leste do estado comporta rochas de origem sedimentar, que naturalmente tendem a gerar relevos aplainados. No entanto, a diferença de reologia (competência ou resistência à erosão e intemperismo) oriunda das diferenças composicionais dessas rochas, associada aos diferentes padrões de deformação, induzem a padrão de relevo bastante variado. Portanto, observa-se desde áreas com relevo aplainado até áreas de relevo pouco a muito acidentado, com predomí-

nio dos primeiros. Dessa forma, o cerrado está preservado nas regiões íngremes (morros e serras baixas), principalmente quando sustentados por metacalcários, metarenitos e quartzitos do Grupo Paranoá. Como exemplo, destaca-se o Salto do Itiquira, que representa a maior queda livre acessível do Brasil, com 168 m de desnível, localizado no Parque Municipal do Itiquira, cerca de 130 km a nordeste de Brasília. Contrariamente, os terrenos planos transformaram-se em áreas agricultáveis formadas pelas sucessões de rochas metassedimentares de granulação areia, silte e argila (rochas metassedimentares arenosos e siltico-argilosos) do Grupo Paranoá.

Localmente, corpos de rochas máficas alojam-se nos micaxistos do Grupo Araxá, os quais formam serras e pequenos morros, cujos exemplos são os corpos de Morro Feio e Abadiânia, ambos em Goiás (Moreira et al., 2008). Podem também ocorrer sequências de rochas metamórficas de origem vulcânica félsica e máfica, associadas a rochas metassedimentares, tais como a sequência Maratá, próxima a Ipameri (Moreira et al., 2008).

Esse conjunto de rochas está acomodado por meio de extensas falhas de empurrão, planos de descontinuidade entre os pacotes rochosos, evidenciando que grande volume rochoso foi alçado tectonicamente sobre outro. Principalmente na porção sudeste de Goiás, essas falhas de empurrão são seccionadas por extensas falhas ortogonais que funcionam como corredores de descolamento do pacote rochoso em rampas laterais. Ao longo dessas rampas ocorrem granitos, como o Granito Piracanjuba (Moreira et al., 2008).

6.3.2.2 *Embasamento da zona externa da Faixa Brasília*

Na porção nordeste de Goiás, ocorre o sistema montanhoso Veadeiros-Araí e as Serras de Arraias-Santa Brígida. Esse conjunto é sustentado por sucessões de rochas metassedimentares de idade mesoproterozoica, pertencentes à Faixa Brasília, representadas por rochas do Grupo Serra da Mesa e da Formação Traíras. Em decorrência de processos de erosão diferencial, os quartzitos têm alta resistência e

sustentam as cristas e serras elevadas, enquanto os xistos, calcários e mármore, menos resistentes ao intemperismo, afloram em áreas mais rebaixadas e desgastadas desse domínio serrano. Ocorrem também granitos e biotita granitos anorogênicos da unidade Serra Dourada de idade mesoproterozoica e sienitos da Suíte Alcalina de Peixe.

Na porção leste destas serras, afloram quartzitos, conglomerados e rochas metavulcânicas da Formação Arraías. Num contexto regional, observa-se relevo constituído por cristas de quartzito alternadas com superfícies aplainadas modeladas sobre domínios de xistos. Esta zona serrana é constituída de rochas metassedimentares intensamente dobradas da Formação Traíras, e dos grupos Serra da Mesa e Paranoá.

6.3.3 Porção central

Em grande parte de Goiás e no centro-sul do Tocantins ocorrem rochas metamórficas predominantemente de origem ígnea, enquanto na porção oeste do Tocantins e sudeste do Pará o bioma Cerrado recobre rochas predominantemente metassedimentares da Faixa Araguaia (Gorayeb et al., 2008). Para fins de melhor compreensão neste texto, esse conjunto rochoso pode ser dividido em complexos granulíticos, complexos máfico-ultramáficos, Arco Magmático de Goiás, Maciço de Goiás e Faixa Araguaia (Figura 6.7).

6.3.3.1 *Complexos granulíticos*

Rochas submetidas a altas temperaturas ($>700^{\circ}\text{C}$) e pressões moderadas a altas (5 a 12 kbar) são reequilibradas em alto grau metamórfico, e grande parte são denominadas de granulitos. Esse tipo de rocha ocorre extensivamente no sudeste de Goiás e nos arredores de Goiânia e Anápolis, bem como na região de Porto Nacional, em Tocantins. Costumam dar forma ao relevo do tipo colinas amplas e suaves, ou, em menor proporção, colinas dissecadas e relevos residuais do tipo inselbergs.

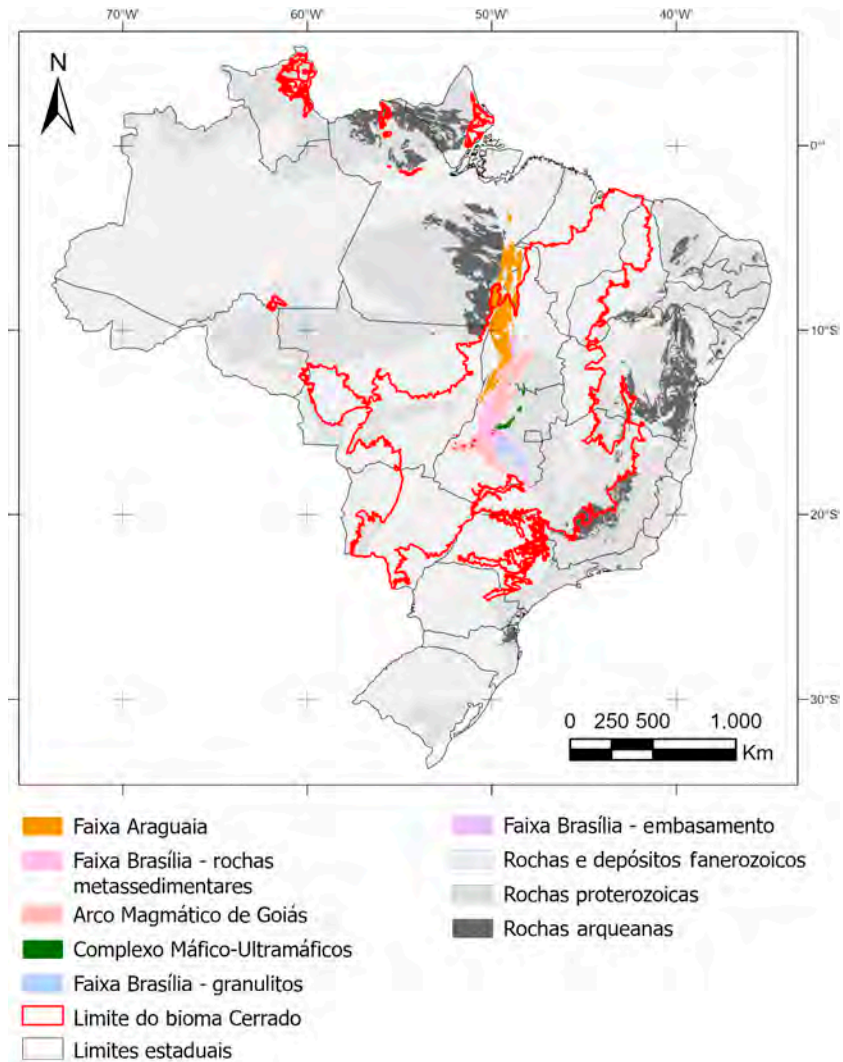


Figura 6.7. Mapa geológico simplificado do Brasil com destaque para as principais unidades geológicas sobre as quais o Cerrado se desenvolveu em sua porção central. Base geológica utilizada é a integração dos mapas do Brasil ao Milionésimo.

As unidades litoestratigráficas inseridas nesse domínio são representadas por gnaisses de alto grau metamórfico de origem ígnea ou sedimentar (orto e paraderivadas, respectivamente), pertencentes aos complexos Anápolis-Itauçu, Porangatu e Uruaçu, do Neoproterozoico, em Goiás, e os complexos Porto Nacional e Rio dos Mangues, do Paleoproterozoico, em Tocantins (Gorayeb et al., 2023b). Em Goiás, esse conjunto ocorre entremeado com restos de embasamento Paleoproterozoico (cerca de 2,0 bilhões de anos), como os granitoides da Suíte Jurubatuba e a sequência metavulcanossedimentar de Silvânia (Moreira et al., 2008).

Na região central do Tocantins, observam-se alinhamentos serranos representados pelas serras do Mourão, João Damião e Santo Antônio. As duas primeiras serras são sustentadas pelos gnaisses do Complexo Rio dos Mangues e granulitos do Complexo Porto Nacional, de idade paleoproterozoica (2,1 bilhões a 2,16 bilhões de anos), e a última pelos quartzitos do Grupo Natividade. Esse conjunto é intrudido por plútons graníticos ou gabroicos do Paleoproterozoico, a exemplo dos granitos da Suíte Ipueiras (2,08 bilhões de anos) (Chaves et al., 2008) e gabros e anortositos da Suíte Carreira Comprida (2,07 bilhões de anos) (Gorayeb: Moura, 2001), bem como granitos neoproterozoicos da Suíte Lajeado (552 milhões a 545 milhões de anos) (Gorayeb et al., 2013), além de exibir sequência vulcanossedimentar constituída por arenitos, conglomerados e rochas vulcânicas félsicas neoproterozoicas da Formação Monte do Carmo (Sabóia, 2009).

6.3.3.2 *Grandes complexos máfico-ultramáficos*

Na porção centro-norte de Goiás, o bioma Cerrado está preservado nos relevos acidentados, desde colinas dissecadas, morros, serras baixas, até montanhosas. Essas fisiografias são características do Complexo Cana Brava próximo à cidade de Minaçu, localizado no extremo norte do Goiás e ao sul do Tocantins, que representa juntamente com os complexos Niquelândia e Barro Alto, as maiores manifestações máfica-ultramáficas da região Central do Brasil. As rochas que com-

põem esse domínio ocorrem de forma esparsa, representadas por gabros, anfibolitos, dunitos, peridotitos e seus produtos serpentinizados.

Essas rochas são formadas por minerais muito suscetíveis ao intemperismo e ricos em cálcio e magnésio, por exemplo, plagioclásio, piroxênios, anfibólios e olivina. Tal natureza química fornece os elementos necessários para o desenvolvimento de perfil de solo profundo, argiloso e rico em nutrientes para o crescimento da vegetação, seja nativa ou de cultivo.

6.3.3.3 *Arco magmático de Goiás*

Amplas áreas distribuídas de maneira heterogênea em Goiás, desde o Sudeste até o Norte, estendendo-se para Tocantins, sendo o Sul recobertas pelos pacotes sedimentares da Bacia do Paraná e o Norte, pela Bacia do Parnaíba, compõem as sequências vulcanossedimentares relacionadas ao Arco Mágmatco de Goiás (Pimentel: Fuck, 1992b; Pimentel et al., 1996, 1998, 2000; Navarro, 2006, 2007; Frasca, 2015; Pimentel, 2016; Fuck et al., 2017). Esta complexa conjunção de ambientes geotectônicos é dividida em Arco Arenópolis, ao sul, e Arco Mara Rosa, ao norte. Estende-se desde a região de Pontalina ao sul de Goiás, passando por Bom Jardim de Goiás, Mara Rosa e Porangatu, prosseguindo em direção a Monte do Carmo no Tocantins, ocupando a porção mais ocidental da Faixa Brasília.

No caso dos granitoides deformados, sua presença é predominantemente na porção centro-norte de Goiás, com algumas ocorrências no sudeste. Grande parte dessas rochas foi agrupada na unidade Ortognaisse do oeste de Goiás (Moreira et al., 2008). Quando as rochas desse domínio estão em processo avançado de dissecação e intemperismo, geram superfícies arrasadas, com feições de relevo do tipo colinas amplas e suaves ou superfícies aplainadas conservadas, que ocupam áreas baixas e transformadas, inclusive, por processos de lateritização, com boa aptidão para agricultura.

Os gnaisses são separados por estreitas faixas de rochas metavulcanossedimentares, mais bem expostas na região entre os municípios

de Anicuns e Bom Jardim de Goiás. Exibem porções ricas em rochas máficas metamorfizadas e porções de rochas metassedimentares clásticas, isto é, formadas por grãos, frequentemente de minerais aluminosos e silicatados. Eventualmente, nessas sequências podem ocorrer alguns depósitos de rochas carbonáticas, os quais são importantes para a agricultura e economia local, devido à sua facilidade de acesso.

O domínio dos granitoides não deformados ocorre mais concentrado na porção oeste até a porção Central de Goiás, em faixa de direção NE-SW, além de esparsas ocorrências no norte do estado. Os principais representantes desse domínio são os granitos Serra Negra, Serra do Iran, Serra do Impertinente e Rio Caiapó (Moreira et al., 2008). As rochas granitoides de diversas unidades geológicas, cujas texturas podem ser granulares ou foliadas, a depender da deformação a que foram submetidas, possuem idades que variam do Arqueano ao Neoproterozoico. Esses domínios apresentam compartimentos de relevo com formas côncavas, arredondadas, de baixa a média amplitude, sendo as mais comuns as colinas dissecadas e as colinas amplas e suaves. Localmente podem ocorrer áreas mais acidentadas do tipo inselbergs ou morros e serras baixas.

Devido à grande variedade litológica desses domínios e às condições de metamorfismo e deformação em que se enquadram, as feições de relevo observadas são bastante variadas. No geral, há predominância de relevos colinosos, desde os amplos e suaves até morros e serras baixas. Mas são observados também relevos mais acidentados, especialmente onde as rochas são mais resistentes (como no caso de quartzitos). Neste último, o cerrado encontra-se intacto.

6.3.3.4 *Maciço de Goiás*

O Maciço de Goiás localiza-se na porção centro-oeste de Goiás, onde são cartografados extensos domos (batólitos) constituídos por ortognaisses (complexos Uvá, Caiçara, Anta, Caiamar, Moquém e Hidrolina), separados entre si por faixas de rochas metavulcânicas e

metassedimentares, conhecidas como cinturões de rochas verdes (por exemplo, terrenos greenstone belts de Crixás, Pilar de Goiás, Guarinos, Faina e Serra de Santa Rita). Esse terreno Arqueano-Paleoproterozoico estende-se por cerca de 18 mil quilômetros quadrados e é composto por aproximadamente 80% de complexos granito-gnáissicos e 20% de estreita faixa de rochas metavulcânicas e metassedimentares, pelo menos em parte do Paleoproterozoico (Queiroz et al., 2008; Jost et al., 2013, 2014).

Este cinturão de rochas verdes é composto por rochas metamórficas máficas (anfíbolitos, xistos) e ultramáficas (komatiítos, peridotitos e seus produtos serpentinizados), seguidas por associação superior de rochas metassedimentares. Devido à típica morfologia caracterizada por relevos fortemente ondulados, formando serras alinhadas, morros e colinas, o Cerrado nessas porções encontra-se preservado. Esses relevos pertencem, predominantemente, ao domínio geomorfológico montanhoso, mas também são observados representantes do domínio de morros e serras baixas e, menos comumente, domínio de colinas dissecadas. Os solos residuais gerados pela alteração das rochas máficas e ultramáficas (composição ferromagnésiana) desse domínio são, predominantemente, argilossiltosos e possuem baixa erosividade, o que lhes proporciona Savana Arbórea Densa mais exuberante, que compõe o Cerradão, devido à fertilidade do solo.

6.3.3.5 *Faixa Araguaia*

Na porção oeste do Tocantins e parte da região sudeste do Pará, o Cerrado recobre o vale do rio Araguaia, onde afloram rochas da Faixa Araguaia (Neoproterozoico). As diversas unidades litológicas que compõem esse compartimento tectônico variam desde rochas ígneas metamorfizadas (composição tonalítica a granodiorítica), do Complexo Colmeia e do Granitoide Cantão, a rochas metassedimentares (metapelíticas, metapsamíticas, rochas carbonáticas e calcissilicáticas) e mais raramente rochas metamáficas e metaultramáficas agrupadas no Supergrupo Baixo Araguaia. Nessa região, ocorrem ainda solos pro-

venientes de rochas máficas e ultramáficas, que se destacam em serras e morros alongados (serras Dois Irmãos, Morro Grande, Serrinha, Agostinho, Quatipuru, do Tapa) atribuídas à formação do assoalho oceânico da Bacia Araguaia (Suítes Ofiolíticas) há mais de 750 milhões de anos, a exemplo das suítes Quatipuru, Morro do Agostinho, Serra do Tapa e Grupo Rio do Coco (Ribeiro; Alves, 2017). Além disso, dezenas de corpos gabroicos metamorfizados na Suíte Gabroica Xambica (Gorayeb et al., 2023a).

As rochas do Supergrupo Baixo Araguaia, divididos nos grupos Estrondo e Tocantins, estão dispostas em extensa faixa de direção norte-sul, com grande variedade de xistos e quartzitos de origem sedimentar representados pelas formações Morro do Campo, Xambioá e Canto da Vazante, e clorita xistos, filitos e metassiltitos a oeste, das formações Pequizeiro e Couto Magalhães. O primeiro conjunto compõe as unidades basais da Faixa Araguaia que ocorrem em torno de domos de rochas gnáissicas tonalíticas arqueanas do Complexo Colmeia, que representam seu embasamento (Ribeiro et al., 2022).

As serras das Cordilheiras e do Estrondo são separadas pelo vale plano e aberto do ribeirão Santa Luzia, em grande parte sustentados por rochas metassedimentares da Faixa Araguaia (Alvarenga et al., 2000). Praticamente toda a Serra do Estrondo encontra-se revestida por fragmentos de vegetação de cerrado em meio a áreas desmatadas, excetuando-se sua porção norte, nas proximidades de Xambioá (extremo norte do Tocantins), onde se observam remanescentes de floresta ombrófila aberta (IBGE, 2007) sobre rochas metassedimentares do Grupo Estrondo da Faixa Araguaia. Um desses exemplos bem preservado encontra-se no Parque Estadual da Serra dos Martírios-Andorinhas, no município de São Geraldo do Araguaia, no sudeste do estado do Pará, fronteira com o Tocantins (Gorayeb, 2008) (Figura 6.8).



Foto: Paulo Gorayeb

Figura 6.8. Aspecto geral da vegetação de Cerrado com floresta ao fundo, instalado sobre quartzitos do Grupo Estrondo da Faixa Araguaia, preservados no Parque Estadual da Serra dos Martírios-Andorinhas, no sudeste do Pará.

Na porção centro-leste do estado do Tocantins, encontra-se uma importante compartimentação geomorfológica designada Planalto Dissecado do Tocantins, que está posicionada e revestida, integralmente, por vegetação do bioma Cerrado, com predomínio de cerrado típico e ocorrências esporádicas de capões de cerradão. Esta região abarca um conjunto de elevações de direção aproximada SSE-NNW que se estende por aproximadamente 250 km, dispostas em planaltos residuais, escarpas, serras e morros dissecados, abrangendo as denominadas Serras do Lajeado e do Carmo (altitudes de 600 a 700 m), dentre outras. Conforme explica Rocha (2019):

Em termos gerais, o Planalto Dissecado do Tocantins abrange a borda sudoeste da bacia sedimentar do Parnaíba e é formada, desde o topo do planalto dissecado até todo o seu reverso sustentado, por rochas sedimentares como folhelhos, siltitos e arenitos, de idade Siluro-Devoniana (443-358 Milhões de anos), pertencentes às formações Pimenteiras e

Serra Grande, da porção basal da Bacia do Parnaíba. Coberturas lateríticas ou detrito-lateríticas de idade Neógena capeiam as porções mais conservadas das superfícies planálticas (Rocha, 2019, p. 68).

As escarpas e os pediplanos subjacentes, por sua vez, encontram-se esculpidos em um complexo conjunto litológico da porção sudeste da Faixa Araguaia, composto pelo embasamento de idade Paleoproterozoica, formado por gnaisses do Complexo Rio dos Mangues, por granulitos do Complexo Porto Nacional e por batólitos (grandes massas ígneas intrusivas) graníticos de idade neoproterozoica, pertencentes à Suíte Lajeado (plútons graníticos Lajeado, Matança e Palmas) e paleoproterozoica (plúton granítico do Carmo), além da sequência vulcanossedimentar constituída por arenitos arcossianos, conglomerados e rochas vulcânicas ácidas, básicas e intermediárias do Neoproterozoico da Formação Monte do Carmo (Gorayeb, 1996; Sabóia, 2009; Ribeiro; Alves, 2017).

6.3.3.6 *Depósitos cenozoicos*

Na junção tríplice do Tocantins, Mato Grosso e Goiás ocorre o domínio de depósitos sedimentares inconsolidados ou pouco consolidados das planícies fluviais do Rio Araguaia e seus tributários. No médio vale do Rio Araguaia destaca-se uma grande bacia sedimentar quaternária – a Bacia do Bananal – que consiste na mais extensa área deposicional intracratônica moderna do Brasil Central, inserida numa faixa de transição entre os biomas do Cerrado e da Floresta Amazônica (Valente; Latrubesse, 2011). Trata-se de uma planície caracterizada por cotas topográficas e declividades inferiores a 200 m e 5%, respectivamente. Assim como o Pantanal Matogrossense, a bacia sedimentar da Ilha do Bananal representa sub-bioma peculiar do Cerrado Brasileiro que reserva extraordinária biodiversidade, específica das terras úmidas das savanas tropicais. Na porção do estado de Goiás, o cerrado nativo já inexistiu nesses terraços aluvionares, praticamente tornando-se áreas para o plantio. A bacia consiste em sequência de sedimentos continentais, fluviais, parcialmente inconsolidados, com depósitos de cascalhos na base, recobertos por areias, siltes e argilas mal selecionadas,

além de depósitos pantanosos formados por material argilo-arenoso rico em matéria orgânica, localizados nas margens do Rio Araguaia. As coberturas cenozoicas também englobam as formações de crostas detrítico-lateríticas ferruginosas.

O Cerrado que ainda resiste na porção sudoeste do Tocantins, mais precisamente na região divisa entre os estados do Tocantins e de Goiás, é conhecido como Graben de Água Bonita, que representa a seção sedimentar da bacia fanerozóica homônima (Ferreira et al., 2019). A Formação Água Bonita tem poucas dezenas de metros de espessura, constituída na base por conglomerados com seixos de quartzo em matriz quartzosa, parcialmente caulinítica. Em direção ao topo ocorrem arenitos micáceos, médios a grossos, localmente conglomeráticos, com intercalações de siltitos (Carvalho et al., 2010).

6.3.4 Porção ocidental

Na região Central de Mato Grosso, o Cerrado recobre toda a área de afloramento das rochas da Faixa Paraguai, do Neoproterozoico, bem como parte da Bacia dos Parecis. O bioma é limitado pela Bacia do Pantanal; no entanto, estende-se para o Sul, em Mato Grosso do Sul, onde se desenvolveu sobre as rochas da Faixa Paraguai e de seu embasamento (Figura 6.9).

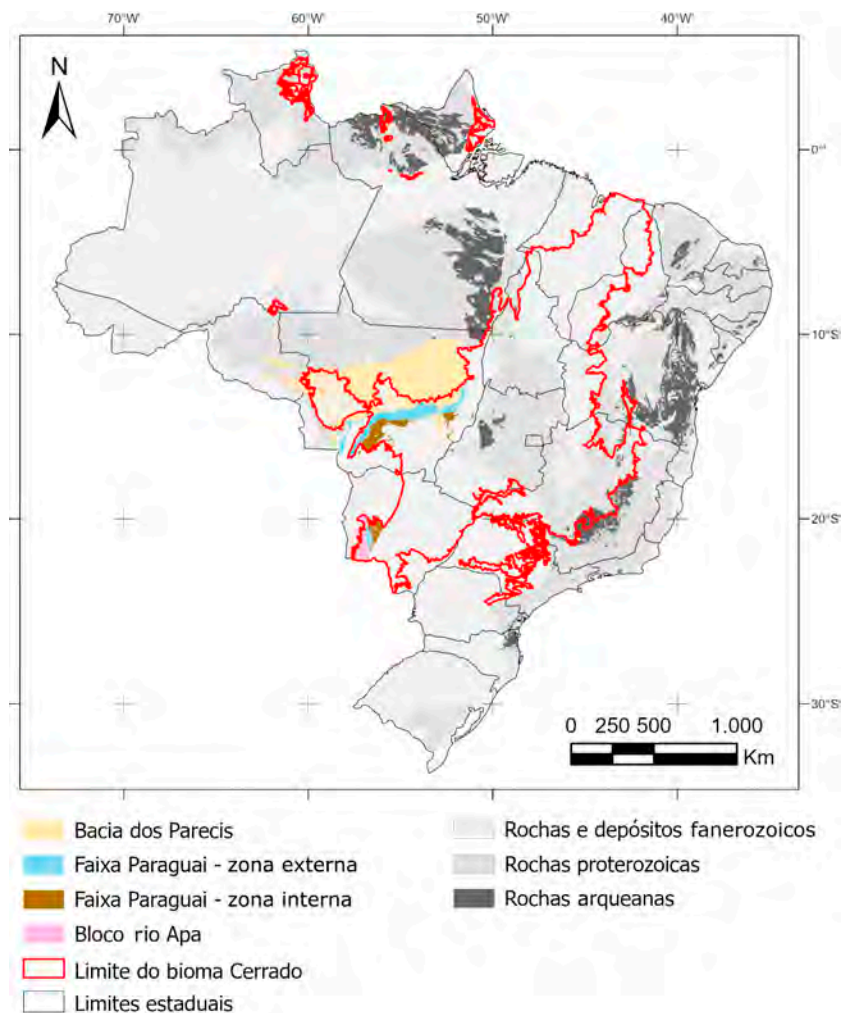


Figura 6.9. Mapa geológico simplificado do Brasil com destaque para as principais unidades geológicas sobre as quais o Cerrado se desenvolveu em sua porção mais ocidental. Base geológica utilizada é a integração dos mapas do Brasil ao Milionésimo.

6.3.4.1 *Faixa Paraguai*

As rochas da Faixa Paraguai, do Neoproterozoico, são completamente recobertas por vegetação do bioma Cerrado. Tratam-se de rochas formadas pela deposição e precipitação de sedimentos às margens do Cráton Amazônico e do Bloco Rio Apa, com rochas vulcânicas máficas e félsicas localizadas (Alvarenga et al., 2000; Silva et al., 2018; Silva et al., 2022). Esse conjunto exhibe deformação e metamorfismo crescente de oeste para leste, com o embasamento formado por rochas vulcânicas (hialoclastitos, metabasaltos e metatufos) e glaciomarinhas (formações ferríferas, diamictitos e calcários) da Sequência Metavulcanossedimentar Nova Xavantina, de idade aproximada de 750 Ma (Silva et al., 2022), formado por relevo convexo (formas conhecidas como meias-laranjas) sobreposto por rochas glaciomarinhas metasedimentares dobradas do Grupo Cuiabá, representado por sedimentação pelítica do tipo flysch (turbiditos), com quartzitos e calcários subordinados (Alvarenga et al., 2000; Boggiani et al., 2003; Boggiani; Alvarenga, 2004). O estágio intermediário é definido pelos diamictitos e argilitos (formações Puga e Bauxi), correlacionado ao último evento Criogeniano (Halverson et al., 2007), cobertos abruptamente pelas sucessões carbonáticas do Grupo Araras (formações Guia, Nobres e Pacu) (Nogueira et al., 2007; Souza et al., 2012). Rochas do Grupo Alto Paraguai com sedimentação "molássica" (Almeida, 1968) representam o estágio superior (formações Raizama, Sepotuba e Diamantino). Localmente essas rochas são intrudidas pelos granitos da Suíte São Vicente (Alvarenga; Trompette, 1992; Ruiz, 2005).

Algumas dessas unidades geológicas do Neoproterozoico, com idade superior a 540 milhões de anos, estendem-se para a porção sudeste de Mato Grosso do Sul, a oeste da Serra de Maracaju. Nesse setor ocorrem dois grupos de rochas com características distintas, porém sendo ambas recobertas pelo Cerrado. Rochas da Faixa Paraguai correspondem à porção transicional entre as Serras de Maracaju e o espigão da Serra da Bodoquena. As rochas do Grupo Cuiabá (metarenitos, metasiltitos e folhelhos), e do Grupo Corumbá (metapelitos, metacalcários,

formações ferríferas), formam relevo dominado por morros e serras baixas, com colinas suaves e alguns platôs e chapadas. A existência de rochas carbonáticas na região (metacalcários das formações Bocaina e Tamengo), é responsável pela formação de feições naturais de muita beleza cênica e alto potencial turístico, como o Abismo Anhumas (Bonito) e rios de águas cristalinas como o Rio Sucuri, entre outros. As rochas metareníticas também proporcionam características com alto valor turístico e natural, como o Buraco das Araras, em paredões de arenitos escarpados, no município de Jardim, MS (Figura 6.10).

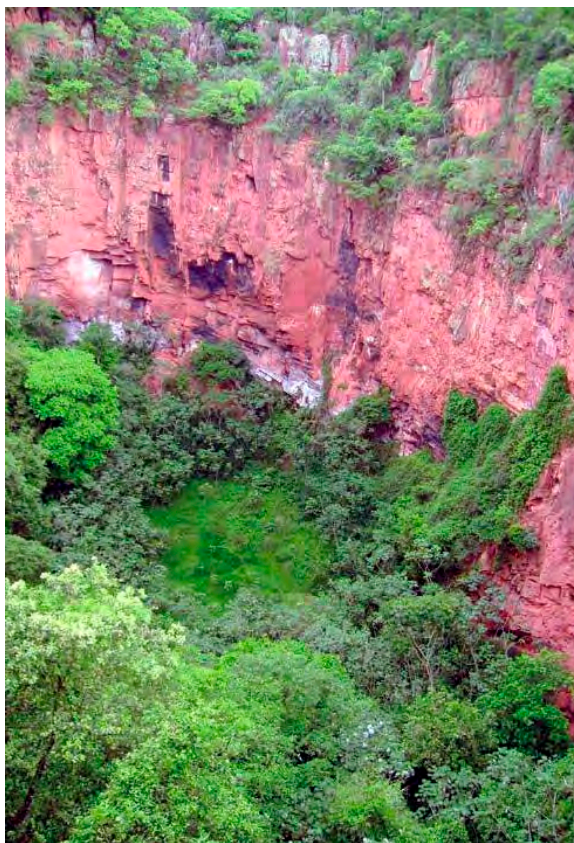


Figura 6.10. Vista geral do Buraco das Araras na Fazenda Alegria, Jardim, MS.

Fonte: Theodorovicz e Theodorovicz (2010).

O extremo sudeste do bioma Cerrado em Mato Grosso do Sul tem como substrato as rochas graníticas e metamórficas do terreno Rio Apa, um fragmento do Cráton Amazônico separado da unidade maior pela Bacia do Pantanal (Faleiros et al., 2016). A região é caracterizada pela Serra da Bodoquena, sustentada pelos batólitos da Suíte Alumiador (Lacerda Filho et al., 2020; Faleiros et al., 2014; Pavan et al., 2014). Ocorrem também intrusões graníticas deformadas por eventos tectônicos mesoproterozoicos (mais antigos que 1,3 bilhão de anos), como os gnaisses Caracol, Morraria, João Candido, Rio da Areia, Scardine, Suíte Baía das Garças (Remédio; Faleiros, 2014), além de outras unidades metamórficas como o Complexo Porto Murtinho (gnaiesses e granitos), Formação Alto Tererê (metarenitos e metabásicas) e Formação Rio Naitaca (metavulcânicas). Nesta região ocorrem também morros residuais do Gabro Morro do Triunfo e da Formação Serra da Bocaina (rochas vulcanossedimentares associadas à Suíte Alumiador).

6.3.4.2 *Bacia dos Parecis*

O Cerrado recobre parte considerável das rochas que formam a Bacia do Parecis (Paleozoico-Mesozoico), na porção central de Mato Grosso. O bioma ocorre ao longo de toda a porção sul da bacia e em sua porção oeste, estendendo-se esporadicamente para Rondônia. A Bacia dos Parecis é uma bacia intracratônica rica em rochas de origem sedimentar clástica, cujas rochas mais resistentes sustentam a chapada homônima (Lacerda Filho et al., 2004).

A vegetação do Cerrado desenvolveu-se sobre os silitos avermelhados da Formação Ponta Grossa, na borda sudeste da Bacia dos Parecis. Desenvolveu-se também sobre arenitos e conglomerados formados em antigos ambientes de rios meandantes e entrelaçados, das formações Utiariti e Salto das Nuvens, respectivamente. Localmente, recobrem arenitos depositados em antigas dunas, em ambiente eólico da Formação Rio Ávila (Lacerda Filho et al., 2004; Pedreira; Bahia, 2004).

6.3.5 Porção sul

A porção mais ao sul de ocorrência do bioma Cerrado tem como substrato as rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, que corresponde à porção sudeste de Mato Grosso, sul de Goiás, ao Triângulo Mineiro, bem como ao leste de Mato Grosso do Sul. Compreende também pequenas porções de São Paulo e Paraná (Figura 6.11).

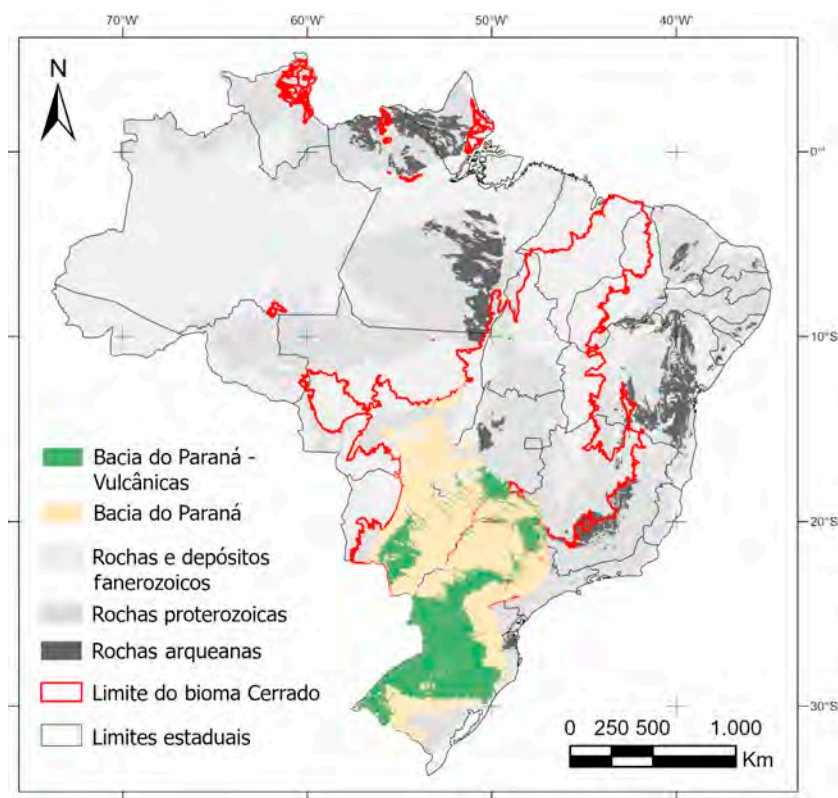


Figura 6.11. Mapa geológico simplificado do Brasil com destaque para as principais unidades geológicas sobre as quais o Cerrado se desenvolveu em sua porção mais meridional. Base geológica utilizada é a integração dos mapas do Brasil ao Milionésimo.

6.3.5.1 *Bacia do Paraná*

A partir do ponto de vista geomorfológico, o estado de São Paulo é compartimentado em cinco unidades (Província Costeira, Planalto Atlântico, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental) (Ross; Moroz, 1996), e o bioma Cerrado se faz presente em três delas. De oeste para leste, tomando toda a faixa territorial entre as divisas com Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Paraná, o Cerrado ocorre sobre as rochas da Bacia do Paraná na Província do Planalto Ocidental. Essa região perfaz cerca de 50% do território paulista (Ross; Moroz, 1996) e é caracterizada por relevo colinoso suave e amplo, com declividade entre 10 e 20%, intercalado pelas margens aplainadas dos principais cursos d'água que abastecem o Rio Paraná (rios do Peixe, Paranapanema, Tietê, São José dos Dourados, Turvo, entre outros. O substrato rochoso nessa porção do estado é representado por sequências sedimentares arenosas e areno-pelíticas do Grupo Caiuá (in-diviso), formações Araçatuba, Vale do Rio do Peixe, Santo Anastácio, além das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral (Perrotta et al., 2005; Peixoto, 2010).

Na borda leste do Planalto Ocidental ocorrem as Cuestas Basálticas, nas quais afloram arenitos eólicos da Formação Botucatu, intimamente ligados ao vulcanismo do Grupo Serra Geral, uma vez que ambos constituem relevo típico da região, com colinas e morros assimétricos, cuja superfície apresenta baixa inclinação, e encostas mais íngremes. Como exemplos podem ser citados a Serra de Itaqueri, em Ipeúna, e a Serra de São Pedro, em São Pedro. Esse tipo de relevo se desenvolve por diferença na erosão de acordo com o tipo de rocha afetado. Ocorrem também nesta área diversos morros residuais, como em Bofete (Pedra do Índio e Três Pedras).

A leste das Cuestas Basálticas, tem-se a Província da Depressão Periférica, na qual o Cerrado ocupa apenas parte, limitando-se à região entre Mogi Guaçu e Mococa, próximo à divisa com Minas Gerais, e à região entre Piedade, Itararé e Piraju, as duas últimas próximas à divisa com o Paraná. Nessas regiões ocorrem as sequências sedimentares

da Bacia do Paraná anteriores ao vulcanismo da Formação Serra Geral, sendo representadas principalmente pelos arenitos da Formação Pirambóia, folhelhos da Formação Corumbataí, siltitos da Formação Teresina e arenitos, folhelhos e diamictitos do Grupo Itararé. O relevo em ambas as regiões mencionadas é caracterizado por colinas com topos amplos (Ross, 1992).

Nas proximidades da divisa com o Paraná, o Cerrado recobre parte de unidades geológicas pré-cambrianas, como o Grupo Itaiacoca, aflorante na região de Bom Sucesso do Itararé e Itapeva, constituído por um pacote de rochas carbonáticas, básicas e folhelhos, metamorfizados em baixo grau. Também afloram na região granitoides da Suíte Três Córregos (Perrotta et al., 2005; Pavan et al., 2022).

No Paraná, o bioma Cerrado ocorre de forma restrita sobre a unidade morfoestrutural Segundo Planalto Paranaense (Mineropar, 2006), entre Tibagi e Sengés, na divisa com São Paulo. O relevo nessa região é representado por chapadas e platôs (Pinho, 2021). Nessa área o cerrado recobre rochas da Bacia do Paraná, especificamente arenitos da Formação Furnas, folhelhos da Formação Ponta Grossa e pacote de arenitos, folhelhos e diamictitos do Grupo Itararé (Besser et al., 2021).

No Triângulo Mineiro, entre Goiás e São Paulo, o Cerrado ocorre sobre as rochas sedimentares e derrames vulcânicos associados à Bacia do Paraná. Com predominância de relevo de colinas suaves e planaltos, o Cerrado se assenta sobre sequências de arenitos das formações Marília e Vale do Rio do Peixe, e das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral.

Na porção leste de Mato Grosso do Sul ocorrem planaltos sustentados pelos litotipos gerados pelo vulcanismo fissural básico e ácido do Grupo Serra Geral, que está intimamente ligado ao processo de quebra continental ocorrida durante os períodos Jurássico e Cretáceo que separou os continentes Sul-Americano e Africano. É sobre esse substrato que se encontra a Serra de Amambaí (divisa Brasil-Paraguai), entre Coronel Sapucaia e Ponta Porã. A Serra de Maracaju atravessa o estado de norte a sul, entre Antônio João (sul) e Sonora (norte). Em

sua parte sul, é sustentada pelos derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral. Ao norte de Campo Grande, na porção norte, a serra é constituída pelos arenitos e pacotes siltico-argilosos das formações Botucatu, Aquidauana, Ponta Grossa e Furnas. As sequências sedimentares associadas à Bacia do Paraná, além de formações mais recentes como depósitos detrítico-lateríticos ferruginosos (Theodorovicz; Theodorovicz, 2010), sustentam as serras Preta, das Araras e do Taquari, todas localizadas na porção norte do estado.

Na porção centro-leste de Mato Grosso do Sul, onde afloram rochas da Bacia do Paraná, têm-se unidades litológicas compostas essencialmente por arenitos de deposição eólica-fluvial do Grupo Caiuá (indiviso) e formações Santo Anastácio e Vale do Rio do Peixe, cujo relevo se caracteriza por ser pouco acidentado, com predomínio de colinas amplas e suaves (Figura 6.12), cuja amplitude varia entre 20 e 50 m (Theodorovicz; Theodorovicz, 2010).

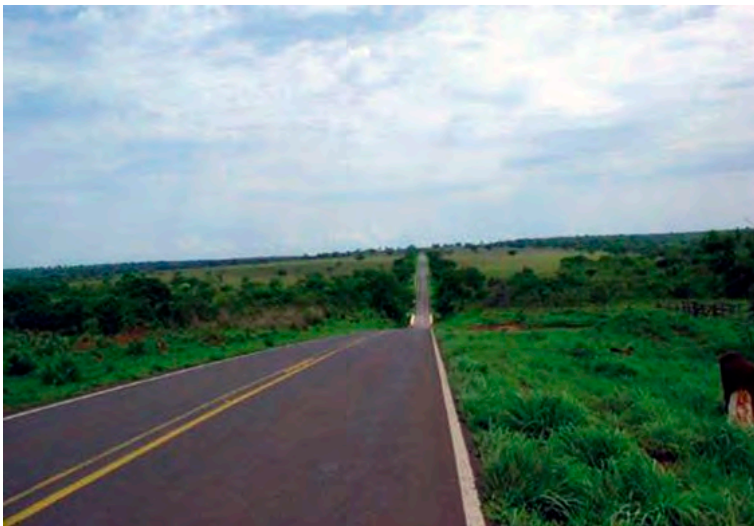


Figura 6.12. Relevo colinoso nos arredores de Água Clara (MS), sobre os sedimentos arenosos do Grupo Caiuá.

Fonte: Theodorovicz e Theodorovicz (2010).

Apesar de o bioma Cerrado, a priori, ser dominante em Goiás, a vegetação original foi quase totalmente eliminada ou alterada pela intensa atividade agrícola. Isto se deve ao fato do estado possuir extensas superfícies aplainadas, predominantemente sustentando áreas de chapadas e platôs. O parâmetro limitante a uma vegetação mais exuberante é o solo, pois onde ele é mais fértil, como na porção centro-sul do estado, do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, ocorre a Floresta Estacional Decidual. No extremo sul de Goiás afloram rochas básicas provenientes de derrames basálticos do Grupo Serra Geral, pertencentes à Bacia do Paraná, que produzem latossolo roxo e terra roxa estruturada latossólica, onde a vegetação é de Floresta Estacional Semidecidual. Estas rochas são, predominantemente, basaltos e diabásios de coloração cinza-escura. Como característica típica dessas formações rochosas, as formas de relevo a elas associadas são predominantemente aplainadas, o que culminou na transformação do Cerrado em amplas áreas de plantio.

Com grande domínio na porção sudoeste de Goiás, divisa com Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, há ocorrências de rochas da Formação Aquidauna (Neopaleozoico), composta por rochas sedimentares da Bacia do Paraná (Grupo Itararé), formada quase essencialmente por arenitos de diversos tipos e origens, mas também por diamictitos, sil-titos e folhelhos, menos frequentes. Por vezes estão intercaladas por camadas de rochas vulcânicas. Geralmente formam relevos aplainados, mas esta unidade também sustenta áreas de relevo pouco a muito acidentado, com morros baixos e até escarpas serranas. Também é comum a presença de relevos ruiniformes, e devido à dificuldade de acesso, o Cerrado está preservado principalmente quando os arenitos se fazem presentes, pela resistência intempérica do quartzo.

No extremo nordeste de Goiás, no sopé da Serra Geral de Goiás (divisa com a Bahia), superfícies horizontalizadas sob a forma de camadas ou lentes são extensas e sustentam o cerrado preservado. Outras porções preservadas do Cerrado em relevos semelhantes são observadas no sudoeste do estado, limítrofes com o sudeste de Mato Grosso e

nordeste de Mato Grosso do Sul, formando taludes com estratos (camadas) terciários bem marcados, depositados sobre rochas da Bacia do Paraná. Esses taludes consistem de sedimentos horizontalizados pouco consolidados da Formação Cachoeirinha, representados por areia, silte, argila, cascalho e, localmente, laterita, oriundos da erosão e retrabalhamento de rochas das unidades adjacentes. A exuberância dessas áreas revestidas pelo Cerrado deve-se ao latossolo da Formação Cachoeirinha proveniente do intenso processo de lateritização das rochas máficas do Grupo Serra Geral, bem como arenitos argilosos da Bacia Bauru.

Na porção sudoeste de Goiás também ocorrem diversos morros isolados correspondentes a rochas ígneas de natureza alcalina, conhecida como Província Alcalina de Goiás (Junqueira-Brod et al., 2002), a exemplo da Suíte Alcalina de Iporá, dos corpos Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros e vários outros. Esse conjunto de rochas alcalinas do Cretáceo, de natureza plutono-vulcânica máfico-ultramáfica, compreende associação de carbonatitos, kamafugitos, lamproítos, além de peridotitos, dunitos, gabros e piroxenitos. Esse conjunto de rochas comumente exibe elevados valores de elementos importantes para o crescimento saudável das plantas. Devido ao grau de fraturamento normalmente elevado, formam blocos de tamanhos métricos, e principalmente pelo relevo íngreme, o Cerrado encontra-se intacto nessas porções de morros e serras baixas.

6.3.6 Cerrado amazônico

Ocorrem enclaves de Cerrado em meio ao bioma amazônico. Suas ocorrências restringem-se à fronteira tríplice de Mato Grosso, Rondônia e Amazonas, ao Planalto das Guianas no nordeste de Roraima, notadamente no alto Rio Branco, à porção leste do Amapá e à estreita faixa na margem norte do Rio Amazonas, no estado do Pará, bem como na região do Tucumaque, no norte do Pará. Notadamente, esses enclaves de Cerrado na Região Amazônica recobrem rochas aluminosas e silicosas, frequentemente de origem sedimentar.

Nesta tríplice fronteira, a savana desenvolveu-se sobre arenitos e conglomerados da Formação Palmeiral (Reis et al., 2006). No nordeste de Roraima, desde o Monte Roraima e no interflúvio dos rios Uraricoera e Tacutu, bem como a jusante da confluência desses rios para a formação do Rio Branco, ocorre vegetação de cerrado sobre conjunto de rochas metassedimentares aluminosas e metavulcânicas félsicas, respectivamente Formação Uaimapuê e Grupo Surumu. Essa vegetação também se desenvolve sobre arenitos recentes da Formação Boa Vista (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2011). Semelhantemente, no Amapá, a Floresta Amazônica dá lugar a vegetação de savana sobre os sedimentos recentes na porção leste do estado, com forte influência do delta do Rio Amazonas (Barbosa et al., 2015).

No Pará, duas ocorrências de Cerrado Amazônico são mais salientes. Na região do Tucumaque, no norte do estado, a vegetação recobre rochas aluminosas representadas por granitos e gnaisses arqueanos indiferenciados, bem como de rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e granitos da Suíte Mapuera (Vasques; Rosa-Costa, 2008). Ocorre também estreita faixa de savana na margem esquerda do Rio Amazonas em região onde afloram predominantemente siltitos, folhelhos, arenitos e diamictitos das formações Trombetas, Jatapu, Ererê e Barreirinha, da Bacia do Amazonas (Vasques; Rosa-Costa, 2008).

6.4 Considerações finais

Diante do exposto, torna-se evidente que uma série de fatores inter-relacionados influencia as diversas paisagens do bioma Cerrado. Por um lado, destacam-se os fatores climáticos, como temperatura, pluviosidade e umidade relativa, que estão intrinsecamente ligados ao clima tropical sazonal, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos. No entanto, também é claro que os padrões fitogeográficos estão diretamente associados a determinantes físicos e químicos inerentes à composição mineralógica da rocha. Essa dinâmica é crucial e exerce influência direta sobre o intemperismo ao qual uma deter-

minada associação de rochas está sujeita, o que, por sua vez, molda a altitude, os aspectos fisiográficos (relevo) e a evolução do solo.

Nesse contexto complexo, a combinação de todos esses fatores propicia uma variação marcante entre as áreas de menor altitude (inferiores a 300 m), os chapadões situados entre 900 e 1.600 m e a ampla distribuição em latitude, conferindo ao Cerrado uma diversidade térmica considerável. Por outro lado, o padrão geral de precipitação média anual é uniforme, em torno de 1,5 mil milímetro. No entanto, em regiões de clima mais ameno, como ao sul do bioma Cerrado, a ocorrência de geadas é rara ou inexistente.

Em contraste com o cenário anteriormente descrito, nas proximidades da linha do Equador, os enclaves de Cerrado Amazônico geralmente se desenvolvem sobre rochas aluminosas e silicosas, frequentemente de origem sedimentar. Nessas áreas, que apresentam essas disjunções na Floresta Amazônica, elas têm sido denominadas por outros termos, como “savanas amazônicas”.

6.4 Referências

ALKMIM, F. F.; TEIXEIRA, W. The paleoproterozoic mineiro belt and the quadrilátero ferrífero. In: HEILBRON, M.; CORDANI, U.G.; ALKMIM, F. F. (ed.). **São Francisco Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent**. New York: Springer-Verlag, 2017. p. 71-94. (Regional geology reviews).

ALLABY, M. **The concise oxford dictionary of botany**. Oxford: Oxford University Press, 1992. 442 p.

ALMEIDA, F. F. M. Evolução tectônica do Centro-Oeste brasileiro no proterozoico superior. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 40, n. 2, p. 285-293, jun. 1968.

ALMEIDA, F. F. M. Sistema Tectônico Marginal do Cráton do Guaporé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. p. 11-12.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 349-364, 1977.

ALMEIDA, F. F. M. Província Tocantins, setor Sudoeste. In: ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y. (coord.). **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 265-281.

ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. de; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1/2, p. 1-29, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9).

ALVARENGA, C. J. S.; MOURA, C. A.; GORAYEB, P. S. S.; ABREU, F. A. M. Paraguay and Araguaia belts. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (ed.). **Tectonic Evolution of South America**, Rio de Janeiro: Instituto de Geociências, 2000. p. 183-193.

ALVARENGA, C.J. S.; SAES, G. S. Estratigrafia e sedimentologia do Proterozoico Médio e Superior da região Sudeste do Cráton Amazônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 4, p. 493-499, 1992. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992493499>.

ALVARENGA, C.J. S.; TROMPETTE, R. Glacial influenced turbidite sedimentation in the uppermost Proterozoic and lower Cambrian of the Paraguay Belt (Mato Grosso, Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 92, p. 85-105, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90136-S](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90136-S).

ALVARENGA, C. J. S.; TROMPETTE, R. Evolução tectônica Brasileira da Faixa Paraguai: a estruturação da região de Cuiabá. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23, n. 1, p. 18-30, 1993. Disponível em: <http://ppegio.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11580/11039>.

ALVARENGA, C. J. S.; BOTELHO, N. F.; DARDENNE, M. A.; LIMA, O. N. B.; MACHADO, M. A. **Nota Explicativa das Folhas monte Alegre de Goiás (SD.23 – V – C – III), Cavalcante (SD.23 – V – C – V) e Nova Roma (SD.23 – V – C – VI)**. [Brasília, DF]: CPRM, 2007. 67 p. Escala 1:100.000.

ASSIS, C. R. F.; MOURA, C. A. V.; MILHOMEM NETO, J. M.; GORAYEB, P. S. S.; DIAS, A. N. C. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope systematics of the Araguaia Belt basement rocks: evidence of links with the southeastern Amazonian Craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 356, 106090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.2021106090>.

BARBOSA, J. S. F.; LUCIANO, R. L.; CRUZ, B. E.; SANTANA, J. dos S.; MORAES, A. M. V.; MASCARENHAS, J. F. **Mapa Tectônico-Geocronológico do Estado da Bahia, implicações metalogenéticas**: nota explicativa. Salvador: CPRM, 2021. v. 1. 54 p. Escala 1:1.000.000

BARBOSA, J. P. O.; CHAVES, C. L.; COSTA NETO, M. C.; ANJOS, G. C.; COSTA, L. T. R. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Macapá – NA.22-Y-D, estado do Amapá**. Belém: CPRM, 2015.

- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná**. Curitiba: CPRM, 2021. Escala 1:600.000.
- BLATT, H.; TRACY, R. J.; OWENS, B. E. *Petrology: Igneous, Sedimentary, and Metamorphic*. 3rd. ed. New York: W.H. Freeman, 2005. 530 p.
- BOGGIANI, P. C.; ALVARENGA, C. J. S. Faixa Paraguai. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. de. (org.). **Geologia do continente Sul - Americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 113-120.
- BOGGIANI, P. C.; FERREIRA, V.; SIAL, A.; BABINSKI, M.; TRINDADE, R. I. F.; ACEÑOLAZA, G. F.; TOSELLI, A.; PARADA, M. A. The cap carbonate of the Puga Hill (Central South America) in the context of the post-Varanger Gaciation. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., 2003, Salvador. **Short papers of the IV South American symposium on isotope geology**. Salvador: CBPM IRD, 2003. p. 324-327.
- BOTELHO, N. F.; ALVARENGA, C. J. S.; MENESES, P. R.; D'EL-REY SILVA, L. J. H. Suíte Aurumina: uma suíte de granitos Paleoproterózoicos, Peraluminosos e Sintectônicos na Faixa Brasília. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 7.; SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 10., 1999, Brasília, DF. **Resumos...** Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Geologia, 1999. p. 17.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. A carta estratigráfica da Bacia Sanfranciscana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Camboriú. **Boletim de resumos**, p. 54-56, 1994.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997. DOI: 10.25249/0375-7536.1997269282.
- CARVALHO, D. L. O. de; VIDOTTI, R. M.; ARAÚJO FILHO, J. O. de; MENESES, P. R. Caracterização geofísica do Graben de Água Bonita. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 4., 2010, Brasília, DF. **[Anais...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileiro de Geofísica, 2010. 6 p.
- CHAVES, C. L.; GORAYEB, P. S. S.; MOURA, C. A. V. Geologia, geocronologia e litoquímica dos granitos paleoproterozoicos tipo-A do setor setentrional da Província Tocantins. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 366-378, 2008.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa de Geodiversidade do Estado de Roraima**. 2011. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14711>. Acesso em:

DANTAS, M. E.; ARMESTO, R. C. G.; ADAMY, A. A origem das paisagens. In: SILVA, C. R. (ed.). **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 3, p. 33-56.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I. C. N.; SOUZA, L. V.; RENK, J. F. C. Compartimentação geomorfológica do estado do Maranhão. In: BANDEIRA, I. C. N. (ed.). **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. Cap 3, p. 31-62.

DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L.C.; SILVEIRA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; LACERDA FILHO, J. V.; VALENTE, C. R.; PERROTA, M. M.; HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, R. M.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (ed.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**, Brasília, DF: CPRM, 2003. p. 227-334.

FALEIROS, F. M.; CALTABELOTI, F. P.; PINTO, L. G. R. **Folha SF.21-V-B-VI Aldeia Tomazia**: carta geológica. São Paulo: CPRM, 2014. Escala 1:100.000.

FALEIROS, F. M.; PAVAN, M.; REMÉDIO, M. J.; RODRIGUES, J. B.; ALMEIDA, V., CALTABELOTI, F. P.; PINTO, L. G. R.; OLIVEIRA, A. A.; PINTO DE AZEVEDO, E. J.; COSTA, V. S. Zircon U–Pb ages of rocks from the Rio Apa Cratonic Terrane (Mato Grosso do Sul, Brazil): new insights for its connection with the Amazonian Craton in pre-Gondwana times. **Gondwana Research**, v. 34, p. 187-204. 2016. DOI: 10.1016/j.gr.2015.02.018.

FARINA, F.; ALBERT, C.; LANA, C. The Neoproterozoic transition between medium and high-K granitoids: clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). **Precambrian Research**, v. 266, p. 375-394, 2015. DOI: 10.1016/j.precamres.2015.05.038.

FRASCA, A. A. S. **Amálgamas do W-Gondwana na província de Tocantins**. 172 f. 2015. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

FUCK, R. A. A faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 4., 1994, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Geologia; Núcleos Brasília e Centro-oeste, 1994. p. 184-187.

FUCK, R. A.; JARDIM de SÁ E. F.; PIMENTEL, M. M.; DARDENNE, M. A.; PEDROSA SOARES, A.C. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (ed.). **O Cráton do São Francisco**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia : Núcleos Bahia e Sergipe, 1993. p. 161-185.

FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. ; ALVARENGA, C. J. S. ; DANTAS, E. L. The Northern Brasília Belt. In: HEIBRON, M.; CORDANI, U.G.; ALKIMIM, F.F. (ed.). **São Francisco**

Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent. Amsterdã: Springer, 2017. p. 205-220. (Regional Geology Reviews).

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 57-67, 1994.

GORAYEB, P. S. S.; COSTA, J. B. S.; LEMOS, R. L.; GAMA JUNIOR, J. R. T.; BEMERGUY R. L.; HASUI, Y. O Pré-Cambriano da região de Natividade, GO. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 18, p. 391-397, 1988.

GORAYEB, P. S. S. **Petrologia e evolução crustal das rochas de alto grau de Porto Nacional-TO**. 1996. 262 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém.

GORAYEB, P. S. S.; MOURA, C. A. V. Aspectos geológicos e geocronológicos do Anortosito Carreira Comprida, região de Porto Nacional-TO. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA AMAZÔNIA, 7., 2001, Belém. **Resumos expandidos...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia: Núcleo Norte, 2001. p. 544-547.

GORAYEB, P. S. S. **Parque martírios-andorinhas:** conhecimento, história e preservação. Belém: EDUFPA, 2008. 354 p.

GORAYEB, P. S. S.; CHAVES, C. L.; MOURA, C. A. V.; LOBO, L. R. S. Neoproterozoic granites of the Lajeado Intrusive Suite, north-center Brazil: a late Ediacaran remelting of a Paleoproterozoic crust. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 45, p. 278-292, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2013.04.001>.

GORAYEB, P. S. S.; BARROS, G. S.; MOURA, C. A. V.; DANTAS, E. L.; ASSIS, C. R. F. Scapolite metagabbros of the Xambica Suite: A Tonian OIB magmatism in the crustal evolution of the Araguaia Belt. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 123, 104217. 2023a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104217>.

GORAYEB, P. S. S.; GALARZA, M. A.; MENEZES, E.O. Rhyacian evolution of high-grade metamorphic rocks of the Porto Nacional Granulite Complex, based on geochronological data U-Pb-Hf in zircon and U-Pb in monazite. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 121, 104093. 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104093>.

HAIDAR, R. F.; FELFILI, J. M.; PINTO, J. R. R.; DIAS, R. R.; DAMASCO, G.; SILVA, L.C. R.; FAGG, C. W. Florestas estacionais e áreas de ecótono no estado do Tocantins, Brasil: parâmetros estruturais, classificação das fitofisionomias florestais e subsídios para conservação. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 261-290, 2013.

HALVERSON, G. P.; DUDÁS, F.O.; MALOOF, A.C.; BOWRING, S.A. Evolution of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of Neoproterozoic seawater. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 256, p. 103-129, 2007.

HASUI, Y. Sistema orogênico Tocantins. In: HASUI, Y. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 289-325.

IBGE. **Geologia**. Mapa geológico do estado do Tocantins. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro. 2007. Escala 1:1.000.000.

JOST, H.; CARVALHO, M. J.; MAAS, M. V. R.; MARTINS, R. Metalogenia dos greenstone belts de Goiás. In: SILVA, M. da G. da; ROCHA NETO, M. B.; JOST, H.; KUYUMJIAB, R. M. (org.). **Metalogenia das províncias tectônicas brasileiras**. Brasília, DF: CPRM, 2014. v. 1, p. 141-168. (Série Metalogenia).

JOST, H.; CHEMALE JÚNIOR, F.; FUCK, R. A.; DUSSIN, I. A. Uvá complex, the oldest orthogneisses of the ArcheanPaleoproterozoic terrane of central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 47, p. 201-212, 2013.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; ROIG, H. L.; GASPAR, J. C.; AFFONSO, B. J.; MENESES, P. R. A Província Alcalina de Goiás e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 559-566, 2002. Disponível em: <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9853>. Acesso em: 22 ago. 2022.

KATTAH, S. S. **Análise faciológica e estratigráfica do Jurássico/Cetáceo Inferior da Porção Meridional da Bacia do São Francisco, Oeste do Estado de Minas Gerais**. 1991. 213 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

LACERDA FILHO, J. V.; ABREU FILHO, W.; VALENTE, C. R.; OLIVEIRA, C. C.; ALBUQUERQUE, M.C. **Geologia e Recursos Minerais do estado de Mato Grosso**. Goiânia: CPRM, 2004. 200 p. Programa integração, atualização e difusão de dados da geologia.

LACERDA FILHO, J. V.; FUCK, R. A.; RUIZ, A.S.; DANTAS, E. L.; RODRIGUES, J. B.; SCANDOLARA, J. E. Rio Apa Block: A juvenile crustal fragment in SW Amazonian Craton and its implications for Columbia supercontinent reconstitution. **Journal of Geology**, v. 128, n. 5, p. 415-444, 2020.

MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. 94 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.

MANTOVANI, M. S. M.; BRITO NEVES, B. B. The Paranapanema lithospheric block: its nature and role in the accretion of Gondwana. In: GAUCHER, C.; SIAL, A. N.; HALVERSON, G.; FRIMMELHE, H. (ed.). **Neoproterozoic cambrian**

tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana. Hardcover: Elsevier, 2009. p. 257-272. (Developments in Precambrian Geology, v. 16). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(09\)01619-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(09)01619-3).

MARTINS-NETO, M. A.; PEDROSA-SOARES, A. C.; LIMA, S. A. A. Tectono – sedimentar evolution of sedimentar basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 141, p. 343-370, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00082-3).

MINEROPAR. **Mapa Geomorfológico do Estado Paraná.** Curitiba, 2006. Escala 1:650.000.

MORAES, L. L. de. **Da Geologia à hidrologia.** Brasília, DF: ANA, [2023]. Slides de palestra. Disponível em: <https://shre.ink/DjGk>. Acesso em: 06 fev. 2023.

MOREIRA, M. L.; MORETON, L. C.; ARAÚJO, V. A.; LACERDA FILHO, J. V.; COSTA, H. F. **Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal.** Goiânia: CPRM/SIC : Funmineral, 2008. Escala 1:500.000.

NAVARRO, G. R. B. **Geologia da Região Pontalina (GO).** 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Rio Claro.

NAVARRO, G. R. B. Geoquímica de Gnaisses do Arco Magmático de Goiás na Região Sul do Estado de Goiás. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 7, n. 1, p. 19-28, 2007.

NOGUEIRA, A. C. R.; RICCOMINI, C.; SIAL, A. N.; MOURA, C.A.V.; TRINDADE, R. I. F.; FAIRCHILD, T. R. Carbon and strontium isotope fluctuations and paleoceanographic changes in the late Neoproterozoic Araras carbonate platform, southern Amazon craton, Brazil. **Chemical Geology**, v. 80, p. 168-190, 2007.

OSBORNE, G. C. Geotectonics and Mineralization in the Ophiolite Assemblages of the Araguaia Marginal Basin, Pará and Tocantins States, Central Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., 2021, Belém. **Resumos expandidos...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia: Núcleo Norte, 2001. CD-ROM.

PAVAN, M.; CALTABELOTI, F. P.; PINTO, L. G. R. **Folha SF.21-V-D-III Fazenda Santa Otília:** carta geológica. São Paulo: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000.

PAVAN, M.; OLIVEIRA, A. A.; CALTABELLOTTA, F. P.; FALEIROS, F. M., CAMPANHA, G.A.C. **Geologia e recursos minerais da Folha SG.22-X-B-II, Guapiara, Estado de São Paulo.** São Paulo: CPRM, 2022. Escala 1:100.000.

PEDREIRA, A. J.; BAHIA, R. B. C. **Estratigrafia e evolução da Bacia dos Parecis:** região Amazônica, Brasil. Belém: CPRM, 2004. 39 p.

PERROTTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; LOPES, R. C.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S. D.; SACHS, L. L. B.; MEIRA, V. T.; GARCIA, M. G. M.; LACERDA-FILHO, J. V. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM, 2005. Escala: 1:750.000. (Programa Geologia do Brasil).

PEIXOTO, C. A. B. **Geodiversidade do estado de São Paulo**. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. São Paulo: CPRM. 2010. 176 p.

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. **Geology**, v. 20, n. 4, p. 375-379. 1992a. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)0202.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)0202.3.CO;2).

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A. Características geoquímicas e isotópicas de unidades metavulcânicas e ortognáissicas neoproterozóicas do Oeste de Goiás. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, Núcleo Centro-Oeste, n. 15, p. 1-22. 1992b.

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A.; JOST, R. A.; FERREIRA FILHO, C. A.; ARAÚJO, S. M. The basement of the Brasília Fold Belt and Goiás Magmatic Arc. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. **Tectonic evolution of South America**. Rio de Janeiro: 2000. p. 195-230.

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A.; SILVA, DEL'REY L. J. H. Dados Rb-Sr e Sm-Nd da região de Jussara-Goiás-Mossâmedes (GO), e o limite entre terrenos antigos do Maciço de Goiás e o Arco Magmático de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 26, p. 61-70, 1996.

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A.; GIOIA, S. M. C. Novos dados Sm-Nd e o limite leste do Arco Magmático no sudeste de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia: Núcleo Minas Gerais, 1998. p. 39.

PIMENTEL, M.M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 67-82. 2016.

PINHO, D. **Geodiversidade do Estado do Paraná**. Levantamento da Geodiversidade. São Paulo: CPRM, 2021. 287 p. Programa Geologia do Brasil.

QUEIROZ, C.L.; JOST, H.; SILVA, L.C.; MCNAUGHTON, N. J. U-Pb SHRIMP and Sm-Nd geochronology of granite-gneiss complexes and implications for the evolution of the central Brazil Archean terrain. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 26, p. 100-124. 2008.

REIS, N.J.; ALMEIDA, M.E.; RIKER, S.L.; FERREIRA, A.L. **Geologia e Recursos Minerais do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2006.

REMÉDIO, M. J.; FALEIROS, F. M. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Fazenda Margarida - SF.21-X-C-IV – Estado do Mato Grosso do Sul**. São Paulo: CPRM. 2014. Escala 1:100.000.

RIBEIRO, P. S. E.; ALVES, C. L. **Geologia e recursos minerais da região de Palmas – Folhas Miracema do Norte SC.22 – X – D, Porto Nacional SC.22 – Z – B e Santa Teresinha SC.22 – Z – A**. Goiânia: CPRM, 2017. Escala 1:250.000.

RIBEIRO, P.S.E.; FRASCA, A.A.S.; CARNEIRO, J.S.M.; HATTINGH, K.; REZENDE, E.S.; MARTINS, F.R. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Tocantins**. Goiânia: CPRM, 2022.

ROCHA, M. G. **Geodiversidade do Estado do Tocantins** Goiânia: CPRM, 2019. 170 p. [Livro eletrônico].

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 6, p. 17-30, 1992.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista de Departamento de Geografia**, n. 10, p. 41-58, 1996.

RUIZ, A. S. **Evolução Geológica Do Sudoeste Do Cráton Amazônico Região Limítrofe Brasil Bolívia-Mato Grosso**. 2005. 289 f. Tese (Doutor em Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SABÓIA A.M. **O vulcanismo em Monte do Carmo e litoestratigrafia do Grupo Natividade, Estado de Tocantins**. 2005. 289 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SILVA, M. A.; PINTO, C. P.; PINHEIRO, M. A. P.; MARINHO, M. S.; LOMBELLO, J. C.; PINHO, J. M. M. P.; GOULART, L. E. A.; MAGALHÃES, J. R. **Mapa geológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2020. Escala 1:1.000.000.

SILVA, M. F. da; DANTAS, E. L.; MATTEINI, M.; TRINDADE, R. I. F. Late Tonian explosive volcanism and hyaloclastites in northern Paraguay Belt, Central Brazil: a record of Rodinia break-up in western Gondwana. **Precambrian Research**, v. 382, 106862, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106862>.

SILVA, M. F.; SANTOS, D. R. V.; SOUZA, J. O. **Geologia e Recursos Minerais das folhas Nova Xavantina, SD.22-Y-B-IV, e Placa Nativa, SD.22-Y-A-VI: estado de Mato Grosso**. Campo Grande: CPRM, 2018.

SOUZA, J. O.; SANTOS, D. R. V.; SILVA, M. F.; FRASCA, A. A. S.; BORGES, F. R.; GOLLMANN, K. **Projeto Planalto da Serra - Estado de Mato Grosso**. Goiânia: CPRM-GO, 2012. Programa Geologia do Brasil.

SOUZA, J. D.; KOSIN, M.; MELO, R. C.; SANTOS, R. A.; TEIXEIRA, L. R.; SAMPAIO, A. R.; GUIMARÃES, J. T.; VIEIRA BENTO, R.; BORGES, V. P.; MARTINS, A. A. M.; ARCANJO, J. B.; LOUREIRO, H. S. C.; ANGELIM, L. A. A. **Mapa Geológico do Estado da Bahia**. Salvador: CPRM, 2003. Versão 1.1. Escala 1:1.000.000. Programas Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB).

SOUZA, F. R.; BARROS, R. A.; CARVALHO, C. D.; REZENDE, E. S.; BROD, E. R.; BARROS, A. C. P. **Carta de integração geológica**: faixa. Rio Preto. Teresina: CPRM, 2017. Escala 1:250.000.

TEIXEIRA, W. (org.). **Decifrando a terra**. [São Paulo]: Companhia Editora Nacional. 2000. 557 p.

TEIXEIRA, W.; OLIVEIRA, E. P.; MARQUES, L. Nature and Evolution of the Archean Crust of the São Francisco Craton. In: HEILBRON, M.; CORDANI, U.G.; ALKMIM, F. F. (org.). **São Francisco Craton, Eastern Brazil**. Switzerland: Springer, 2017. v. 1, p. 29-56.

THEODOROVICZ, A. M. G.; THEODOROVICZ, A. **Geodiversidade do Estado de Mato Grosso do Sul. Levantamento da Geodiversidade**. São Paulo: CPRM, 2010. 142 p. Programa Geologia do Brasil.

TOSCANI, R.; CAMPOS, J. E. G.; MARTINS-FERREIRA, M. A. C.; MATOS D. R.; BORGES, C. C. A.; DIAS, A. N. C.; CHEMALE, F. The Statherian Natividade Basin evolution constrained by U–Pb geochronology, sedimentology, and paleogeography, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, 103618, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103618>.

VALENTE, C. R.; LATRUBESSE, E. M. Fluvial archive of peculiar avulsive fluvial patterns in the largest Quaternary intracratonic basin of tropical South America: the Bananal Basin, Central-Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 356-357, p. 62-74, 2011.

VASQUES, M. L.; ROSA-COSTA, L.T. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará**. Belém: CPRM, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10443>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CAPÍTULO 7

Potencial Hidrogeológico do Cerrado

Vagney Aparecido Augusto

José Eloi Guimarães Campos



7.1 Introdução

A frase “o Cerrado é o berço das águas” é comumente dita pelas pessoas que habitam a ampla região de distribuição deste bioma. Entretanto, a maior parte das pessoas, aparentemente, não entende o real significado dessa expressão.

A região do Cerrado tem um clima com marcante sazonalidade, evidenciada pela variação regular da umidade do ar, da temperatura, da nebulosidade, da evapotranspiração e das chuvas em certos períodos do ano. As chuvas são abundantes nesta região, variando em médias entre 1,5 mil e 1,2 mil milímetros por ano, contudo, são mais frequentes entre outubro e abril e menos frequentes entre maio e agosto.

Assim, como explicar que o Cerrado seja o berço das águas, se em média existe um período de 4 a 5 meses sem chuvas ou com baixa taxa de precipitações? A resposta a essa questão não está diretamente associada ao clima dos Cerrados, mas às suas águas subterrâneas. A disponibilidade de água na região do Cerrado deve ser pensada como a soma das águas excedentes das chuvas (nos períodos chuvosos) mais a produção hídrica dos aquíferos (nas épocas de secas).

Uma cena emblemática é a observação de uma vereda alagada ou de um córrego com água no pico do período seco, em que, mesmo sem a ocorrência de nenhuma chuva em mais de 120 dias, é possível observar água corrente em seu leito a uma distância de 1 km ou 3 km de sua nascente (Figura 7.1). Sem dúvida, o fluxo desse curso de água não é de escoamento de chuvas, mas mantido a partir da descarga do reservatório subterrâneo (aquífero).

A importância das chuvas para os mananciais é fácil de ser verificada. Basta iniciar as primeiras chuvas que a paisagem se transforma, de um ambiente seco amarelado para uma paisagem verde, tanto em áreas naturais quanto de lavouras não irrigadas. Por outro lado, é perceptível que as vazões dos cursos de águas superficiais aumentam logo após o início das chuvas. Entretanto, a importância das águas subterrâneas para a manutenção hídrica das nascentes, córregos, rios

e lagoas não é de fácil percepção, pois se trata de um manancial pouco tangível e não visível.

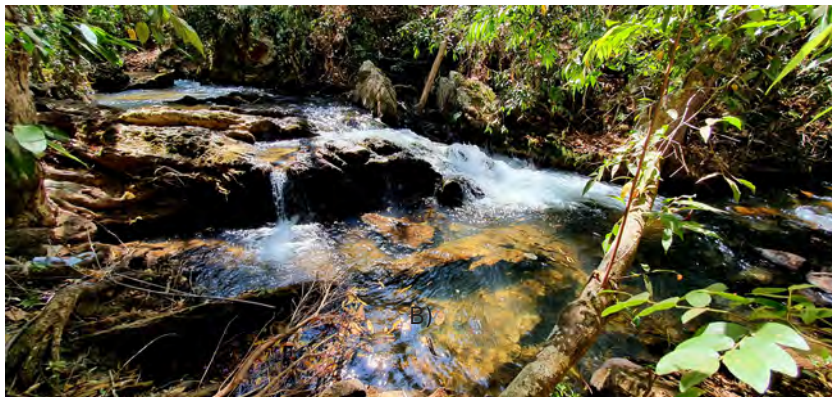


Foto: Vagney A. Augusto

Figura 7.1. Trecho do Ribeirão Santana cerca de 3 km de sua nascente, em agosto de 2022, no período seco, Distrito Federal.

Historicamente no Brasil, as águas subterrâneas não têm recebido, até o momento, a mesma atenção por parte das políticas públicas, gestores ou mesmo pelos setores usuários das águas, em comparação aos recursos hídricos superficiais.

Os mecanismos de armazenamento e circulação das águas subterrâneas são em grande parte desconhecidos pela sociedade e, por isso, os impactos, benefícios e sua importância para os ecossistemas, abastecimento humano e produção agrícola são negligenciados.

Assim, o objetivo deste Capítulo é apresentar os conceitos gerais sobre as águas subterrâneas, as funções e classificação dos aquíferos, e sua importância para a região do Cerrado. Dentro do possível, será utilizada linguagem acessível com apresentação de exemplos observados na própria região.

Os dados e informações apresentadas neste texto são provenientes de trabalhos técnicos e acadêmicos e da experiência dos autores sobre a hidrogeologia da região do Cerrado.

7.2 Aspectos conceituais

Aquífero é todo reservatório de água subterrânea, sendo representado por materiais naturais incluindo diferentes tipos de rochas ou solos (Fetter, 2004). O aquífero é dividido em duas porções principais: zona não saturada (ou de aeração) e zona saturada, tendo entre elas a zona de transição ou franja capilar (Figura 7.2). A descarga dos aquíferos mantém a perenidade dos cursos d'água superficiais nos períodos secos do ano.

Os aquíferos podem ser classificados em função dos tipos de espaços vazios que os compõem, estes espaços vazios são denominados em conjunto de porosidades. A classificação básica fundamentada nos tipos de porosidades inclui três grupos: aquíferos intergranulares, fraturados ou fissurais, e cársticos.



Figura 7.2. Seção esquemática mostrando as diferentes zonas do aquífero e suas relações com o rio.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos intergranulares (Figura 7.3) são aqueles em que a água está armazenada entre grãos e/ou fragmentos, ou seja, os reservatórios formados por solos (materiais inconsolidados) ou por rochas sedimentares (consolidadas ou maciças) (Freeze; Cherry, 1979). Aquíferos intergranulares rasos em solos são amplamente utilizados pela po-

pulação, sendo representados por perfis de solos mais espessos. Em muitas cidades e áreas rurais da região do Cerrado, no Brasil, existem centenas de poços escavados de grandes diâmetros (cisternas ou cacimbas), que são construídos manualmente nesse tipo de aquífero, e servem como a principal fonte de água subterrânea para a população.

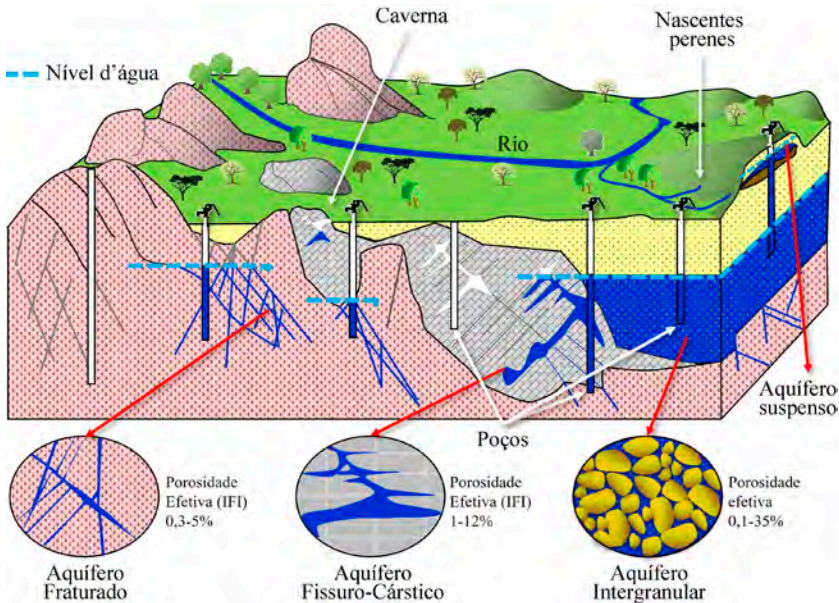


Figura 7.3. Modelo esquemático mostrando os principais tipos de aquíferos inter-relacionados (Fraturado, Cárstico e Intergranular) com diferenças entre níveis d'água e das fontes hídricas dos respectivos poços.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos fraturados englobam aqueles formados principalmente a partir das rochas metamórficas e ígneas (também chamadas genericamente de cristalinas). Nesse caso, a água apenas ocupa as pequenas fendas presentes nos maciços rochosos, o que resulta em menor espaço para armazenamento (Feitosa et al., 2008). Nesse ambiente, também há muitos poços secos ou de baixas vazões (ou com pouca água).

Em rochas carbonáticas, são desenvolvidos os denominados aquíferos cársticos. Essas rochas têm a propriedade de se dissolver e formar grandes espaços internamente, resultando em cavidades, cavernas, abrigos ou grutas associadas a sumidouros e surgências. Nesse caso, é comum a presença de águas "duras" ou salobras devido ao elevado teor de bicarbonato (HCO_3^-) e cálcio (Ca^{2+}), que compõem os minerais das rochas. Águas "duras" são ricas em elementos/íons que causam problemas para a ação dos sabões, para cozimento e para sua utilização na indústria. Já as águas salobras são ricas em sais dissolvidos das rochas. A região nordeste do estado de Goiás pode ser citada como um exemplo desse tipo de aquífero na região do Cerrado (por exemplo, município de Mambai, GO).

Outra proposta de classificação dos aquíferos divide-os genericamente em rasos e profundos. Os aquíferos rasos são tratados como livres ou freáticos e têm o topo da zona saturada sob condições de pressões atmosféricas. Alguns aquíferos freáticos, apesar de serem na maioria rasos, podem ter seu topo naturalmente a maiores profundidades (até maiores que cem metros). Um exemplo desta condição na região do Cerrado ocorre no extremo oeste do estado da Bahia, próximo à divisa com o estado de Goiás.

Os aquíferos rasos ou freáticos (Figura 7.4) têm grande importância para a sociedade, representando os primeiros reservatórios subterrâneos explorados para uso geral desde o início da humanidade. Também por serem livres e rasos, são vulneráveis aos processos de contaminação. Contudo, na ótica de recargas/descargas dos aquíferos, eles recebem anualmente a renovação cíclica de seus recursos hídricos com a infiltração parcial das águas de chuvas, e mantêm a perenidade das nascentes e cursos d'água superficiais ao longo do ano.

Os aquíferos profundos, em muitos casos, não têm contato direto com a atmosfera e são relativamente isolados, devido a camadas de rochas menos permeáveis acima deles ou pelos próprios aquíferos mais rasos que os sobrepõem (Figura 7.4). A grande diferença entre os aquíferos rasos e profundos está nas condições de armazenamen-

to, circulação e na capacidade de renovação das águas. Os aquíferos profundos demandam centenas de anos ou mais para a renovação de seus recursos hídricos, isso quando são conectados aos aquíferos sobrepostos, e muitos deles não têm seus recursos hídricos renováveis. Quando sistemas de aquíferos rasos e profundos coexistem e são hidráulicamente conectados, eles estão em equilíbrio mútuo e são interdependentes, de maneira que interferências em um podem refletir nas consequências que afetam a estabilidade do outro.

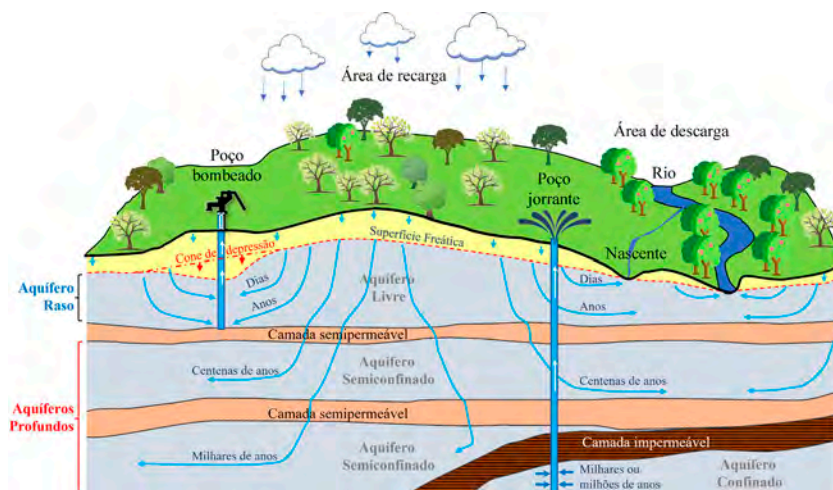


Figura 7.4. Modelo hidrogeológico esquemático ilustrando aquíferos intergranulares rasos e profundos com as respectivas diferenças temporais dos fluxos naturais de recarga.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Outra classificação dos aquíferos é relativa às condições de pressão na qual a água subterrânea está submetida, sendo classificados em livres, semiconfinados ou confinados. Os aquíferos livres têm contato direto com a atmosfera e estão abertos à infiltração das águas de chuvas. Quando o topo da zona saturada (superfície freática) do aquífero está submetido à pressão atmosférica, ele é chamado de livre

ou freático, independentemente dos tipos de rochas ou solos que o compõem.

Os aquíferos confinados são aqueles que estão entre camadas impermeáveis ou estruturalmente aprisionados, sem troca de fluxo hídrico com seu entorno. Os aquíferos confinados geralmente estão em condições de sobrepressões (pressões superiores à da atmosfera), reflexos da presença de massas rochosas que favorecem o aprisionamento hídrico subterrâneo. Essa sobrepressão também reflete as condições hidrodinâmicas impostas pela presença de camadas impermeáveis no entorno, condicionando um confinamento total das águas subterrâneas nele armazenadas. Os aquíferos confinados, quando perfurados, favorecem a subida do nível de água acima do seu topo ou, em alguns casos, podem jorrar águas até acima da superfície do terreno, formando os conhecidos poços artesianos ou poços jorantes.

Os aquíferos semiconfinados são aqueles que estão parcialmente confinados, uma situação intermediária entre livres e confinados, ou seja, estão parcialmente aprisionados por camadas semipermeáveis ou em condições estruturais que permitem parcialmente o fluxo hídrico subterrâneo.

Aquíferos suspensos são livres mas recebem essa nomenclatura adicional pela sua posição, que sempre ocorre acima de outro aquífero regional mais amplo (Figura 7.3). No geral, são aquíferos limitados a pequenas áreas e não armazenam grandes reservas hídricas. Esses são comuns em rochas sedimentares ou em sedimentos inconsolidados, onde existem diferentes camadas com propriedades hidráulicas distintas. Sua formação é reflexo da presença de camadas menos permeáveis que causam o retardo ou interrupções das percolações descendentes das águas subterrâneas, formando acima dessas camadas zona saturada dentro da zona não saturada do aquífero regional. Esse tipo aquífero é comumente observado em regolitos/solos espessos, onde podem ser condicionados por níveis impermeáveis. Também é frequentemente encontrado no Cerrado, apesar de suas limitações

quantitativas, tem grande importância na manutenção de nascentes, veredas, brejos e favorece fluxos de base das drenagens.

Porosidade efetiva, índice de fraturamento interconectado e índice de carstificação representam, respectivamente, o percentual de espaços disponíveis para o fluxo de água dentro do volume total dos aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos. É importante salientar que a porosidade efetiva reflete o volume total de espaços interconectados disponíveis para armazenamento hídrico nos aquíferos, e não o volume total de água possível de extração. Uma parte da água é sempre impedida de ser extraída devido às propriedades físicas de retenção, condições de armazenamento ou limitações do sistema de bombeamento do poço.

Os aquíferos têm três funções principais no ciclo hidrológico regional: (a) função de filtro; (b) função reguladora; e (c) função de reservatório.

A função de filtro corresponde à capacidade de depuração de eventuais cargas contaminantes e de impurezas presentes na atmosfera e em superfície. Nesse contexto as partículas finas, metais, organismos patogênicos e demais substâncias tóxicas podem ser retidas e/ou transformadas pelo arcabouço do aquífero, principalmente pela matéria orgânica e argilas presentes na zona não saturada do aquífero.

A função reguladora corresponde à função ecológica do aquífero e se refere à manutenção dos cursos de água superficiais e ecossistemas relacionados durante o período sem chuvas. Esta função é exercida pela variação anual do nível de água na zona de transição do aquífero (Figura 7.2). A água que alimenta as nascentes e rios vem da descarga do aquífero, cujo nível freático se eleva anualmente com a recarga de águas no período das chuvas. Após o término das chuvas, o nível freático segue rebaixando continuamente (descarregando) para manter regular os fluxos superficiais nos períodos secos.

O período de recessão das chuvas funciona como momento de estresse hídrico do ano, com baixa umidade do solo, diminuição das va-

zões dos córregos e nascentes e rebaixamento natural dos níveis de água nos aquíferos.

A função de reservatório é desempenhada na zona saturada do aquífero e corresponde ao armazenamento da água retida nos espaços dentro das rochas/solos por períodos prolongados. Desta forma, o aquífero pode ser considerado um local de reserva de água para uso humano e os demais elementos da natureza. Uma grande vantagem deste tipo de reservatório (aquífero) é sua capacidade de proteger a água contra processos de contaminação, evaporação, e do rápido escoamento das águas para os oceanos.

É importante salientar que o bombeamento e retirada de água dos aquíferos resulta em um rebaixamento dos níveis de água e mudanças em seu equilíbrio, podendo haver ampliação da recarga em alguns casos específicos, diminuição das vazões em cursos d'água superficiais, misturas de águas com profundidades diferentes e inversão de fluxos subterrâneos.

As águas subterrâneas também têm papel na estabilização geotécnica dos solos e rochas, tanto na zona saturada quanto na vadosa. Isso ocorre porque a água preenche os espaços nas rochas e solos e é adsorvida por minerais, aumentando o seu volume e exercendo uma pressão hidrostática multidirecional, que aumenta estabilidade ao sistema. Em outro sentido, a retirada de água subterrânea pode causar instabilidade, favorecer colapsos e/ou afundamentos da superfície do solo e gerar danos em infraestruturas como prédios, casas, estradas e plantações. Em casos específicos, essa instabilidade pode levar a acomodações no subsolo e perda irreversível na capacidade de armazenamento do aquífero.

Outro conceito importante no âmbito de ocorrências e das relações de interdependências entre aquíferos são os sistemas aquíferos. Um sistema aquífero pode ser definido como uma unidade geológica ou conjunto de camadas de rochas, constituídas por diferentes subtipos de aquíferos com comportamento e propriedades hidráulicas distintas, que são conectados lateralmente e/ou verticalmente. Na prática,

um sistema aquífero requer a existência de subtipos de aquíferos inter-relacionados hidraulicamente.

Para melhor entendimento sobre os sistemas aquíferos citam-se os seguintes casos:

- Sistema Aquífero Guarani, conhecido internacionalmente, é composto pelas unidades geológicas Botucatu e Piramboia que contêm subtipos aquíferos que variam verticalmente e lateralmente entre livre, semiconfinado e totalmente confinado. Esses subtipos, inclusive apresentam parâmetros hidráulicos distintos e são integrados em um sistema aquífero.
- Sistema Aquífero Urucuia representado por um grupo de rochas denominado Grupo Urucuia, sendo constituído por subtipos que variam verticalmente, incluindo livre, confinado ou semiconfinado e suspenso.

7.3 Aspectos legais sobre o uso das águas subterrâneas

Na legislação brasileira, as águas subterrâneas estão sob o domínio dos estados, e do Distrito Federal. Cada estado tem a responsabilidade de regulamentar, gerenciar e autorizar (outorgar) o uso das águas subterrâneas, exceto para produção de água mineral e águas termais (>25°C), que é de responsabilidade da União, executada pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

Na natureza, boa parte das águas subterrâneas e superficiais são interconectadas e interdependentes, entretanto, na legislação brasileira de recursos hídricos essas foram tratadas em separado. A gestão das águas subterrâneas cabe aos estados, enquanto das águas superficiais é compartilhada entre União e estados. Para evitar ou resolver problemas/conflitos na gestão das águas, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) emitiu a resolução nº 202, de 28 de junho de 2018, que estabelece novas diretrizes para ações de gestão integradas

e articuladas entre os órgãos reguladores (federal, estadual e distrital). Com isso, a gestão dos recursos hídricos deve ser integrada, aplicáveis aos aquíferos livres e rios perenes onde exista conectividade direta entre águas superficiais e subterrâneas.

Os estados têm autonomia para regulamentar e definir os critérios de uso das águas subterrâneas. Cada estado pode utilizar distintos critérios para autorização de seus usos, podendo coexistir diferentes regras de uso para o mesmo aquífero/reservatório. Isso ocorre porque os aquíferos são formações geológicas naturais que não seguem os limites estaduais, e podem ultrapassar dois ou mais estados, ou países. Isso também é reflexo de uma legislação implantada com observância incompleta dos aspectos naturais das águas subterrâneas, gerando diferenças na definição de critérios sem considerar aspectos técnicos para o uso sustentável dos recursos subterrâneos.

No Cerrado, considerado o “berço das águas”, os critérios de outorga para o uso de suas águas subterrâneas não estão diretamente relacionados com as condições hidrogeológicas, comportamento climático, o uso e a ocupação do solo e sua relação com o Cerrado. Os critérios de outorga nos estados onde ocorre o Cerrado podem ser agrupados em objetivos e subjetivos. Os critérios objetivos são claramente definidos e delimitam de forma objetiva as condições para outorga. Já os critérios subjetivos são amplos e não delimitam condições precisas para outorga, e podem ser dependentes da subjetividade do avaliador ou do órgão gestor.

Neste contexto, as 11 unidades da federação que compõem o Cerrado dispõem de 15 critérios, sendo oito objetivos e sete subjetivos (Figura 7.5). Até o momento, o Distrito Federal é a única unidade federada que apresenta mais critérios objetivos, buscando uma relação com as condições de disponibilidade hídrica e sustentabilidade dos recursos. Nos demais, os critérios refletem exigências administrativas sem correlação direta com as condições hidrogeológicas locais. Isso pode condicionar uma gestão ineficiente desses recursos e, assim, favorecer o colapso do uso dos recursos hídricos subterrâneos a médio e a longo prazos, bem como o surgimento de conflitos entre os usuários.

Critérios de Outorgas para Águas Subterrâneas no Cerrado

UF	Critérios Objetivos								Critérios Subjetivos						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PI	48,0	50%	35 anos												
MA	60,0	100%	35 anos												
BA	43,2	D ¹	35 anos		D ¹									D ¹	
TO	21,6	100%	35 anos						S						S
DF	5,0	75%	10 anos	20 h		D	D	D	S	D	S				
GO	86,4	100%	12 anos									S	S		S
MS	10,0	100%	10 anos	20 h	200						S				
MT	10,0	80%	35 anos						S						
RO	86,4	100%	5 anos						S	S	S				
MG	10,0	100%	35 anos		200				S			S			S
SP	15,0	100%	10 anos						S	S	S				
PR	43,2	100%	20 anos	20 h					S			S	S		

D - Critérios com definição clara.

S - Critérios sem definição ou muito abrangentes.

¹ – ver Instrução Normativa INEMA nº03/2022

Exigências técnicas em todas UF

- Análises físico-químicas e bacteriológicas
- Teste de bombeamento/vazão
- Dados construtivos e litológicos do poço
- Plano de uso da água

Critérios Objetivos

1. Usos insignificantes (m³/dia)
2. Vazão nominal do poço (%)
3. Prazo máximo de outorgas (anos)
4. Tempo máximo de bombeamento (h)
5. Distância mínima entre poços (m)
6. Reserva explotável por aquífero (m³/ano)
7. Capacidade de recarga do aquífero
8. Vazão de segurança do aquífero

Critérios Subjetivos

9. Estudos hidrogeológicos
10. Análises por finalidade de uso
11. Análises das fontes de contaminação
12. Análises de interferências entre poços
13. Vazão média do aquífero
14. Vazão sustentável do poço
15. Fatores econômicos e sociais

Figura 7.5. Lista de critérios considerados para solicitação e autorização de outorga de direito de usos das águas subterrâneas nas unidades da federação inseridas parcialmente no bioma Cerrado, atualizada em 2022.

Outro aspecto importante no cenário nacional das águas subterrâneas, que também reflete similaridade no Cerrado, é o grande número de poços tubulares irregulares (sem regularização). De acordo com o Instituto Trata Brasil, dados de 2018, 88% dos poços existentes no Brasil são irregulares (Hirata et al., 2019), os quais não seguem recomendações técnicas construtivas e não têm controle sobre uso. O

mesmo estudo indica que em Goiás, estado com grande parte do território coberto pelo Cerrado dispõe em aproximadamente cem mil poços tubulares perfurados, dos quais 97% são irregulares e estima-se que cerca de 65 mil estão em áreas rurais.

Na base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS) consultada em julho de 2021 (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2022), foram obtidos dados de 56,5 mil poços dentro do bioma Cerrado (Figura 7.6). Esses poços indicam vazões somadas totais de 300 mil metros cúbicos por hora (7,2 bilhões de litros/dia), o que representa volume inferior a real extração de águas subterrâneas. É importante salientar que nessa base de dados não são considerados os poços escavados (cisternas) e nascentes, pois, no geral, essas extrações são legalmente consideradas como usos insignificantes, não demandam outorga e em alguns estados apenas requerem seu cadastramento.

Entretanto, é consenso que os usos insignificantes, inclusive pela facilidade de acesso, representam números muito maiores do que os poços tubulares. Embora a quantidade dos usos insignificantes seja desconhecida pelos órgãos gestores, eles têm grande importância para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. De acordo com o Instituto Trata Brasil (Hirata et al., 2019), considerando dados atualizados até 2018, os quatro principais estados que mais dependem das águas subterrâneas para o uso rural são Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Goiás, nas unidades da Federação onde o Cerrado está inserido.

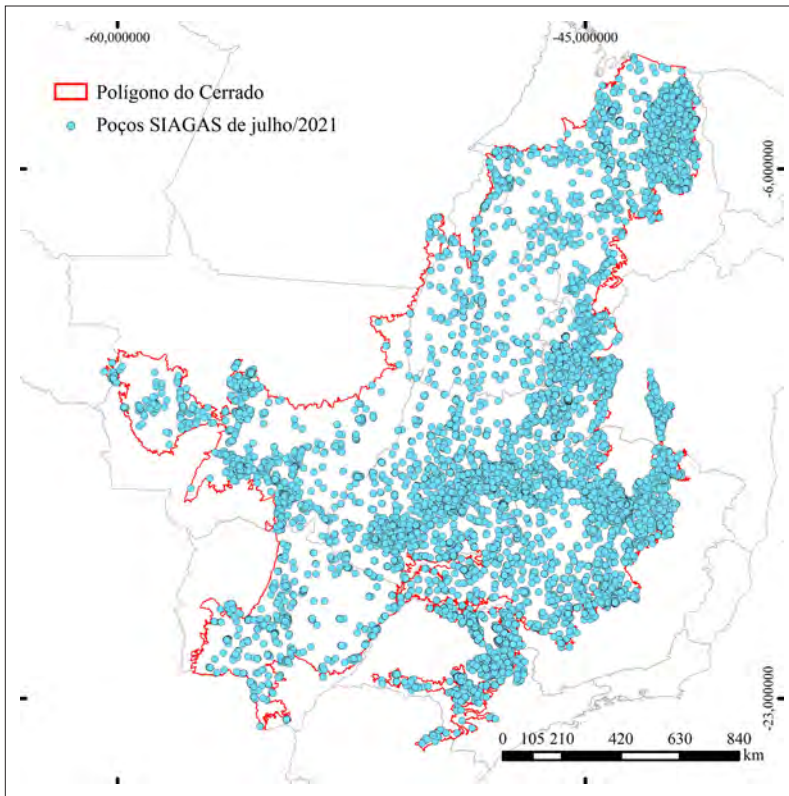


Figura 7.6. Mapa com a distribuição dos 56,5 mil poços na área do bioma Cerrado.
 Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2022).

7.4 Potencial dos aquíferos rasos e profundos no Cerrado

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos, em uma razão aproximada, respectivamente de 60%; 38% e 2% da área total (Figura 7.7). A porção enquadrada como aquífero intergranular pode ser dividida em aquíferos rasos e profundos, sendo essa classificação relacionada à profundidade das camadas que compõem os reservatórios. Solos e sedimentos inconsolidados pouco espessos e subsuperficiais são os aquíferos rasos e arenitos de

formações geológicas espessas (em geral mais profundas que 50 m) representam os aquíferos profundos. Os aquíferos fraturados têm potencial hídrico restrito, sendo apenas utilizados para complementação do abastecimento humano ou para suprir água a pequenas comunidades isoladas, não sendo viável para uso em irrigação ou uso intenso.

O potencial produtivo dos aquíferos é definido pela sua transmissividade, que pode ser compreendida como o produto da permeabilidade do material por sua espessura saturada, ou seja, a quantidade de água que flui horizontalmente no aquífero.

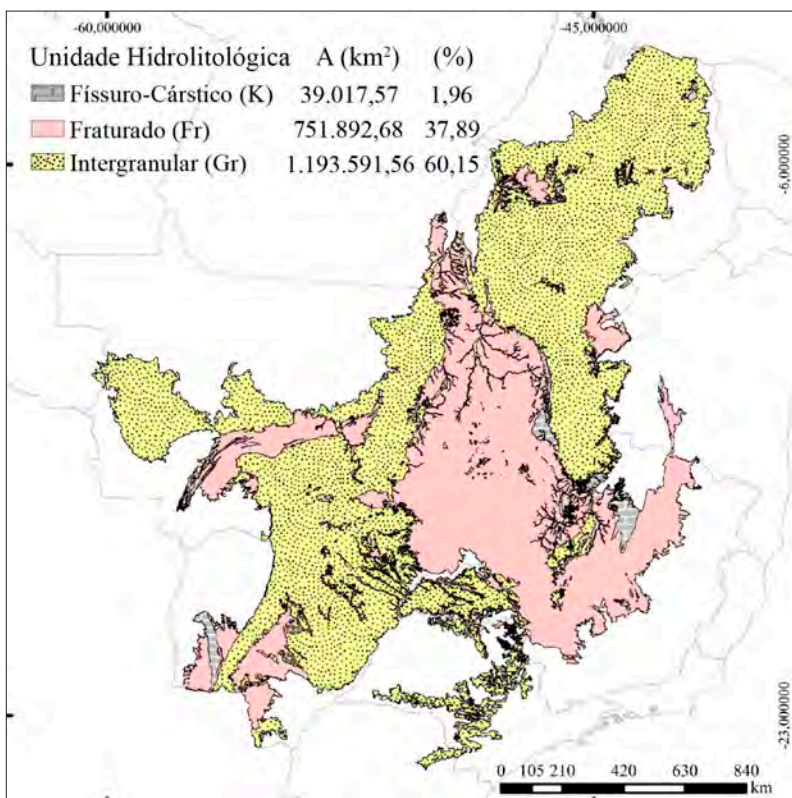


Figura 7.7. Mapa de ocorrência e proporcionalidade de área (A) dos tipos de aquíferos no Cerrado.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

7.4.1 Potencial dos aquíferos rasos

O potencial e as recargas dos aquíferos rasos estão intrinsecamente relacionados aos tipos de coberturas inconsolidadas ou solos. As coberturas inconsolidadas são representadas nos mapas de solos (Figura 7.8), recobrendo toda a área do Cerrado e estão representadas principalmente por solos classificados como: latossolo (43%), neossolo quartzarênico (20%), plintossolo (10%), argissolo (10%), cambissolo (8,5%) e outros (8,5%).

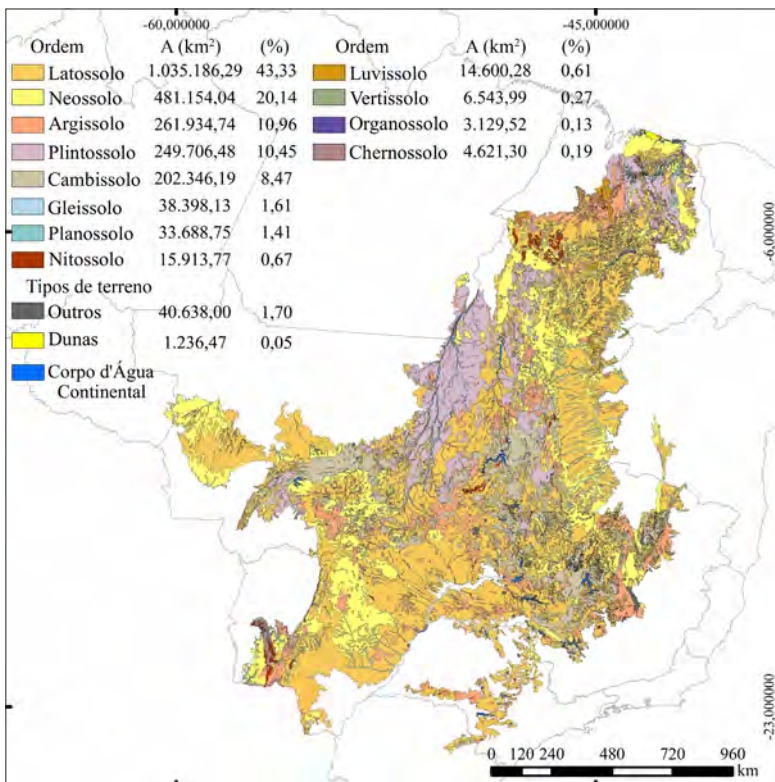


Figura 7.8. Mapa de ocorrências dos tipos de solos do Cerrado, e sua proporcionalidade em área. Os latossolos e neossolos quartzarênicos representam áreas mais favoráveis para a recarga dos aquíferos.

Fonte: IBGE (2021).

Os plintossolos e cambissolos não correspondem a áreas favoráveis para a recarga dos aquíferos devido à sua baixa permeabilidade, geralmente formam camadas superficiais pouco espessas que favorecem o escoamento superficial.

Genericamente, as regiões com maior favorabilidade para recarga são as áreas que ocorrem latossolos e neossolos quartzarênicos, que juntos representam mais de 60% da área total do Cerrado. A grande dimensão das ocorrências de solos permeáveis, associadas aos aspectos de relevo, vegetação e clima, reforçam a importância da região do Cerrado quanto à sua favorabilidade para a recarga dos aquíferos.

Os solos enquadrados como argissolos também são bastante importantes na condição de regulação da recarga, pois, embora sejam de textura argilosa ou muito argilosa, são muito estruturados, o que lhes confere elevada permeabilidade, principalmente nos horizontes mais rasos do perfil de solo.

Os aquíferos rasos, embora não tenham elevado potencial para abastecimento, mantendo restritas vazões expressivas nos poços de captação, são fundamentais para a recarga dos aquíferos profundos e para a regularização das vazões dos cursos de água superficiais, incluindo nascentes, córregos, lagos e rios.

Além dos solos, as coberturas inconsolidadas cenozoicas também são enquadradas nos aquíferos rasos, pois não apresentam espessuras saturadas significativas. Neste conjunto podem ser enumerados os colúvios depositados no sopé da Serra Geral de Goiás e os depósitos das planícies dos rios Tocantins e Araguaia (ver Sistema Aquífero Araguaia-Bananal a frente).

7.4.2 Potencial dos aquíferos profundos

Os aquíferos profundos estão relacionados às camadas de rochas profundas, e seu potencial é vinculado ao conjunto de rochas a que

estão associados. Estes reservatórios apresentam potencial variável, e, em alguns casos, é possível bombear dezenas de metros cúbicos de água por hora, enquanto em outros a vazão é limitada.

Com relação ao potencial para irrigação de grandes áreas, apenas alguns sistemas apresentam condições hidrogeológicas adequadas a este tipo específico de uso, que demanda volumes expressivos de água diariamente.

Os aquíferos de grande potencial quantitativo ocorrem em grandes áreas ou em regiões restritas (relativas ao Cerrado como um todo) e associados às bacias sedimentares cuja poligonal ocorre parcialmente dentro do Cerrado (aquíferos intergranulares) (Figura 7.9). Na mesma figura também se observa os aquíferos fraturados, que no geral, não têm potencial hídrico suficiente para uso em irrigação, sendo destinados ao abastecimento de áreas rurais, núcleos urbanos isolados ou para a complementação do abastecimento em grandes cidades.

Importante destacar também que há áreas em que os tipos de aquíferos se sobrepõem, o que favorece a existência de aquíferos intergranulares sobrepondo aquíferos fissuro-cársticos ou fraturados ou outros subtipos intergranulares. Essa sobreposição natural por vezes favorece o confinamento dos aquíferos mais profundos, dificultando ou impedindo sua recarga anual. As ocorrências de aquíferos sobrepostos e a complexidade hídrica gerada devem ser consideradas no planejamento do uso e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

O potencial quantitativo de um aquífero deve considerar os volumes de água acumulados e sua condição de circulação e recarga. A avaliação do potencial de um aquífero, com base apenas na sua porosidade, permeabilidade, transmissividade e espessura pode ser frágil, pois pode se tratar de um reservatório com restrita recarga e assim, sem renovação hídrica, e poderá entrar em colapso após algum tempo de bombeamento.



Figura 7.9. Mapa de ocorrência dos principais sistemas aquíferos intergranulares no Cerrado (áreas destacadas em cores). Áreas em branco dentro do polígono do Cerrado marcam os aquíferos classificados como fraturados.

7.5 Principais aquíferos que ocorrem no Cerrado brasileiro

No âmbito do Cerrado, os aquíferos intergranulares mais relevantes ocorrem em regiões de cinco bacias sedimentares de grande extensão geográfica, representadas pelas bacias do: Parnaíba, Parecis, Paraná, Bananal e Sanfranciscana. As bacias do Parecis, Paraná e Parnaíba formam aquíferos que extrapolam os limites do bioma Cerrado.

As bacias hidrogeológicas foram definidas conceitualmente por Arraes e Campos (2007) e Arraes (2008) como a região que corresponde aos limites entre as zonas de recarga e descarga de um determinado aquífero. Entretanto, bacias hidrogeológicas sedimentares também coincidem com os limites das bacias sedimentares, que por sua vez, correspondem aos limites de antigas depressões topográficas que ao longo do tempo geológico foram preenchidas por vários tipos de sedimentos. Esses diferentes tipos sedimentares se sobrepõem e formam grandes pacotes sedimentares sobrepostos somando espessuras que podem atingir centenas de metros. Com a evolução geológica, as camadas sedimentares das bacias se transformam em rochas que armazenam águas subterrâneas e assim formam diferentes aquíferos intergranulares inter-relacionados em sistemas de aquíferos complexos e sobrepostos.

Normalmente, as bacias sedimentares dispõem de vários aquíferos em camadas sub-horizontais, onde parte aflora na superfície e os demais ficam a grandes profundidades. As partes aflorantes (superficiais e rasas) dos aquíferos, em geral, são livres e recebem influência da sazonalidade climática, e funcionam de forma dinâmica com recarga e descarga anuais. Entretanto, cabe frisar que o tempo de resposta nos aquíferos com recarga e descarga por influência das chuvas é muito lento (fluxo hídrico subterrâneo é da ordem de cm/dia).

As águas de chuvas ocorridas hoje podem necessitar de meses para atingir o aquífero, e anos ou centenas de anos para chegarem às zonas de descarga (nascentes e drenagens). Assim, os aquíferos aflorantes podem ter relação direta com as águas superficiais, favorecendo o funcionamento das nascentes, mantendo lagos, riachos e rios perenes mesmo nos períodos de estiagem ou de secas prolongadas. As águas que estão nascendo e mantendo os rios hoje, são reflexos de chuvas ocorridas nas zonas de recarga dos aquíferos contribuintes em anos anteriores. Portanto, os aquíferos funcionam como agentes reguladores do sistema hídrico superficial, recebendo e armazenando água para disponibilizar no futuro.

Os aquíferos profundos em bacias, em geral, são isolados e recebem renovação hídrica anual restrita ou nula, mantendo seus volumes hídricos preservados estagnados por centenas ou milhares de anos. Essas águas são consideradas “fósseis” devido à sua presença estagnada por milhares de anos, que podem dissolver minerais e se enriquecer de sais das rochas, tornando-as salinizadas e, às vezes, não potáveis ou não úteis para outros fins (ex. irrigação) (Appelo; Postma, 1996).

Observe-se que os aquíferos profundos também funcionam como uma base de sustentação física e hidrodinâmica dos sistemas aquíferos superiores (mais rasos), de forma que o seu uso pode interferir diretamente no equilíbrio dos aquíferos superiores (induzir trocas hídricas, reduzir volumes, induzir acomodações de blocos rochosos e do terreno, etc.).

A seguir, estão descritas as principais bacias e seus aquíferos intergranulares presentes no Cerrado, assim como as estimativas de reservas hídricas subterrâneas dos seus principais aquíferos.

As reservas hídricas subterrâneas são estimadas a partir da definição das porosidades efetivas das rochas que o compõem os aquíferos, das espessuras saturadas dos aquíferos, e das dimensões da área de ocorrência. Com esses parâmetros, é possível calcular as reservas hídricas (volume hídrico armazenado) por meio da seguinte expressão simplificada (Costa, 2000):

$$R_p = A \times \eta_e \times b$$

em que

R_p = reservas hídricas do aquífero

A = área total do aquífero

b = espessura média saturada do aquífero

η_e = porosidade efetiva média do aquífero

Para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas foram utilizadas informações de diversos estudos e dados de poços dos sistemas

SIAGAS/SBG-CPRM, assim como mapas de ocorrências geológicas (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022). O software ArcMap (Esri) foi utilizado para aplicar funcionalidades de análises espaciais. É importante destacar que os valores calculados são aproximados e visam indicar a dimensão e a grandeza das reservas hídricas subterrâneas no Cerrado, considerando a falta de informações consolidadas sobre o assunto na literatura.

5.5.1 Sistemas aquíferos da província Parnaíba

Estes sistemas de aquíferos coincidem com a área da província sedimentar do Parnaíba, região composta por um sistema de quatro bacias sedimentares sobrepostas. Região que abrange áreas de vários estados do Nordeste brasileiro (Figura 7.10). Entretanto, o Cerrado só ocorre em 57% da totalidade da Província Hidrogeológica do Parnaíba. Essa região é formada por várias formações geológicas das quais, algumas são aquíferos relevantes (rochas arenosas) e outras não são consideradas aquíferos (rochas argilosas) devido à sua baixa capacidade de armazenar ou transmitir águas subterrâneas.

Para efeitos de simplificação dos cálculos de reservas hídricas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba, as unidades aquíferas consideradas foram somente as aflorantes, com ocorrências dentro do Cerrado, assim como segue: unidades denominadas Codó, Itapecuru, Corda, Motuca, Pedra de Fogo, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande. As unidades Longá e Pimenteiras não foram consideradas para cálculos, pois são formações compostas de rochas não aquíferas (materiais argilosos). Também não foram consideradas as áreas ao nordeste (formação Barreiras) e no centro-oeste da bacia, áreas de ocorrências de aquíferos fraturados onde há poucos dados para estimativas das reservas.

Baseando-se em dados de poços tubulares disponibilizados pelo sistema SIAGAS (julho/2021) e nas áreas poligonais dos aquíferos aflorantes (Agência Nacional de Águas, 2017), as reservas hídricas subter-

râneas de todas as unidades aquíferas intergranulares citadas foram estimadas. Para isso, foram considerados somente dados de poços com profundidade de até 250 m, total de 5.956 poços, e se assumiu uma porosidade efetiva média das unidades de 15%.

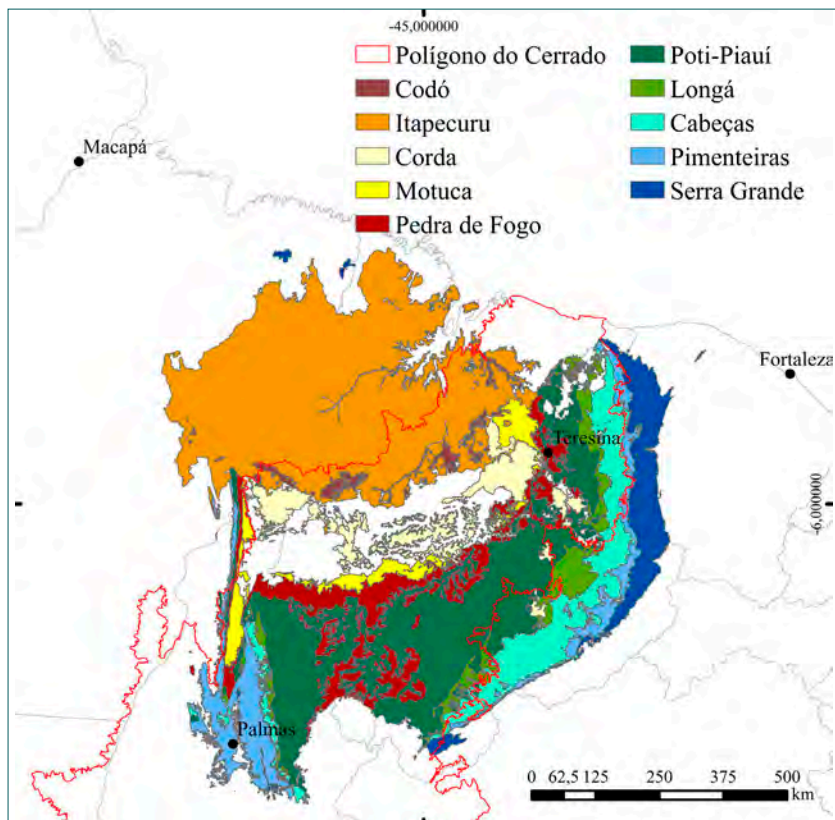


Figura 7.10. Mapa dos aquíferos aflorantes da Província Hidrogeológica do Parnaíba, vinculada à bacia sedimentar do Parnaíba.

As reservas em volumes totais estimados dos sistemas aquíferos do Parnaíba foram de 6.668,22 km³, e desse total, o volume de 3.822,66 km³ (57%) ocorrem no Cerrado. Esse valor corresponde ao somatório das unidades aquíferas do sistema Parnaíba apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Parnaíba, considerando profundidade máxima de até 250 m.

Unidade aquífera	Nº poços	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Cabeças	906	88,56	49.666,78	20.684,09	659,77	274,77
Codó	41	101,89	8.311,48	7.831,71	127,03	119,70
Corda	201	78,69	35.117,91	34.342,23	414,51	405,36
Itapecuru	1.426	79,66	207.300,75	50.730,15	2.477,04	606,17
Motuca	48	81,29	19.810,95	18.229,45	241,56	222,28
Pedra de Fogo	1.534	88,53	50.547,04	49.018,98	671,24	650,95
Poti-Piauí	1.578	87,08	129.956,12	116.633,54	1.697,49	1.523,47
Serra Grande	222	78,57	32.207,23	1.694,30	379,58	19,97
Total					6.668,22	3.822,66

Importante ressaltar que as reservas aqui estimadas consideram os aquíferos aflorantes e zonas saturadas com profundidades máximas de até 250 m, profundidades típicas de poços usados com fins de produção hídrica. Nessa região existem poços com profundidade de até 1.241 m, que, no geral, são utilizados para fins exploratórios de pesquisas, e que não são comumente utilizados para fins de produção hídrica (estes foram descartados).

Entre os aquíferos mencionados, alguns podem alcançar profundidades superiores a 250 m, chegando a 900 m de profundidade com 650 m de zona saturada (por exemplo o aquífero Serra Grande). Se fossem consideradas as espessuras totais dos aquíferos e todo o volume de água comprimido nos aquíferos confinados, o valor de reserva hídrica subterrânea seria bem maior. No entanto, foi optado por seguir um princípio conservador e utilizar profundidades comuns entre os poços com dados disponíveis e representatividade geográfica. É importante destacar também que as reservas não calculadas (mais profundas) podem ser volumes explotáveis, mas não são necessariamente renováveis ou potáveis. A grande maioria das águas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba são antigas ou fósseis, refletindo as condições geológicas e climáticas da região, que condicionam uma baixa capacidade de renovação hídrica.

Na literatura, os aquíferos mais relevantes desta região são: Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí. São predominantemente compostos por arenitos, com boas espessuras e produção hídrica. No entanto, os aquíferos Serra Grande e Cabeças ocorrem principalmente em profundidades maiores, sendo, portanto, predominantemente confinados. Nestes casos, devido à sobrepressão de confinamento, os poços que os atravessam podem produzir águas jorrantes acima da superfície (poços artesianos). Estes fatos são bem conhecidos na região do Vale do Gurguéia (Piauí), onde já existem vários poços deste tipo abastecendo a região. Já o aquífero Poti-Piauí é considerado livre e compõe a maior reserva hídrica subterrânea aflorante do sistema Parnaíba dentro do Cerrado (Tabela 7.1). O aquífero Itapecuru é do tipo livre e

semiconfinado, tem grande extensão aflorante, mas apenas 25% de sua área está no bioma Cerrado. Suas potencialidades produtivas são consideradas moderadas, mas com boas condições de recarga.

7.5.2 Sistemas aquíferos da província Paraná

Na província Paraná, destacam-se na área do Cerrado os seguintes aquíferos e sistemas aquíferos: Furnas, Ponta Grossa, Guarani, Serra Geral e Bauru (Tabela 7.2 e Figura 7.11).

O Sistema Furnas está associado com rochas conglomeráticas na base e areníticas silicificadas no topo da unidade aquífera, sendo denominado de aquífero de dupla porosidade com espaços de armazenamento hídrico dos tipos intergranulares e fraturas interrelacionadas. Ocorre, de forma livre, nas porções noroeste do estado de Goiás e no sul de Mato Grosso, tendo continuidade para o interior da Bacia do Paraná, onde se apresenta sob confinamento. Na região de Rondonópolis, MT, apresenta vazões expressivas, sendo utilizado para o abastecimento humano e industrial (Cutrim et al., 2021).

O Aquífero Ponta Grossa ocorre na forma de intercalações de rochas arenosas com rochas argilosas, apresentando menores vazões e menor potencial produtivo, não sendo aproveitado para uso em sistemas de irrigação de maiores portes como pivôs centrais.

O Sistema Aquífero Guarani é um dos maiores reservatórios subterrâneos do mundo, ocupando área superior a um milhão de quilômetros quadrados (Araújo et al., 1999; Borghetti, 2004; Oliveira, 2009), saindo do território brasileiro e adentrando na Argentina, Uruguai e Paraguai. No Cerrado, ocorre em áreas de exposição restritas, contudo, pode ser explorado a partir de poços que atravessem toda a espessura das rochas vulcânicas que compõem a camada confinante, acima.

Tabela 7.2. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Paraná, considerando suas áreas de afloramentos com espessura saturada média de 100 m.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Bauru-Caiuá	15	100	353.369,96	211.290,57	5.300,55	3.169,36
Serra Geral	3	100	420.589,50	81.545,24	1.261,77	244,64
Guarani	15	100	89.220,79	52.517,45	1.338,31	787,76
Ponta Grossa	12	100	34.951,60	32.526,24	419,42	390,31
Furnas	10	100	28.738,22	26.358,19	287,38	263,58
Total					8.607,43	4.855,65

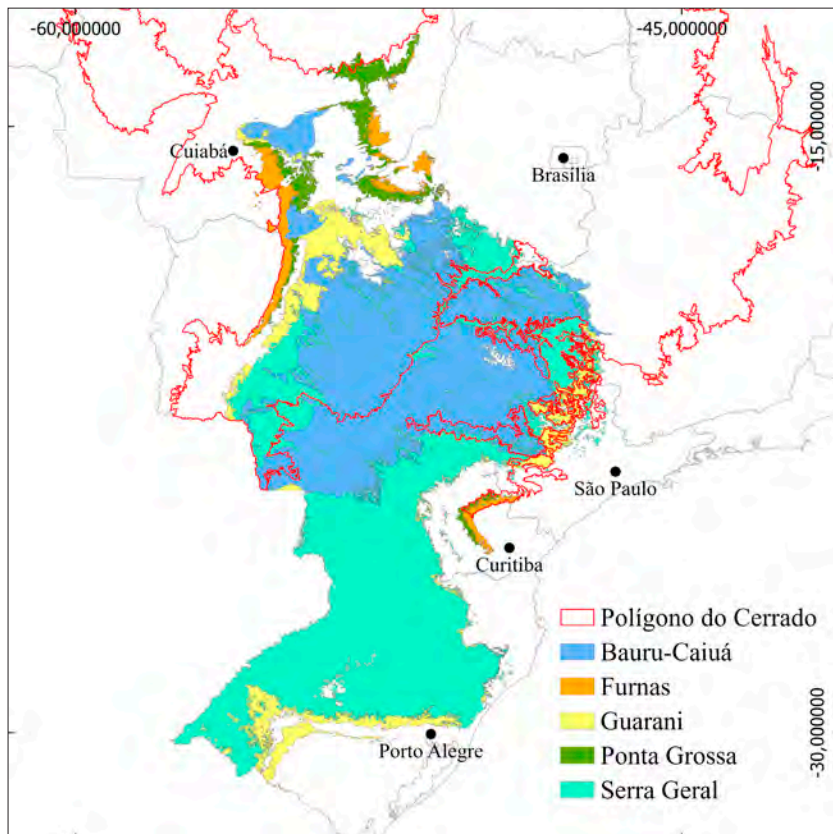


Figura 7.11. Mapa dos aquíferos associados à “Província Hidrogeológica do Paraná”, vinculada à bacia sedimentar do Paraná.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

São reservatórios do tipo intergranular, podendo ocorrer de forma livre, semiconfinado ou totalmente confinado. O Sistema Aquífero Guarani tem potencial muito elevado, sendo inclusive possível ser utilizado para irrigação de grandes áreas. Contudo, sua exploração deve ser precedida de estudos específicos, pois em áreas de confinamento (que são predominantes) as condições de recarga são pouco favoráveis.

O Sistema Serra Geral é um aquífero fraturado associado a rochas vulcânicas e, por isso, apresenta vazões mais reduzidas e inclusive poços secos. Entretanto, por ocorrer em amplas áreas de exposição, é um aquífero muito utilizado para o abastecimento de cidades e propriedades rurais na região do Cerrado.

É um aquífero fraturado uma vez que as rochas vulcânicas de composição basáltica não apresentam poros intergranulares, mas apenas uma densa rede de fraturas que permite o armazenamento e transmissão de águas em taxas expressivas, podendo alcançar dezenas de metros cúbicos por hora.

O Aquífero Bauru é do tipo intergranular, associado a arenito e apresenta ampla capacidade de armazenamento de água, sendo um reservatório livre na maior parte de sua ocorrência, com excelentes condições de infiltração e recarga (Prandi, 2010). Na região de Araguari, no Triângulo Mineiro, este aquífero é associado a cascalhos e areias e por isso apresenta vazões médias maiores do que na maior parte das demais áreas de ocorrência (Oliveira, 2002). Neste caso, suas águas são utilizadas para irrigação de lavouras de café.

7.5.3 Sistemas aquíferos da província Centro-Oeste

7.5.3.1 Sistema Aquífero Bananal

Este sistema aquífero coincide com a bacia sedimentar do Araguaia-Bananal, dentro da bacia hidrográfica do Rio Araguaia, região que divide os estados de Mato Grosso, Goiás e Tocantins (Figura 7.9). Essa região é caracterizada por grandes planícies, lagunas, zonas alagadas intermitentes e vários cursos de rios meandrantos (Rio Araguaia e afluentes). Entre as bacias sedimentares já citadas, essa é a bacia com menor espessura de sedimentos e mais recente na evolução geológica. Pois ainda está em processo de formação, recebendo continuamente sedimentos pelo Rio Araguaia e seus afluentes. Estudos de Araújo e Carneiro (1977 citado por Souza, 2017) estimaram que em alguns pon-

tos essa bacia pudesse atingir até 320 m de profundidade. Entretanto, um poço de pesquisa do Serviços Geológico do Brasil na região indicou profundidade de 50 m (Lacerda Filho et al., 1999). Entre os poços do SIAGAS foram observadas profundidades pouco maiores que 70 m na região de Jussara, GO.

Essa bacia é preenchida pela Formação Araguaia, que é composta de sedimentos aluviais (oriundos do rio) e lacustres (oriundos de lagoas) intercalados. Os sedimentos são representados predominantemente por areia, cascalho, silte e argila semiconsolidados e inconsolidados, com presença de concreções ferruginosas.

O banco de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SIAGAS) (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022) conta com poucos poços na região do aquífero (dados de julho de 2021). Contudo, na região norte do aquífero os dados existentes indicam baixas capacidades produtivas dos poços e grandes rebaixamentos dos níveis de água (nível dinâmico) durante o bombeamento. Isso é um indicativo de que boa parte desses poços ultrapassa os sedimentos e captam água dos sistemas de aquíferos fraturados abaixo, em rochas cristalinas menos produtivas. Na região Sul, no município de Jussara, GO, os poços indicaram boa capacidade produtiva e espessa camada de sedimentos. Neste contexto, para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas, visando simplificações, esse aquífero foi tratado como unidade indistinta, com espessura saturada média de 30 m e porosidade efetiva média de 12% (Tabela 7.3).

O Sistema Aquífero Bananal é um tipo de aquífero livre e relativamente vulnerável. Suas reservas hídricas funcionam de forma interconectada aos sistemas de águas superficiais que o compõem (Rio Araguaia e afluentes). Consequentemente, seu uso e gestão devem observar os impactos mútuos entre sistemas hídricos superficiais e subterrâneos. Na prática, o Sistema Aquífero Bananal é parte essencial de um ecossistema local, que envolve um equilíbrio mútuo de funcionamento e manutenção de diversas espécies locais e do próprio Rio Araguaia.

Tabela 7.3. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas do Sistema Aquífero Bananal.

Unidade aquífera	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Formação Araguaia	30,0	108.511,53	102.772,40	390,64	369,98

7.5.3.2 Sistema Aquífero Parecis

O Sistema Aquífero Parecis representa um reservatório subterrâneo do tipo intergranular composto por uma sucessão de arenitos, com intercalações de níveis pelíticos e conglomerados pertencentes ao Grupo Parecis. Em função da presença de níveis argilosos, podem ocorrer aquíferos classificados como livres ou confinados. Segundo Silva (2013), os limites definidos deste aquífero são coincidentes com a extensão das rochas do Grupo Parecis.

A área total de distribuição deste aquífero é de 227.290 km², sendo que 108.302 km² ocupam a área de ocorrência do bioma Cerrado. Considerando esta área de ocorrência, 15% de porosidade eficaz e uma espessura saturada média de 108 m a reserva permanente no Cerrado alcança 1.372,30 km³ de água.

7.5.4 Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado

Estes sistemas aquíferos integram a Bacia Sanfranciscana, que inclui as unidades sedimentares que compõem os reservatórios subterrâneos. Esta bacia tem uma área que ocupa partes de seis estados brasileiros incluindo o Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Goiás e Minas Gerais. A Bacia Sanfranciscana (Urucuia e Areado) após evolução geológica e intensos processos erosivos ocupa atualmente uma área total de 151.158 km² e uma área efetiva de aquíferos menor, de 125.016 km² (Agência Nacional de Águas, 2017) (Tabela 7.4).

O Sistema Aquífero Urucuia tem 99,5% de sua área inserida no bioma Cerrado, enquanto o Sistema Aquífero Areado tem toda a sua área vinculada ao Cerrado. Estes aquíferos foram estudados por Gaspar (2006), Gaspar e Campos (2007) e Agência Nacional de Águas (2017), entre outros autores, e apresentam elevado potencial de produção de água, sendo utilizados inclusive para a irrigação de grandes lavouras pelo sistema de pivôs centrais.

Tabela 7.4. Dados dimensionais utilizados para o cálculo da reserva permanente dos sistemas aquíferos Urucuia e Areado.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Urucuia	14	128.356,32	127.595,71	1.327,97	1.320,10
Areado	10	22.802,17	22.802,17	104	104

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

O Sistema Aquífero Urucuia é representado majoritariamente por arenitos depositados em antigos desertos de areia, sendo, portanto, muito porosos e funcionando como excelente reservatório de água. Sua área de distribuição apresenta aquíferos livres, semiconfinados ou suspensos.

O Aquífero Areado é heterogêneo e contém principalmente arenitos, em menor proporção, conglomerados/folhelhos. Em muitos casos, os arenitos são cimentados, o que restringe parte de sua porosidade, e, por conseguinte, não apresentam um potencial aquífero muito elevado.

7.6 Outros aquíferos

No contexto do Cerrado (Figura 7.7), ainda existem aquíferos fraturados e os físsuro-cársticos com 38% e 2% respectivamente da área do Cerrado. Estes, junto às coberturas inconsolidadas intergranulares,

representam os aquíferos menos expressivos em termos de volume das reservas de águas subterrâneas. Suas reservas também foram estimadas com base nos dados de poços do SIAGAS (Tabela 7.5).

Tabela 7.5. Dados e estimativas utilizadas para o cálculo das reservas dos aquíferos fraturados, físsuro-cársticos e das coberturas inconsolidadas intergranulares.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Média da espessura saturada (m)	Nº total de poços nas unidades	Nº total de poços usados na estimativa	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)
Coberturas	10	13,64	1.807	34	190.525,21	259,87
Fraturados	2	91,44	7.477	7.380	657.252,89	1.208,98
Físsuro-Cársticos	5	71,79	1.312	1.311	36.663,91	131,81

7.7 Sustentabilidade da exploração dos aquíferos no Cerrado

A sustentabilidade do bombeamento de águas subterrâneas deve levar em conta vários aspectos, incluindo o conhecimento do tipo de aquífero, as estimativas da disponibilidade hídrica, a taxa de bombeamento, a condição de circulação e recarga, o parâmetro climático, entre outros.

Como reservatório, o aquífero, pode ser comparado a uma barragem ou um açude, com um volume de água armazenada e outro com reposição anual por meio da infiltração de águas pluviais. Há uma reserva permanente (volumes não renováveis) e uma reserva renovável (volume de água que anualmente entra nos aquíferos).

Se uma barragem é bombeada com uma vazão superior à entrada mais o volume acumulado, ela pode secar em um período variável de tempo, levando ao colapso do sistema para o abastecimento ou para irrigação. O mesmo pode ser dito para o aquífero: se o bombeamento

for superior à recarga, haverá sua sobreexploração, ou seja, uma redução contínua dos níveis de água. Como um reservatório de superfície, o aquífero também pode se esgotar, como já ocorreu nos EUA (Alley et al., 1999; Galloway et al., 1999; Konikow, 2015), na China (Qiu, 2010) e na Índia (Bhattarai et al., 2021; Jain et al., 2021), onde a exploração excessiva dos aquíferos resultou em uma redução na produção agrícola e ameaçou a segurança alimentar.

No caso extremo de sobreexploração dos mananciais subterrâneos, além do esgotamento do aquífero, ocorrerão consequências nos recursos hídricos superficiais, incluindo a diminuição do fluxo e até o secamento de nascentes e córregos, principalmente em períodos prolongados de seca na região do Cerrado.

A determinação dos volumes que podem ser retirados dos aquíferos sem prejudicar os sistemas naturais não é uma tarefa simples e deve ser feita por especialistas (hidrogeólogos). Os volumes exploráveis geralmente estão associados às reservas renováveis, que por sua vez são maiores em aquíferos livres e vão diminuindo progressivamente com o aumento do confinamento dos aquíferos. Para avaliar esta questão, serão utilizados dois aquíferos localizados no noroeste de Minas Gerais, cobertos por vegetação típica do Cerrado, que são usados para irrigação de lavouras: o Aquífero Entre Ribeiros (Campos et al., 2022) e o Aquífero Batalha (Oliveira, 2018).

O Aquífero Batalha representa um reservatório do tipo intergranular, raso e livre, associado a areias, localizado em região elevada com médias de chuvas da ordem de 1,5 mil milímetro por ano. Portanto, a renovação anual é alta e, mesmo considerando as elevadas vazões, os níveis potenciométricos permitem uma exploração sustentável no curto e médio prazo.

O Aquífero Entre Ribeiros é classificado como fissuro-cárstico, confinado e profundo, composto por rochas calcárias com pequena dissolução e argilosas fraturadas, sotoposta a uma camada espessa de rochas argilosas. Mesmo em áreas planas com solos espessos e chuvas abundantes (cerca de 1,4 mil milímetro por ano), a disponibilidade hí-

drica deste aquífero é menor devido à limitada renovação hídrica anual (recarga), já que as águas da chuva precisam atravessar toda a camada confinante antes de chegar ao reservatório em profundidade.

Apesar do conhecimento sobre os aquíferos, cálculos de reservas hídricas subterrâneas, comportamento das chuvas e outros aspectos relacionados ao armazenamento e recarga dos aquíferos, a sustentabilidade de sua exploração, especialmente para usos que requerem grandes volumes (como a irrigação de lavouras), depende do monitoramento dos níveis potenciométricos (níveis da água no aquífero). Para isso, é necessário realizar medições periódicas dos níveis de água nos próprios poços de produção ou em poços exclusivos de monitoramento.

Lembrando que, para o monitoramento ser efetivo nos poços de produção, é necessário que os poços estejam em repouso (sem bombeamento) nas 48 horas que precedem as medições.

Para que os poços de produção possam ser utilizados como poços de medição, eles devem ser equipados com um tubo piezométrico, ou seja, um tubo de pequeno diâmetro acoplado à tubulação edutora. O tubo piezométrico funciona como uma guia para a introdução do equipamento de medição. Poços de monitoramento geralmente têm um diâmetro menor (de duas ou quatro polegadas) e são dedicados exclusivamente às medições e coleta de amostras. Poços domésticos, como cisternas, não devem ser usados para monitoramento, pois seus níveis de água variam continuamente devido à retirada da água.

Para se conhecer o aquífero e regularizar os poços (emissão de outorga de direito de uso), é fundamental que sejam realizados perfis litoestratigráficos (descrição dos materiais atravessados na perfuração), perfis construtivos (descrição da obra do poço) e testes de bombeamento/vazão. Portanto, na contratação da perfuração de um poço ou bateria de poços, é importante exigir da empresa perfuradora todos estes dados e documentos detalhados, incluindo a Anotação de Responsabilidade Técnica no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (ART/Crea).

Os perfis litoestratigráficos devem incluir uma descrição dos materiais interceptados a cada três metros de avanço da perfuração, incluindo tipos de rochas/solos, cor, tamanho dos fragmentos, velocidade de perfuração, presença de fraturas, presença de veios (quartzo ou carbonato), grau de alteração da rocha, entradas de água, trechos com desmoronamentos e outras características relevantes.

Os perfis construtivos devem apresentar informações importantes como os diâmetros de perfuração, a posição da coluna de revestimentos e filtros, a posição de colocação do pré-filtro, a profundidade de instalação da bomba, a capacidade e potência da bomba, o diâmetro do tubo edutor e demais equipamentos elétricos instalados.

Os testes de bombeamento são realizados por meio de diferentes métodos, como os contínuos (bombeamento em vazão constante) ou os escalonados (bombeamento com aumento progressivo de vazões). É importante medir a recuperação do nível de água ao final do teste, que geralmente tem duração de 24 horas para garantir que o nível volte à mesma elevação do início. É preciso destacar que o teste de vazão realizado com o compressor utilizado na perfuração não representa a vazão correta para uso do poço. O teste completo deve ser realizado com bomba submersível na fase final da conclusão da obra.

A avaliação da sustentabilidade da exploração dos aquíferos é importante não apenas do ponto de vista ambiental, mas também para garantir a sustentabilidade do investimento do usuário do poço (como agricultor ou irrigante). Em caso de escassez de água por sobreexploração de um aquífero local/regional, os usuários serão os primeiros prejudicados. Por isso, é fundamental realizar estudos específicos sobre as disponibilidades hídricas, condições de recarga e bombeamento antes da exploração dos aquíferos. O monitoramento é fundamental para garantir a confiabilidade dos estudos, já que os recursos hídricos subterrâneos apresentam incertezas sobre suas características e parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

7.8 Considerações finais

A região do bioma Cerrado inclui parte de grandes províncias hidrogeológicas brasileiras, além de aquíferos restritos a áreas específicas. Dentre as províncias destacam-se: Parnaíba, Paraná, Centro-Oeste (Bananal e Parecis) e São Francisco (Urucuia e Areado). Entre os aquíferos de áreas isoladas com potencial para uso em sistemas agrícolas (irrigação), destacam-se: Bambuí, Entre Ribeiros e Batalha.

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos classificados como intergranulares, fraturados e cársticos, que podem ser livres ou confinados, de dimensões regionais ou locais.

As águas subterrâneas no bioma Cerrado são de fundamental importância para a complementação do abastecimento humano, tanto em cidades quanto em áreas rurais, e são utilizadas para irrigação de grandes lavouras, na indústria e até mesmo aproveitadas como mananciais termais para uso balneário (Campos, 2004; Almeida et al., 2006; Almeida, 2011; Junqueira, 2020).

Os recursos hídricos subterrâneos são importantes para a regulação do ciclo hidrológico na região do Cerrado, especialmente durante os períodos prolongados de seca. Nesse sentido, os aquíferos ligados a solos espessos (principalmente latossolos) são extremamente relevantes para manter as descargas da rede de cursos superficiais.

Além da função ecológica de regulação e manutenção das águas superficiais, alguns aquíferos têm grande potencial para usos consuntivos de grandes demandas, como a irrigação. É importante destacar que o uso de aquíferos para esse fim só é viável em casos específicos em que os reservatórios subterrâneos tenham simultaneamente: grandes espessuras, elevadas porosidades e condições de renovação/recarga hídrica favoráveis.

A análise da viabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos e de sua sustentabilidade em longo tempo de bombeamento deve passar por estudos técnicos de caracterização dos aquíferos, estimativas

das reservas hídricas subterrâneas, entendimentos das condições de circulação e dos volumes de recarga. Além disso, a exploração das águas subterrâneas deve ser acompanhada por monitoramento contínuo dos níveis potenciométricos do aquífero submetido ao bombeamento. Este procedimento é particularmente importante para os casos em que os aquíferos são aplicados para irrigação, já que esse tipo de uso requer o maior volume de água.

Uma ação de gestão que pode ampliar a sustentabilidade dos recursos hídricos é o uso de captação mista, ou seja, uso de captações tanto de águas superficiais quanto subterrâneas (em locais em que ambos os mananciais estão disponíveis). Assim, as vazões exploradas devem ser maiores nos cursos de águas superficiais ou em barragens no período das chuvas (quando a disponibilidade é maior) e o bombeamento dos poços deve ser aumentado no período de seca. Também é possível avaliar o regime de chuvas no período hidrológico anterior e, em anos de chuvas abaixo da média histórica, reduzir os volumes bombeados para minimizar as pressões sobre os aquíferos e evitar sua sobreexploração.

A recarga gerenciada ou artificial dos aquíferos é uma técnica importante para mitigar os problemas e melhorar a sustentabilidade no uso das águas subterrâneas. A recarga gerenciada ocorre a partir de técnicas conhecidas há mais de 60 anos e utilizadas em muitos países, como EUA, Índia, China, Alemanha, Itália, Austrália, entre outros (Dillon et al., 2019). No Brasil, o seu uso ainda é incipiente e tem sido aplicado apenas em pesquisas acadêmicas e em ações isoladas (Cadamuro; Campos, 2005; Montenegro et al., 2005; Almeida, 2011; Azevedo, 2012; Nunes, 2016).

A recarga gerenciada consiste na injeção planejada de água em um aquífero, usando estruturas dimensionadas para esse fim. Para evitar contaminações, a água injetada deve ter qualidade igual ou superior à água do aquífero que recebe a recarga.

Entre os impactos da exploração inadequada dos aquíferos utilizados para irrigação, destacam-se: (i) o rebaixamento exagerado dos

níveis de água do aquífero, que em casos extremos pode secar poços, e o reservatório subterrâneo; (ii) o secamento de veredas, lagos, nascentes e cursos de água superficiais (principalmente aqueles com conexão hidráulica entre aquíferos e rios); (iii) recalques ou afundamentos da superfície do terreno, especialmente em locais com geologia composta por rochas calcárias; e (iv) contaminação das águas subterrâneas, decorrente da má qualidade construtiva dos poços e de inversões de fluxo pelo rebaixamento.

7.9 Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia**: proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo. Brasília, DF, 2017. 100 p.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E., FRANKE, O. L. **Sustainability of ground-water resources**. Denver, Colorado: U.S. Government Printing Office, 1999. 86 p. (U.S. Geological Survey Circular 1186).
- ALMEIDA, L. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas-GO**. 2011. 153 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ALMEIDA, L. de; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 231 p. (Série Geologia e Mineração, 1).
- APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 536 p.
- ARAÚJO, J. B.; CARNEIRO, R. G. **Planície do Araguaia, reconhecimento geológico-geofísico**. Belém: Petrobrás/Renor, 1977. 11 p. Relatório Técnico.
- ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. **Hidrogeology Journal**, v. 7, p. 317-336, 1999.
- ARRAES, T. M. **Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ARRAES, T. M.; CAMPOS, J. E. G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-89, 2007.

BHATTARAI, N.; POLLACK, A.; LOBELL, B. D.; FISHMAN, R.; SINGH, B.; DAR, A.; JAIN, M. The impact of groundwater depletion on agricultural production in India. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 8, 085003, 2021.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Edição dos Autores, 2004. 214 p.

CADAMURO, A. L. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2005.

CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 34, v. 1, p. 41-48, 2004.

CAMPOS, J. E. G.; TELES, L. S. B.; MACHADO, A. M. A.; RODRIGUES, D. S. Caracterização do Aquífero entre Ribeiros, Município de Paracatu, Noroeste do estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22., 2022, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: ABAS, 2022.

COSTA, W. D. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM/ REFO: LABHID-UFPE, 2000. p. 341-367.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo** (Escala 1: 1.000.000. Sistema de Informações Geográficas-SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB). Brasília, DF, 2010.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 4 jul. 2022.

CUTRIM, A. O.; SALOMÃO, F. X. T.; LUZ, J. A. G. Avaliação da vulnerabilidade à poluição da água subterrânea urbana, usando o método SI em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil. **Geociências**, v. 40, p. 195-205, 2021.

DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHEK, T.; LLURIA, M.; PYNE, R. D. G.; JAIN, R. C.; BEAR, J.; SCHWARZ, J.; WANG, W.; FERNANDEZ, E.; STEFAN, C.; PETTENATI, M.; VAN DER GUN, J.; SPRENGER, C.; MASSMANN, G.; SCALON, B. R.; XANKE, J.; JOKELA, P.; ZHENG, Y.; ROSSETTO, R.; SHAMRUKH, M.; PAVELIC, P.; MURRAY, E.; ROSS, A.; BONILLA VALVERDE, J. P.; PALMA NAVA, A.; ANSEMS, N.; HA, K.; MARTIN, R.; SAPIANO, M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 27, p. 1-30, 2019.

FEITOSA, A. C. F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. 812 p.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. O Vale do Gurgueia: uma zona estratégica de produção de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18., 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: ABAS, 2012.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. New York: MacMillan College, 2004. 619 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New York: Prentice Hall, 1979. 604 p.

GALLOWAY, D. L.; JONES, D. R.; INGEBRITSEN, S. E. (ed). **Land subsidence in the United States**. Denver: U.S. Geological Survey, 1999. 177 p. (Circular, 1182).

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, S. S.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil**: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. [São Paulo]: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

IBGE. **Mapa de Solos do Brasil, 1:250.000**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil, Períodos de 1961-1990 e de 1991**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 17 out. 2022.

JAIN, M.; FISHMAN, R.; MONDAL, P.; GALFORD, G. L.; BHATTARAI, N.; NAEEM, S.; LALL, U.; DEFRIES, R. S. Groundwater depletion will reduce cropping intensity in India. **Science Advances**, v. 7, n. 9, 2021. DOI:10.1126/sciadv.abd2849.

JUNQUEIRA, T. P. **Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO)**: estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos. 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

KONIKOW, L. F. Long-term groundwater depletion in the United States. **Ground Water**, v. 53, n. 1, p. 2-9, 2015. DOI:10.1111/gwat.12306.

LACERDA FILHO, J. V.; REZENDE, A.; SILVA, A. **Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal**: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM, 1999. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. A.; CAVALCANTI, G. L.; MOURA, A. E. S. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na planície do Recife (PE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 5., 2005, Teresina. **Anais...** Feira de Santana: ABCMAC, 2005. 10 p.

NUNES, M. D. X. **Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, G. N. R.; CAMPOS, J. E. G.; GOMES, A. W.; MOURA, F. G. Caracterização hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 36700, 2021.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. 20009. 188 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília, DF.

PRANDI, E. C. **Gestão integrada das águas das unidades estratigráficas do Aquífero Bauru nas Bacias dos Rios Aguapeí e Peixe**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

QIU, J. China faces up to groundwater crisis. **Nature**, v. 466, n. 308, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/466308a>.

SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. **Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores**. Brasília, DF: CPRM, 2003. 31 p.

SILVA, T. M. G. **Caracterização do Sistema Aquífero Parecis na região Centro-Norte do estado de Mato Grosso: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SOUSA, E. M. D. **Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do Bananal e reativações Transbrasilianas**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

USGS. **Ground water and surface water: a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey, 1998. 79 p. (Report 1139 Circular). DOI: 10.3133/cir1139.

CAPÍTULO 8

Solos do bioma Cerrado e sua Interação com as Áreas Irrigadas sob Pivô

Marcos Aurélio Carolino de Sá

Éder de Souza Martins

Giovana Maranhão Bettiol

Adriana Reatto dos Santos Braga



Fotos: Lineu Rodrigues (primeiro plano);
(da esquerda para a direita - 2); Marcos Carolino
(da esquerda para a direita - 1, 3 e 4)

8.1 Introdução

Até o início da década de 1960, os solos do bioma Cerrado eram considerados inadequados para a agricultura. No entanto, ao longo do tempo e com o desenvolvimento da infraestrutura viária, avanços tecnológicos em manejo e fertilidade do solo, concomitante com a demanda global crescente por produtos agrícolas, esta região se tornou uma das últimas grandes fronteiras agrícolas do planeta (Medeiros et al., 2021).

No Cerrado, predomina a ocorrência de solos ácidos e com baixa fertilidade natural, sendo mais de 60% compostos por Latossolos e Neossolos Quartzarênicos (Adámoli et al., 1986; Reatto et al., 2008). Esses solos apresentam naturalmente baixa fertilidade, o que demanda práticas intensivas de manejo, como o uso de fertilizantes e corretivos. Além disso, a irrigação desempenha um papel importante na melhoria da produtividade sem a necessidade de expansão da área cultivada (Guimarães; Landau, 2020).

Em condições naturais, os solos do Cerrado, principalmente os Latossolos e Neossolos Quartzarênicos, possuem elevadas taxas de infiltração (Resende et al., 2014), as quais tendem a diminuir quando submetidos a práticas produtivas inadequadas, em decorrência da destruição da estrutura original do solo (Sá et al., 2009). A adoção de práticas sustentáveis de manejo favorece na manutenção das propriedades físicas do solo, permitindo a infiltração de água e a recarga dos aquíferos. Estas práticas sustentáveis, aliadas à conservação das reservas legais e áreas de preservação permanente, desempenham um papel fundamental na recarga e disponibilidade de água nos aquíferos podendo, quando necessário e disponível, fazer uso da prática da irrigação.

No século XXI, apesar do vasto conhecimento e das tecnologias conservacionistas disponíveis para o manejo adequado dos recursos naturais, como solo e água, ainda se enfrentam desafios significativos no controle da degradação dos solos agrícolas. Essa degradação está

principalmente associada ao uso inadequado da terra (Dechen, 2016). Na região do Cerrado, o grande desafio atual é buscar sistemas de manejo do solo e da irrigação que promovam o desenvolvimento regional, econômico e ambiental de forma sustentável (Medeiros et al., 2021; Ferreira et al., 2023).

8.2 Solos do bioma Cerrado

Os Latossolos ocupam aproximadamente 48,6% do bioma Cerrado (Reatto et al., 2008), e cerca de 91% dos sistemas de irrigação por pivô central estão implantados em áreas cultivadas nesses solos, abrangendo aproximadamente 1.141.398 ha, conforme observado na Tabela 8.1. A maioria desses sistemas (53,9%) está localizada em Latossolos Vermelhos, sendo 35,7% em Latossolo Vermelho-Amarelo, que são predominantes no Cerrado (Adámoli et al., 1986; Reatto et al., 2008). Os Latossolos Amarelos representam apenas 1,4% dos equipamentos (Tabela 8.2), provavelmente devido à sua baixa ocorrência no Cerrado, que conforme apresentado por Reatto et al., (2008), abrangem apenas 2% da área do bioma.

Ao analisar o terceiro nível categórico, observa-se que os sistemas de irrigação estão predominantemente implantados em Latossolos distróficos (Tabela 8.3), com 456.743 ha (36,4%) em Latossolo Vermelho distrófico e 441.937 ha (35,2%) em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Em seguida, temos os Latossolos Vermelhos ácricos, com 117.583 ha (9,3%), e os Latossolos Vermelhos acriféricos, com 77.723 ha, correspondendo a 6,2% dos pivôs no bioma Cerrado.

De acordo com Reatto et al. (2008), mais de 95% dos Latossolos no bioma Cerrado apresentam baixa fertilidade natural, sendo caracterizados como distróficos, ou seja, saturação por bases inferior a 50%. No entanto, com um manejo adequado da fertilidade, esses solos são altamente produtivos (Resende et al., 1988; Sousa; Lobato, 2004), possuindo características físicas favoráveis e topografia adequada para a mecanização, sendo altamente adequados para a agricultura intensiva

(Oliveira et al., 1992; Ramalho Filho; Beek, 1995; Reatto et al., 2008; Medeiros et al., 2021).

No primeiro nível categórico (Tabela 8.1), os Neossolos ocupam o segundo lugar em área irrigada, representando apenas 2,57% dos equipamentos, ou seja, 32.283 ha. A maioria desses solos são Neossolos Quartzarênicos, abrangendo 25.620 ha (Tabela 8.2). Entre eles, cerca de 25 mil hectares são Neossolos Quartzarênicos órticos (Tabela 8. 3), que não apresentam características hidromórficas (Embrapa, 2013) e ocorrem nas partes mais elevadas da paisagem, anteriormente classificados como Areias Quartzosas (Oliveira et al., 1992).

Os Neossolos Quartzarênicos ocupam aproximadamente 14,4% da área do bioma Cerrado (Reatto et al., 2008) e são, por definição, arenosos, com no máximo 15% de argila, tendo sua fração areia dominada por quartzo (Embrapa, 2013). Eles apresentam baixa capacidade de retenção de água, exigindo um manejo adequado da irrigação, com intervalos de aplicação de água mais frequentes (Medeiros et al., 2021). Provavelmente devido a essas questões, foi constatada uma baixa porcentagem de pivôs nessas áreas, correspondendo a 2,57% (Tabela 8.1).

Em relação às principais ordens de solo, em terceiro lugar estão os Plintossolos, abrangendo uma área de 27.173 ha, correspondendo a 2,17% dos pivôs do Cerrado (Tabela 8.1). A maioria desses solos são Plintossolos pétricos, ocupando 25.411 ha, o que representa cerca de 2% dos pivôs do Cerrado (Tabela 8.2), sendo esses solos concrecionários (Tabela 8.3), o que dificulta bastante o manejo do maquinário (Resende et al., 2014).

As demais classes de solo abrangem aproximadamente 4% das áreas irrigadas por pivôs no Cerrado, com destaque para os Cambissolos, ocupando 24.869 ha (1,98%), e os Argissolos, ocupando 15.111 ha, correspondendo a 1,2%. As outras ordens de solo, como Gleissolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos e Luvissolos, representam menos de 0,9% da área irrigada por pivôs no Cerrado (Tabela 8.1).

Tabela 8.1. Área irrigada por sistema pivô central e porcentagem de unidades considerando as principais classes de solo no primeiro nível categórico ou ordens de solo do Brasil.

Primeiro nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
LATOSSOLO	1.141.398	91,159
NEOSSOLO	32.283	2,578
PLINTOSSOLO	27.173	2,170
CAMBISSOLO	24.869	1,986
ARGISSOLO	15.111	1,207
GLEISSOLO	9.777	0,781
NITOSSOLO	675	0,054
ORGANOSSOLO	412	0,033
PLANOSSOLO	264	0,021
Outros ⁽⁴⁾	318	0,026
Total	1.252.098	100,000

⁽¹⁾ Embrapa, 2013.

⁽²⁾ Área irrigada (ha) por pivôs em cada ordem de solo no Cerrado, com base em levantamento nacional feito por Guimarães e Landau, (2020).

⁽³⁾ Porcentagem em relação à área total irrigada por pivôs.

⁽⁴⁾ Inclui classes menos relevantes em termos de área.

Tabela 8.2. Área irrigada por sistema pivô central e porcentagem de unidades considerando as principais classes de solo no segundo nível categórico ou subordens de solo do Brasil.

Segundo nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
LATOSSOLO VERMELHO	675.058	53,906
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	448.061	35,780
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	25.620	2,046
PLINTOSSOLO PÉTRICO	25.411	2,029
CAMBISSOLO HÁPLICO	24.869	1,986
LATOSSOLO AMARELO	18.279	1,460

Continua...

Tabela 8.2. Continuação.

Segundo nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
GLEISSOLO HÁPLICO	8.885	0,710
ARGISSOLO VERMELHO	8.336	0,666
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	6.765	0,540
NEOSSOLO FLÚVICO	4.185	0,334
NEOSSOLO LITÓLICO	2.478	0,198
PLINTOSSOLO ARGILÚVICO	897	0,072
GLEISSOLO MELÂNICO	892	0,071
PLINTOSSOLO HÁPLICO	865	0,069
NITOSSOLO VERMELHO	675	0,054
ORGANOSSOLO HÁPLICO	412	0,033
PLANOSSOLO HÁPLICO	255	0,020
LUVISSOLO CRÔMICO	99	0,008
ARGISSOLO ACINZENTADO	10	0,001
PLANOSSOLO NÁTRICO	9	0,001
Outros ⁽⁴⁾	220	0,018
Total	1.252.280	100,000

⁽¹⁾ Embrapa, 2013.

⁽²⁾ Área irrigada (ha) por pivôs em cada ordem de solo no Cerrado, com base em levantamento nacional feito por Guimarães e Landau, (2020).

⁽³⁾ Porcentagem em relação à área total irrigada por pivôs.

⁽⁴⁾ Inclui classes menos relevantes em termos de área.

Tabela 8.3. Área irrigada por sistema pivô central e porcentagem de unidades considerando as principais classes de solo no terceiro nível categórico ou grandes grupos de solo do Brasil.

Terceiro nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
PVe - ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico	7.558	0,604
CXk - CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático	6.285	0,502

Continua...

Tabela 8.3. Continuação.

Terceiro nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
LVaw - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Ácrico	6.125	0,489
PVAe - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico	4.331	0,346
PVAd - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	2.327	0,186
RYbe - NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico	2.189	0,175
RLd - NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico	2.175	0,174
RYve - NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico	1.747	0,140
CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	1.503	0,120
LVEf - LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico	1.161	0,093
FTd - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico	897	0,072
FXd - PLINTOSSOLO HÁPLICO Distrófico	865	0,069
PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico	778	0,062
GMa - GLEISSOLO MELÂNICO Alumínico	627	0,050
RQg - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico	620	0,049
NVEf - NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico	414	0,033
OXs - ORGANOSSOLO HÁPLICO Sáprico	412	0,033
RLe - NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico	304	0,024
NVe - NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico	261	0,021
RYbd - NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico	249	0,020
GMbe - GLEISSOLO MELÂNICO Tb Eutrófico	241	0,019
SXd - PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico	203	0,016
CXbe - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico	177	0,014
CXve - CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico	157	0,013
PVAa - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico	106	0,008

Continua...

Tabela 8.3. Continuação.

Terceiro nível categórico (ordens de solo) ⁽¹⁾	Área (ha) ⁽²⁾	Área irrigada (%) ⁽³⁾
TCp - LUVISSOLO CRÔMICO Pálico	99	0,008
SXe - PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico	52	0,004
LAW - LATOSSOLO AMARELO Ácrico	50	0,004
GMbd - GLEISSOLO MELÂNICO Tb Distrófico	24	0,002
GXve - GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico	10	0,001
PACd - ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico	10	0,001
SNo - PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico	9	0,001
CXbef - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutroférico	8	0,001
Outros ⁽⁴⁾	220	0,018
Total	1.252.098	100,000

⁽¹⁾ Embrapa, 2013.

⁽²⁾ Área irrigada (ha) por pivôs em cada ordem de solo no Cerrado, com base em levantamento nacional feito por Guimarães e Landau, (2020).

⁽³⁾ Porcentagem em relação à área total irrigada por pivôs.

⁽⁴⁾ Inclui classes menos relevantes em termos de área.

8.3 Manejo do solo

8.3.1 A importância da matéria orgânica e sua manutenção

O manejo sustentável dos solos no bioma Cerrado enfrenta um desafio significativo: desenvolver ou adaptar tecnologias que permitam a aplicação prática de um princípio conservacionista universal, estabelecido há mais de 80 anos. Esse princípio enfatiza a importância de manter o solo coberto e permeado por raízes durante a maior parte do tempo, visando protegê-lo contra a erosão, aumentar a infiltração de água e preservar os teores de matéria orgânica, fertilidade e atividade biológica (Bennet, 1939). A aplicação desse princípio é fundamen-

tal para uma agricultura produtiva e estável (Sá et al., 2009; Medeiros et al., 2021).

Uma estratégia para manter o solo coberto e permeado por raízes na maior parte do ano, especialmente em cultivos anuais, é por meio da intensificação dos cultivos, implementando um processo conhecido como colher-semear, em que colheitas sucessivas são realizadas (Denardin et al., 2019). No entanto, esse processo deve ser executado dentro de um sistema de Plantio Direto, no qual são adotadas boas práticas agronômicas, como rotação e diversificação de culturas para formação de palhada, quebra do ciclo de pragas e doenças, manejo racional de corretivos e fertilizantes, além da implementação de práticas conservacionistas complementares, como terraceamento e cultivo em contorno (Sá et al., 2009; Denardin et al., 2019; Ferreira et al., 2021; Medeiros et al., 2021). Estas práticas contribuem para manter a qualidade do solo e a produtividade das culturas (Chaer et al., 2023).

Nesse contexto, a irrigação desempenha um papel fundamental ao permitir o aumento do número de safras por ano e mitigar os riscos climáticos (Lima; Silva, 2007; Guimarães; Landau, 2020). E a cobertura do solo proporcionada pela palhada também ajuda na manutenção da umidade do solo e disponibilidade de água (Spera et al., 2006; Sá et al., 2015), contribuindo para economia da água de irrigação.

No caso de culturas perenes, também é de extrema importância manter o solo coberto nas entrelinhas. Estudos realizados por Rocha et al. (2014) constataram melhorias na estrutura do solo e na capacidade de armazenamento de água ao adotar o cultivo e a manutenção de braquiária – *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (sinonímia *Brachiaria decumbens*), manejada com roçadeira nas entrelinhas de um cafezal irrigado por pivô central. Esta prática, inclusive, melhora a qualidade biológica do solo (Rodrigues et al., 2021).

A intensificação dos cultivos, quando realizada de maneira adequada e respeitando as boas práticas agronômicas, não apenas proporciona retorno econômico ao agricultor, mas também promove o contínuo

aporte de palha e resíduos culturais (Sá et al., 2009; Denardin et al., 2019; Ferreira et al., 2021).

Os solos de textura média e arenosa na região nordestina do bioma Cerrado possuem baixa capacidade de retenção de água e são altamente suscetíveis à compactação (Donagemma et al., 2016; Fontana et al., 2016). Nestes solos, ocorre uma rápida redução nos teores de matéria orgânica quando são constantemente submetidos ao revolvimento por arados e grades, conforme relatado por Silva et al. (1994) no oeste da Bahia. Os autores constataram substancial redução nos teores de matéria orgânica e na capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0 ao longo de cinco anos de manejo com grade pesada. Por outro lado, embora esta redução de matéria orgânica não seja tão drástica em solos argilosos de outras regiões do Cerrado, a adoção de sistemas de manejo que conservem matéria orgânica também é fundamental nestas condições. Sá et al. (2022) constataram que em um Latossolo Vermelho acriférrico do Cerrado goiano com 60% de argila, cerca de 97% da CTC é atribuída a apenas 3% de matéria orgânica. Isso evidencia a importância da manutenção de teores adequados de matéria orgânica, mesmo em solos com textura muito argilosa, para garantir a sustentabilidade de sistemas agrícolas em regiões tropicais (Lal, 2020).

No contexto dos cultivos de sequeiro, mesmo sob o sistema de plantio direto, enfrenta-se desafios significativos na produção e manutenção de palha na superfície do solo, devido ao clima sazonal do Cerrado, caracterizado por estações chuvosas e secas. Isso dificulta a viabilidade da implementação de uma segunda safra, o que pode não ser problema em sistemas irrigados. O uso de gesso como condicionador do subsolo tem sido benéfico ao promover o aprofundamento das raízes e reduzir os riscos de perdas decorrentes de períodos de seca (Sousa; Lobato, 2004). Essa prática também pode ser útil em sistemas de irrigação, tanto para a economia de água quanto para a melhoria do perfil do solo, aumentando a matéria orgânica em camadas mais profundas (Araújo et al., 2019). Esse incremento resulta em um aumento na capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de nutrientes.

8.3.2 A compactação do solo

A susceptibilidade à compactação do solo é influenciada por características como granulometria, mineralogia e teor de matéria orgânica, que estão diretamente relacionadas à estrutura e coesão das partículas do solo (Medeiros et al., 2021). O tráfego de máquinas causa deformação no solo, resultando no aumento da densidade e resistência à penetração, o que leva à redução da porosidade (Reichert et al., 2003). Solos compactados proporcionam um menor crescimento das plantas devido à redução do volume de solo explorado pelas raízes, o que consequentemente afeta a produtividade das culturas (Reichert et al., 2007; Sá et al., 2016).

O tráfego de máquinas é reconhecido como a principal causa da compactação dos solos agrícolas. Com a modernização da agricultura, houve um aumento no tamanho e peso das máquinas e implementos, assim como uma intensificação em seu uso. Essas mudanças têm alterado as propriedades físicas dos solos e agravado os processos de compactação (Richart et al., 2005; Sá et al., 2009; Fontana et al., 2016). Além disso, as vibrações resultantes do arraste dos implementos e da patinagem das máquinas também contribuem para a compactação (Horn et al., 1995). Muitas vezes, em busca de aumentar a eficiência operacional e cobrir grandes áreas, o trabalho é realizado em turnos que se estendem dia e noite (Medeiros et al., 2021).

Embora o maquinário seja o agente ativo no processo de compactação do solo, seu efeito é influenciado pela umidade presente no momento do tráfego, sendo potencializado em teores mais elevados de água, especialmente quando o solo está no estado plástico ou acima do limite de plasticidade (Severiano et al., 2010). No contexto do Cerrado, esse fenômeno tem sido observado mesmo em sistemas de cultivo de sequeiro, em regiões onde a colheita da safra principal (variedades precoces) é realizada em solo úmido para adiantar o plantio da segunda safra (ou safrinha). Além disso, em regiões onde normalmente se cultiva apenas uma safra por ano em condições de sequeiro, como na porção nordestina do Bioma onde a janela de plantio é es-

treita, os produtores muitas vezes se veem pressionados pelo tempo para semear grandes áreas, aumentando a probabilidade de trafegar em solo úmido (Medeiros et al., 2021).

Em sistemas de produção irrigados, é necessário um cuidado redobrado, buscando a compatibilização do manejo da irrigação com o manejo do solo, no sentido de se evitar ao máximo o tráfego de máquinas em condições de solo muito úmido, sobretudo no estado plástico, onde a susceptibilidade à compactação é maior.

8.4 Considerações finais

Neste capítulo, foi abordada a importância de compreender as relações entre as áreas irrigadas, os ambientes e a sustentabilidade da agricultura no bioma Cerrado. O desenvolvimento agrícola nessa região tem sido impulsionado pela expansão da infraestrutura, avanços na ciência agropecuária e pela demanda global por produtos agrícolas. No entanto, é fundamental adotar práticas sustentáveis de manejo do solo e da irrigação para garantir a conservação dos recursos naturais e a manutenção da produtividade agrícola.

O bioma Cerrado abriga nascentes de importantes bacias hidrográficas brasileiras, que contribuem significativamente para a vazão de grandes rios em outros biomas. A conservação das reservas legais, áreas de preservação permanente e a adoção de práticas sustentáveis de manejo do solo são fundamentais para garantir a disponibilidade de água para a prática da irrigação, tanto no Cerrado quanto nos demais biomas brasileiros.

A distribuição das áreas irrigadas por pivô central no Cerrado mostra uma concentração nas regiões sudeste e leste do bioma, correspondentes às bacias do Paraná e São Francisco, além da região noroeste-norte, que coincide com a bacia do Tocantins-Araguaia. Essas bacias hidrográficas desempenham um papel crucial na disponibilidade de água para a irrigação, especialmente considerando que a maio-

ria das nascentes e afluentes que abastecem esses rios está localizada dentro do bioma.

É importante ressaltar que a distribuição das áreas irrigadas está relacionada à geomorfologia do Cerrado. Áreas mais elevadas abrigam a maior parte dos sistemas de irrigação, enquanto as áreas de depressão possuem uma representatividade menor. O conhecimento das características geomorfológicas e a identificação das ecorregiões pode auxiliar no planejamento e na gestão das áreas irrigadas no bioma.

O manejo adequado do solo é essencial para garantir a sustentabilidade da agricultura no bioma Cerrado. A manutenção da matéria orgânica do solo, por meio de práticas conservacionistas como o plantio direto, a rotação de culturas e a cobertura do solo com palhada, contribui para proteger contra a erosão, melhorar a infiltração de água e manter a fertilidade do solo. Além disso, a irrigação desempenha um papel importante no aumento da produtividade e na mitigação dos riscos climáticos, permitindo o cultivo de múltiplas safras por ano. Esta intensificação, por sua vez, contribui para o aumento da produção vegetal, que inclui tanto alimentos quanto restos culturais, os quais proporcionam cobertura do solo e aporte de matéria orgânica, fundamental para a sustentabilidade de qualquer sistema agrícola.

No entanto, a compactação do solo representa um desafio para a sustentabilidade da agricultura no bioma Cerrado. O tráfego de máquinas e implementos agrícolas, especialmente em solos úmidos, pode levar à compactação do solo, reduzindo a porosidade e comprometendo o crescimento das plantas. Portanto, é necessário adotar medidas cautelosas no manejo do solo e da irrigação para evitar a compactação e preservar a estrutura e as propriedades físicas do solo.

Em suma, a compreensão das interações entre a distribuição das áreas irrigadas, os ambientes e a sustentabilidade da agricultura no bioma Cerrado são fundamentais para promover o desenvolvimento regional, econômico e ambiental de forma sustentável. A implementação de práticas sustentáveis de manejo do solo e da irrigação, aliada à conservação dos recursos naturais, contribui para garantir a disponi-

bilidade de água, preservar a fertilidade do solo e promover a produtividade agrícola no bioma Cerrado e em todo o país.

8.5 Referências

- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, J. L. de; MADEIRA NETTO, J. M. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. J. (ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC; São Paulo: Nobel, 1986. p. 33-74.
- ARAÚJO, L. G.; SOUSA, D. M. G.; FIGUEIREDO, C. C.; REIN, T. A.; NUNES, R. S.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; MALAQUIAS, J. V. How does gypsum increase the organic carbon stock of an Oxisol profile under sugarcane? **Geoderma**, v. 343, p. 196-204, 2019.
- BENNET, H. H. **Soil conservation**. New York: McGraw-Hill Book, 1939.
- CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, 104742, 2023.
- DECHEN, S. C. F. A dificuldade de controle da erosão em solos agrícolas em pleno século XXI. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 20., 2016, Foz do Iguaçu. **O solo sob ameaça: conexões necessárias ao manejo e conservação do solo e água: anais**. Curitiba: SBSC, Nepar; Londrina: Iapar, 2016.
- DENARDIN, J.; FAGANELLO, A.; LEMAINSKI, J. Converter plantio direto em Sistema Plantio Direto-um modelo à sustentabilidade agrícola. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 12., 2018, Passo Fundo. **Ata e Resumos...** Passo Fundo: Projeto Passo Fundo, 2019. p. 568-572.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. de; BALIEIRO, F. de C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SANTOS, F. C. dos; ALBUQUERQUE, M. R. de; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1003-1020, set. 2016.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013.
- FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; INAGAKI, T. M.; BRIEDIS, C.; TIVET, F. Can no-till restore soil organic carbon to levels under natural

vegetation in a subtropical and tropical Typic Quartzipsamment? **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 4, p. 1742-1750, 2021.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; AMORIM, R. S. S. Spatial-temporal variability of climatic water balance in the Brazilian savannah region river basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, 2023.

FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. C.; MOURA, T. P. A.; MENEZES, A. R.; SANTANA, C. I. Característica e atributos de Latossolos sob diferentes usos em Luís Eduardo Magalhães, Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1457-1465, 2016.

GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil**: ano base 2020. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 63 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 222). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1128368>.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, p. 23-36, 1995.

LAL, R. Soil organic matter content and crop yield. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 75, n. 2, p. 27A-32A, 2020.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da. Gestão de recursos hídricos e manejo da irrigação no Cerrado. In: FALEIRO, F. G.; SOUSA, E. dos S. de. (ed.). **Pesquisa, desenvolvimento e inovação para o Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. p. 33-44.

MEDEIROS, J. C.; SÁ, M. A. C.; ROSA, J. D.; ARAÚSO, A. S. F. Manejo e conservação do solo e da água em sistemas agrícolas no bioma Cerrado do Nordeste brasileiro. In: H. A. SOUZA; LEITE, L. F. C.; MEDEIROS, J. C. (ed.). **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. Brasília, DF: Embrapa, 2021, Parte II, Cap. 1, p. 173-212.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K.; CAMARGO, M. **Classes gerais de solos do Brasil**: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal: Funep, 1992. 201 p.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995.

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF, Embrapa informação tecnológica, 2008.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia base para distinção de ambientes**. Lavras: Ed. da Ufla, 2014. 378 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D. P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília, DF: Mec, 1988.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina**, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; RAMOS, M. L. G. Qualidade físico-hídrica de um Latossolo sob irrigação e braquiária em lavoura de café no cerrado. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 516-526, 2014.

RODRIGUES, R. N.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; VEIGA, A. D.; MENDES, I. C. Atividade enzimática de solo sob cultivo de café com diferentes regimes hídricos associados a calagem e braquiária nas entrelinhas. **Ciência Rural**, v. 52, 2021.

SÁ, M. A. C. de; FRANZ, C. A. B.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; REIN, T. A.; BUFON, V. B.; CARVALHO, A. M. de; MULLER, A. G. **Manejo do palhicho residual na cultura de cana-de-açúcar no Cerrado: primeira aproximação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. 6 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 27). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1026337>. Acesso em: 28 mar. 2024

SÁ, M. A. C.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. S.; SOUZA, K. W.; FRANZ, C. A. B. Produtividade da cana de açúcar e atributos de um Latossolo acriférrio do cerrado sob plantio direto e convencional. **STAB**: Piracicaba, v. 40, n. 1, 2022. Disponível em: <http://stabregsul.ddns.net:8080/site/pdf/40.1.1.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2024

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1610-1622, 2016.

SA, M. A. C. de; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; FRANZ, C. A. B. **Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. Documentos, 258. 53 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/747825>. Acesso em: 28 mar. 2024.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I-modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 404-413, 2010.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, pág. 541-547, 1994.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

SPERA, S. T.; CORREIA, J. R.; REATTO, A. Solos do bioma Cerrado: propriedades químicas e físico-hídricas sob uso e manejo de adubos verdes. In: CARVALHO, A. M.; AMABILE, R. F. (ed.). **Cerrado: adubação verde**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2006. p. 41-45.

CAPÍTULO 9

Recursos Hídricos Superficiais no Cerrado

Daniel Althoff

Lineu Neiva Rodrigues



9.1 Introdução

Os recursos hídricos são renováveis, mas são limitados no espaço e no tempo, podendo não serem suficientes para atender às demandas de todos os usuários. Portanto, o uso dos recursos hídricos disponíveis deve ser planejado e harmonizado entre os diferentes usuários.

No Brasil, a gestão de recursos hídricos desenvolveu-se com maior intensidade e vigor nas Unidades da Federação e nas bacias hidrográficas, onde eram e ainda são percebidos conflitos relacionados às restrições ao acesso à água. Esses conflitos decorrem tanto por questões relacionadas à baixa disponibilidade hídrica, quanto por questões relacionadas ao excesso da demanda. Até o final do século passado, os principais problemas relacionados ao acesso à água eram verificados, com maior intensidade, apenas no semiárido nordestino, no entorno das grandes cidades brasileiras e, pontualmente, em áreas específicas de estados do Sul e do Sudeste (Agência Nacional de Águas, 2014).

Atualmente, em razão da falta de planejamento intersetorial de longo prazo e do desenvolvimento acelerado e muitas vezes não planejado das diversas atividades econômicas, são encontradas áreas no país que também começam a apresentar os primeiros conflitos intra-setoriais e intersetoriais em torno da demanda e da oferta de recursos naturais, dentre eles a água (Agência Nacional de Águas, 2014). Esse é o caso, por exemplo, de várias bacias hidrográficas do bioma Cerrado.

O Cerrado é crucial para a dinâmica de águas no território brasileiro, sendo essencial para o abastecimento de água para o semiárido e estratégico para a manutenção do equilíbrio hidrológico do país. Os períodos de estiagens estão se tornando cada vez mais acentuados. Isto, aliado a um rápido desenvolvimento econômico da região e à falta de uma adequada estratégia de monitoramento e de gestão de recursos hídricos, têm contribuído para aumentar a escassez hídrica e as disputas pelo uso de água, comprometendo o abastecimento de regiões importantes, como, por exemplo, o Distrito Federal (Agência Nacional de Águas, 2017).

Compreender o potencial hídrico dessa região é importante para o planejamento estratégico, o desenvolvimento econômico e o estabelecimento de políticas hídricas efetivas, que considerem as diferentes dimensões do uso e dos usuários de recursos hídricos. Neste contexto, quantificar e mapear a escassez de água é essencial para entender a vulnerabilidade à escassez de água nas regiões do Cerrado, o que contribuirá para assegurar a produção de alimentos e minimizar a pobreza por meio de desenvolvimento econômico.

9.2 Disponibilidade hídrica

O Cerrado pode ser visto como a caixa d'água na América do Sul, responsável por captar as águas pluviais que irão abastecer as nascentes de rios de várias bacias hidrográficas, além do Aquífero Guarani (Brasil, 2013). Com um perímetro de aproximadamente 37,3 milhões de quilômetros, a região do Cerrado inclui total ou parcialmente as seguintes regiões hidrográficas: Tocantins-Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Paraná, Paraguai, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Leste e Amazônica (Figura 9.1).

Das regiões hidrográficas, observa-se que 64,6% da área de drenagem da região hidrográfica do Tocantins-Araguaia encontra-se no Cerrado. Analisando-se as demais regiões, observa-se que 46,7% do São Francisco, 59,3% do Parnaíba, 46,0% do Paraná, 48,6% do Paraguai, 46,7% do Atlântico Nordeste Ocidental, 10,4% do Atlântico Leste e 3,7% da Amazônica se encontram dentro da região do Cerrado.

Para avaliar a disponibilidade hídrica da região, foram utilizados dados de vazão provenientes de 607 estações fluviométricas (Figura 9.2). Os dados utilizados foram obtidos no portal HidroWeb⁸. Também foram utilizadas nas avaliações as estações com menos de 10% de falhas para o período de junho de 2000 a dezembro de 2014 (~14,5 anos).

⁸ Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>

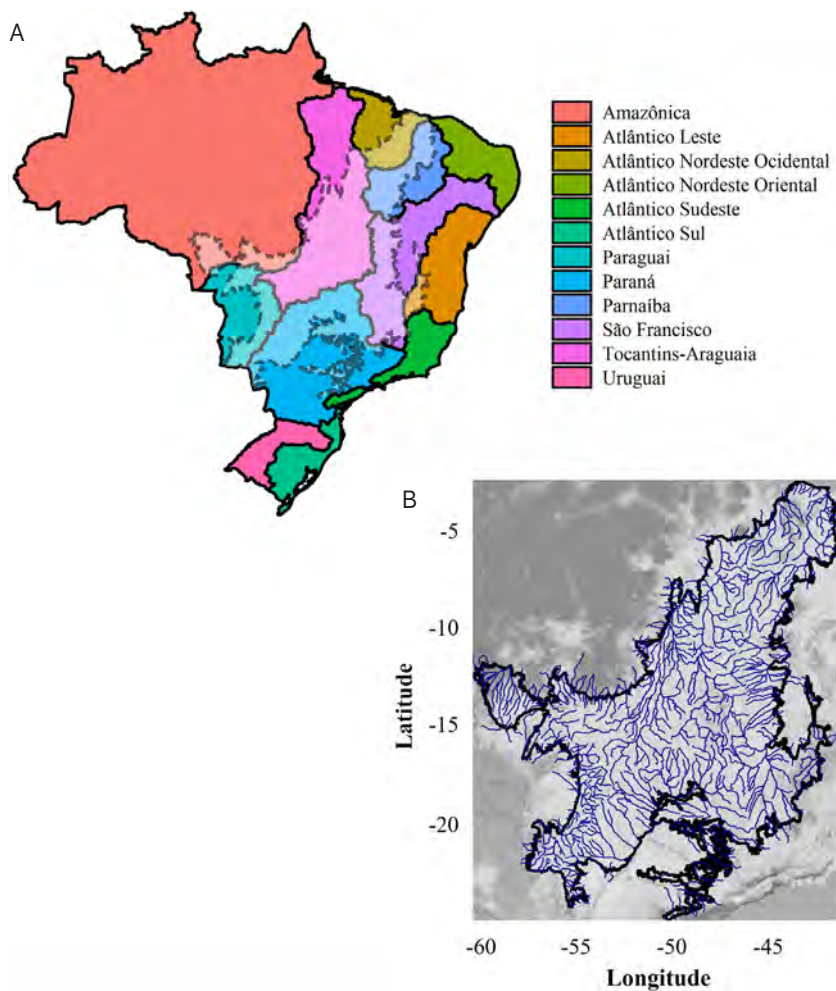


Figura 9.1. As principais regiões hidrográficas do Brasil (A) e a hidrografia do Cerrado (B).

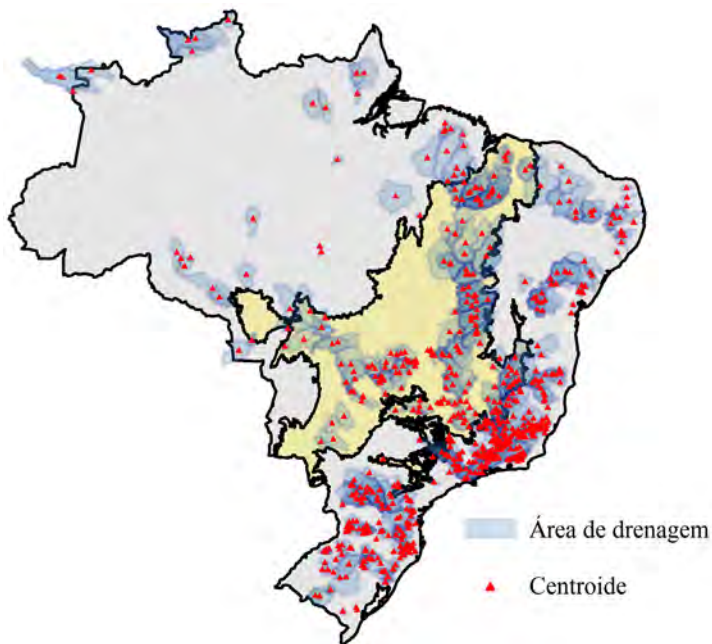


Figura 9.2. Área de drenagem e respectivos centros das estações fluviométricas.

Na Figura 9.3, são apresentadas informações sobre as vazões referentes às estações cujas áreas de drenagem são inferiores a 50 mil quilômetros quadrados ($1 \text{ mm dia}^{-1} = \sim 11,6 \text{ L km}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Esse critério foi estabelecido para minimizar possíveis distorções no cálculo da disponibilidade hídrica devido a estações com grandes áreas de drenagem, evitando que um único valor de disponibilidade viesse a representar a realidade de toda a região.

Esse fato pode ser visto, por exemplo, nas estações fluviométricas próximas à foz da bacia do Rio São Francisco, onde locais distintos da bacia são caracterizados por climas diferentes (tropical e semiárido). No total, foram identificadas 222 estações que se enquadraram nesse critério e apresentaram área inteira ou parcialmente dentro do Cerrado. Para melhor representar a disponibilidade local das vazões,

foram apresentados os centroides das respectivas áreas de drenagem para as estações fluviométrica.



Figura 9.3. Vazão média mensal das estações fluviométricas do Cerrado, considerando o período de junho de 2000 a dezembro de 2014 (~14,5 anos).

Analisando a Figura 9.3, observa-se uma região, que vai do Oeste (município de São Felipe D'Oeste, RO) ao Sudeste (município de Nova Era, MG), cujas bacias se encontram totalmente ou parcialmente dentro dos limites do Cerrado, com maior disponibilidade hídrica de dezembro a abril. A partir de abril, fica evidente a redução da disponibilidade hídrica na região, chegando a valores inferiores a 1 mm dia^{-1} de vazão. Para a região Leste (município de Riacho dos Machados, MG) ao Norte do Cerrado (município de Chapadinha, MA), pode ser notada uma disponibilidade hídrica baixa ao longo de todo ano. Essas vazões são especialmente baixas de julho a dezembro para a região Norte, com muitos rios apresentando vazão intermitente. É possível notar também que há coerência em relação ao índice de aridez, conforme

foi apresentado na Figura 3.9 (Capítulo 3) desta obra. As regiões que apresentam elevado índice de aridez em grande parte do ano são as mesmas que apresentam baixa disponibilidade hídrica.

9.3 Contribuição do Cerrado para as regiões hidrográficas

A contribuição do Cerrado para a vazão de cursos d'água das principais regiões hidrográficas do país foi avaliada por meio do coeficiente de escoamento superficial, que representa a fração da precipitação (P) que é convertida em vazão escoada (Q) (Figura 9.4A). Para calcular o coeficiente, foi utilizada a precipitação média anual do IMERG (Huffman et al., 2019) para o mesmo período adotado na análise de disponibilidade hídrica (2000 a 2014). A razão entre vazão e chuva (Q/P) foi interpolada por krigagem ordinária para todo o território brasileiro (Figura 9.4B), possibilitando estimar a fração da chuva que contribui para a vazão em todo o território, e, consequentemente, a contribuição do Cerrado para as vazões nas principais regiões hidrográficas brasileiras.

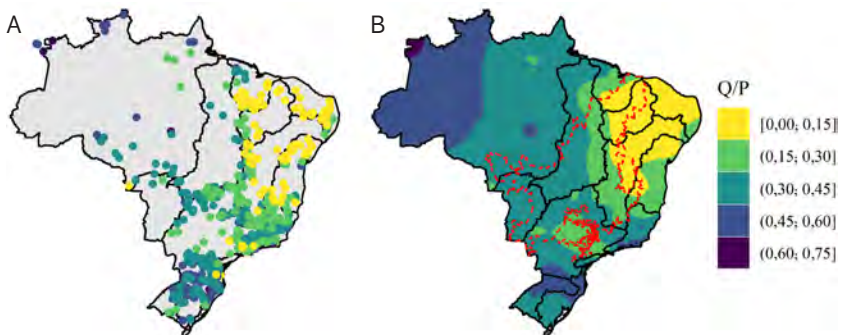


Figura 9.4. Coeficiente de escoamento (Q/P) obtido no período de 2000 a 2014 para os centroides de área de drenagem das estações fluviométricas (A) e interpolado por meio de krigagem ordinária (B).

A relação entre vazão escoada e precipitação (Q/P), como ilustrado na Figura 4, indica que apenas uma pequena parte da chuva que precipita na região Leste e Norte do Cerrado, regiões hidrográficas do Parnaíba e São Francisco, se transforma em vazão. As partes dessas regiões hidrográficas fora do Cerrado apresentam clima ainda mais árido e menor coeficiente de escoamento, o que resulta em elevada contribuição do Cerrado para a disponibilidade hídrica dessas regiões em relação à sua ocupação em área.

Na Figura 9.5, está apresentada a contribuição do Cerrado para a vazão total das principais regiões hidrográficas brasileiras localizada neste bioma (Figura 9.5A e 9.5B). É possível observar a vazão disponível para as regiões hidrográficas, as quais se originaram em áreas do Cerrado. Da mesma forma, é possível observar a vazão disponível para as regiões hidrográficas que têm origem nas áreas do Cerrado, bem como a proporção dessas regiões ocupadas pelo bioma Cerrado (Figura 9.4B, barra em contornos tracejados). Conforme visto, é possível verificar que o Cerrado contribui para as vazões de oito das doze regiões hidrográficas, o que demonstra sua importância estratégica para a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento econômico dessas regiões.

Em termos de área (Figura 9.5B), observa-se que a região hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a que apresenta a maior porcentagem de sua área como parte do Cerrado (64,6%), seguida das regiões hidrográficas do Parnaíba (59,3%), Paraguai (48,6%), Atlântico Nordeste Ocidental (46,7%), São Francisco (46,7%), Paraná (46,0%), Atlântico Leste (10,4%) e a Amazônica (3,7%).

Já em termos de vazão (Figura 9.5B), observa-se que a região hidrográfica do Parnaíba é a que apresenta a maior porcentagem de vazão originando em áreas de Cerrado (81,6%), seguida da região hidrográfica do São Francisco (74,8%), Tocantins-Araguaia (55,2%), Paraguai (51,6%), Paraná (41,7%), Atlântico Nordeste Ocidental (23,3%), Atlântico Leste (12,0%) e Amazônica (2,3%).

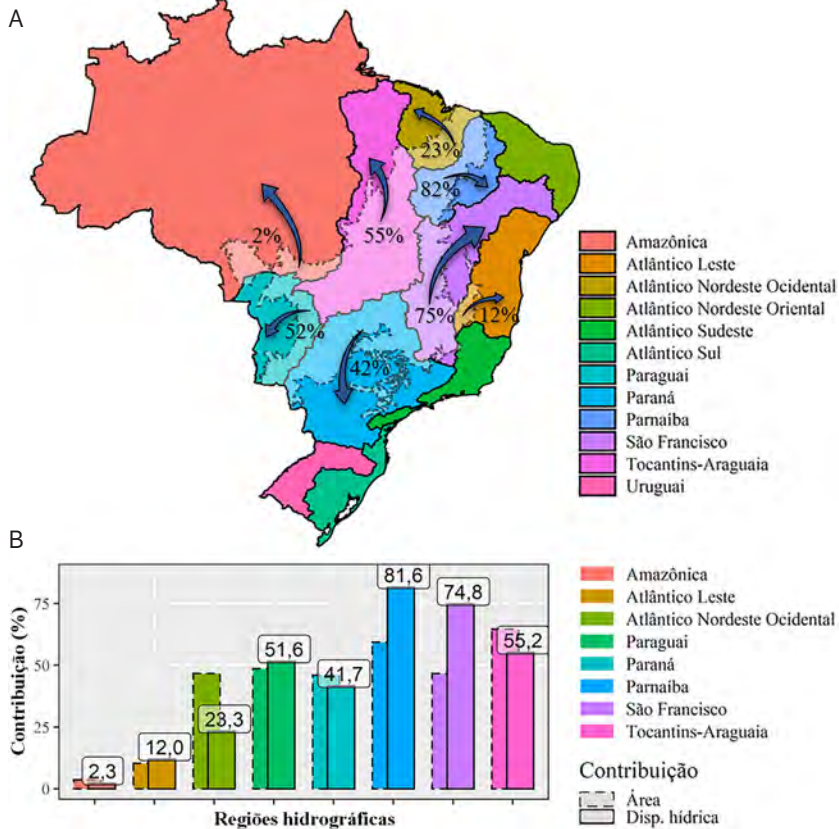


Figura 9.5. Contribuição do Cerrado para a vazão total das principais regiões hidrográficas do Brasil que se encontram dentro do Cerrado (A); a proporção de área das regiões hidrográficas do Brasil que se encontram dentro do Cerrado (B). As barras com contornos tracejados representam a proporção em área que as principais regiões hidrográficas do Brasil apresentam dentro do Cerrado, enquanto as barras em contornos sólidos representam a contribuição do Cerrado na vazão das mesmas.

A relação entre a proporção de área e a contribuição de vazão não é linear. Por exemplo, o Cerrado ocupa apenas 59,3% e 46,7% das áreas de drenagem das regiões hidrográficas do Parnaíba e São Francisco,

mas contribui com 81,6% e 74,8% da disponibilidade hídrica dessas regiões, respectivamente (Figura 9.5).

Por outro lado, para a região hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental, o Cerrado apresenta uma contribuição em disponibilidade hídrica proporcionalmente menor do que a área ocupada pelo bioma. Apesar de ocupar cerca de 46,7% da área dessa região hidrográfica, o Cerrado contribui com apenas 23,3% da disponibilidade hídrica. Isso se deve ao fato da porção do Atlântico Nordeste Ocidental ocupada pelo Cerrado apresentar baixo coeficiente de escoamento em comparação à porção ocupada pelo bioma Amazônia.

Como pode ser observado, o Cerrado tem papel estratégico em termos de recursos hídricos para várias regiões hidrográficas. Porém, para o São Francisco, ele é crucial, uma vez que impacta a qualidade de vida de mais de 15 milhões de pessoas que vivem em cerca de 505 municípios dessa região. Este fato demonstra a importância de ter uma visão integrada dos recursos hídricos, levando em conta os diversos usos e as especificidades das regiões. Para isso, é fundamental planejar e gerir estrategicamente esses recursos no Cerrado.

9.4 Critérios de outorga

A Constituição Federal dividiu o domínio das águas entre a União, os estados e o Distrito Federal, DF. Cabe aos estados e ao DF o domínio das águas subterrâneas, dos rios estaduais e dos distritais. Por sua vez, a Lei das Águas determina que a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos é a bacia hidrográfica, que, em geral, não coincide com a divisão político-administrativa das unidades federadas e nem com os limites dos aquíferos (Agência Nacional de Águas (Brasil), 2013).

Após a Constituição Federal de 1988, que definiu como competência da União a instituição do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Art. 21, XIX) e determinou que as águas são bens públicos de domínio da União ou dos Estados (Arts. 20 e 26, respec-

tivamente), ocorreu a edição da Lei n.º 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Brasil, 2006).

A Política Nacional de Recursos Hídricos se baseia nos seguintes fundamentos: (a) a água é um bem de domínio público; (b) a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; (c) em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; (d) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; (e) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; e (f) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos: (a) a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade; (b) a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do país; (c) a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental; (d) a articulação do planejamento de recursos hídricos com o dos setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional; (f) a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo; (g) a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.

São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos: (a) os planos de recursos hídricos; (b) o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; (c) a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; (d) a cobrança pelo uso de recursos hídricos; (e) a compensação a municípios; e (f) o sistema de informações sobre recursos hídricos.

A outorga e a cobrança, por impactarem diretamente as atividades dos usuários, possivelmente são os instrumentos mais conhecidos e

debatidos pela sociedade. A legislação de recursos hídricos apresenta critérios importantes que devem ser considerados em todas as análises de outorgas realizadas, tais como as prioridades de uso estabelecidas nos planos de recursos hídricos e a preservação do uso múltiplo dos recursos hídricos. Isso significa que a disponibilidade hídrica de uma bacia não deve ser comprometida com apenas um usuário ou setor, em situações em que há diversos setores com interesses de uso.

A Agência Nacional de Águas, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, possui competências para emitir outorgas de direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, como rios e lagos que banham mais de um estado ou país e, ainda, as águas armazenadas em reservatórios de propriedade de entidades federais. Quando se trata de águas subterrâneas, dos rios estaduais e dos distritais, é responsabilidade dos Estados e do DF emitir outorgas de direito de uso desses recursos hídricos.

A dupla dominialidade das águas é um complicador adicional para a gestão de recursos hídricos. A adoção de critérios distintos, entre os órgãos gestores para a avaliação das vazões máximas outorgáveis é um complicador que pode comprometer a gestão.

A vazão máxima outorgável é, geralmente, uma fração de uma vazão de referência. As vazões referências utilizadas no Brasil são a $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} . A $Q_{7,10}$ é a vazão média mínima de 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos, enquanto as vazões Q_{95} e Q_{90} são as igualadas ou superadas em 95% e 90% do tempo ("vazão de permanência"), respectivamente. Para águas superficiais de domínio da União, a vazão máxima outorgável é de 70% da vazão Q_{95} ; no entanto, isso pode variar em função das peculiaridades de cada região.

Outro aspecto a ser considerado diz respeito às águas superficiais que são de domínio de unidades federativas em que diferentes critérios são adotados para concessão de outorgas. Os critérios adotados para a região do Cerrado são apresentados na Tabela 9.1. Note que esses

critérios variam de acordo com as peculiaridades de cada região e são determinados por diferentes legislações. Essas legislações são provenientes de decretos estaduais, distritais, resoluções provenientes de diferentes órgãos, como por exemplo o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH, CRH ou CEHIDRO) de cada estado, o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), o Instituto de Águas do Paraná (IAP), o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), entre outros.

Além da vazão máxima outorgável, na Tabela 9.1, são apresentados os critérios de limite máximo de vazões consideradas insignificantes e isentas de outorga. Contudo, em alguns casos, ainda é necessário registrar a captação e água junto ao órgão responsável.

Na Tabela 9.2, são apresentados os principais órgãos gestores e a legislação que institui a política de recursos hídricos para cada domínio hídrico.

Tabela 9.1. Critérios adotados para concessão de outorga para captação de águas superficiais no Cerrado.

Domínio	Legislação ⁽¹⁾	Vazão outorgável	Legislação ⁽²⁾	Vazão insignificante
União	-	70% da Q_{95} ⁽³⁾	Rs. ANA 542/2004	1,0 L s ⁻¹
BA	D.E. n° 6.296/1997	80% da Q_{90}	D.E. n° 6.296/1997	0,5 L s ⁻¹
DF	D.D. n° 22.359/2001	80% da Q_{90}	D.D. n° 22.359/2001	1 L s ⁻¹
GO	Rs. CERH/GO n° 9/2005	70% da Q_{95}	-	-
MA	D.E. n° 27.845/2011	20% da Q_{90}	D.E. n° 27.845/2011	0,2 L s ⁻¹
MG	Rs. conjunta SEMAD-IGAM n° 1.548/2012	50% da $Q_{7,10}$ ⁽⁴⁾	D.N. CERH/MG n° 9/2004	5,0 L s ⁻¹
MS	Rs. CERH/MS n° 25/2015	70% da Q_{95}	Rs. CERH/MS n° 25/2015	1,5 L s ⁻¹
MT	Rs. CEHIDRO n° 27/2009	70% da Q_{95}	Rs. CEHIDRO n° 27/2009	Até 0,5 L s ⁻¹ (se $Q_{95} > 200 \text{ L s}^{-1}$)
PA	Rs. CERH/PA n° 10/2010	70% da Q_{95}	Rs. CERH/PA n° 9/2009	1 L s ⁻¹
PI	Rs. CERH/PI n° 4/2005	80% da Q_{95}	-	-
PR	D.E. n° 1.590/2015	50% da Q_{95}	Po. IAP n° 130/2020	0,5 L s ⁻¹
RO	-	-	Rs. CRH/RO n° 4/2014	1 L s ⁻¹
SP	D.E. n° 43.284/1998	50% da $Q_{7,10}$	Po. DAEE n° 1.631/2017	25 m ³ dia ⁻¹
TO	D.E. n° 9.433/1997	75% da Q_{90}	D.E. n° 9.433/1997	1 L s ⁻¹ ou 21,6 m ³ dia ⁻¹

⁽¹⁾ Legislação referente à vazão máxima outorgável a fio d'água. D.E. = Decreto Estadual, D.D. = Decreto Distrital, Rs. = Resolução, Po = Portaria, D.N. = Deliberação Normativa; ⁽²⁾ Legislação referente à limites máximos de vazões consideradas insignificantes; ⁽³⁾ Pode variar em função da peculiaridade de cada região; ⁽⁴⁾ Exceções: 30% da $Q_{7,10}$ para bacias hidrográficas dos Rios Jequitai, Pacuí, Urucua, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paraopeba e Velhas (áreas dessas bacias consideradas pelo IGAM como de conflito pelo uso da água - limite de 50% da $Q_{7,10}$); ⁽⁵⁾ 0,5 L s⁻¹ em regiões de escassez.

Tabela 9.2. Órgãos gestores de água e legislação que institui a política de recursos hídricos para cada domínio.

Domínio	Órgão gestor	Legislação
União	Agência Nacional de Águas (ANA)	Lei nº 9.433/1977
BA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA-BA)	Lei nº 11.612/2009
DF	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA-DF)	Lei nº 2.725/2001
GO	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD-GO)	Lei nº 13.123/1997
MA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA-MA)	Lei nº 8.149/2004
MG	Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)	Lei nº 13.199/1.999
MS	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL)	Lei nº 2.406/2002
MT	Superintendência de Recursos Hídricos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SURH/SEMA-MT)	Lei nº 11.088/2020
PA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA)	Lei nº 6.381/ 2001
PI	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMAR-PI)	Lei nº 5.165/2000
PR	Instituto de Água e Terra (IAT) e Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST-PR)	Lei nº 12.726/ 1999
RO	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM-RO)	Lei nº 255/2002
SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE-SP)	Lei nº 7.663/ 1991
TO	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Tocantins (SEMARH-TO)	Lei nº 1.307/2002

9.5 Vazões de referência (assinaturas hidrológicas)

As assinaturas hidrológicas podem ser utilizadas para representar os padrões hidrológicos de uma bacia hidrográfica, como, por exemplo, o seu potencial para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. A vazão média (\bar{Q}), por exemplo, pode ser utilizada para descrever a disponibilidade hídrica potencial da região.

Dessa forma, a razão entre Q_{95} e \bar{Q} (Q_{95}/\bar{Q}) caracteriza uma disponibilidade hídrica relativa e indica o potencial de regularização de uma bacia hidrográfica (Althoff et al., 2021). Ou seja, quanto menor a disponibilidade hídrica relativa, maior o potencial de regularização e, assim, maior o volume de água que poderá ser armazenado tanto em grandes reservatórios como em pequenas barragens de terra em propriedades rurais.

O armazenamento do excesso de escoamento superficial durante a época chuvosa tem como objetivo disponibilizar a água em períodos de estiagem ou durante a estação seca, melhorando a sustentabilidade hídrica local. Logo, uma baixa disponibilidade hídrica relativa em regiões com valores baixos de Q_{95} pode significar um grande potencial de melhoria no uso sustentável de água, especialmente para o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Na Figura 9.6, são apresentados mapas representativos da vazão média (ou disponibilidade hídrica potencial), da vazão mínima de referência Q_{95} e da disponibilidade hídrica relativa. Os mapas foram elaborados com base no banco de dados HydroCerrado (Althoff et al., 2021, 2022). Esse banco de dados disponibiliza séries de vazões simuladas para ottobacias de nível 5 para todo o Cerrado no período de 2003 a 2019. Ottobacias são áreas de contribuição dos trechos de uma rede hidrográfica codificadas pelo método hierárquico de Otto Pfafstetter (Furnans; Olivera, 2001). Apesar de algumas ottobacias serem interbacias, as vazões simuladas presentes no banco de dados HydroCerrado fornecem uma estimativa da disponibilidade hídrica gerada nessas unidades hidrográficas.

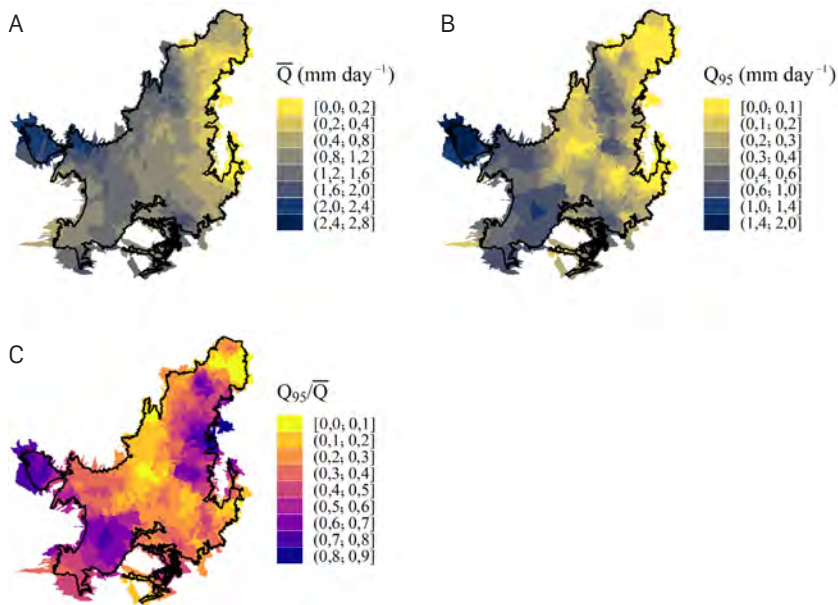


Figura 9.6. Vazão média (ou disponibilidade hídrica potencial) (A); vazão igualada ou superada 95% do tempo (B); e disponibilidade hídrica relativa (C).

A disponibilidade hídrica média e relativa é mais elevada para as regiões hidrográficas Amazônica e Paraguai, apresentando \bar{Q} médias de 1,94 mm dia⁻¹ e 1,47 mm dia⁻¹ e Q_{95}/\bar{Q} médias de 0,485 mm dia⁻¹ e 0,445 mm dia⁻¹, respectivamente.

As regiões hidrográficas do São Francisco e Parnaíba apresentam baixos valores de disponibilidade hídrica média, com \bar{Q} médias de 0,564 mm dia⁻¹ e 0,371 mm dia⁻¹, respectivamente. Contudo, essas regiões apresentam elevada disponibilidade hídrica relativa, com Q_{95}/\bar{Q} médias iguais a 0,386 e 0,385, respectivamente, o que pode indicar um melhor cenário para a gestão de recursos hídricos. Por outro lado, as regiões hidrográficas com menores médias de disponibilidade hídrica para outorga são as do Atlântico Leste e Atlântico Nordeste Oriental, apresentando Q_{95} médias de 0,057 mm dia⁻¹ e 0,036 mm dia⁻¹, respec-

tivamente, indicando atenção ao desenvolvimento de agricultura irrigada nesta região.

As regiões central e norte do Cerrado apresentam baixa disponibilidade hídrica relativa, o que indica que o uso sustentável de água pode melhorar através do armazenamento local desse recurso. Por exemplo, a ottobacia 73262 (Figura 9.6) apresenta Q_{95} de $0,06 \text{ mm dia}^{-1}$. Levando em consideração que 70% da Q_{95} é passível de outorga, observa-se uma disponibilidade de água para fins de irrigação de $0,044 \text{ mm dia}^{-1}$ ($0,50 \text{ L km}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Para essa ottobacia, a disponibilidade hídrica relativa (Q_{95}/\bar{Q}) é de apenas $0,28 \text{ mm dia}^{-1}$. De fato, há uma grande oportunidade para melhoria do armazenamento de água excedente no período de chuvas, a fim de aumentar a disponibilidade na estação seca.

Comparando seis regiões/ottobacias (Figura 9.7), nota-se uma maior disponibilidade hídrica para as ottobacias 44992 ($\bar{Q} = 2,15 \text{ mm dia}^{-1}$) e 64982 ($\bar{Q} = 1,28 \text{ mm dia}^{-1}$). Entre elas, observa-se uma maior disponibilidade hídrica relativa para a ottobacia 44992 ($Q_{95}/\bar{Q} = 0,71$), o que se deve a baixa sazonalidade das vazões. Essa região apresenta, portanto, elevada aptidão para agricultura irrigada. Por outro lado, a ottobacia 64982 apresenta baixa disponibilidade relativa ($Q_{95}/\bar{Q} = 0,21$), que pode ser melhorada por meio da instalação de pequenas barragens.

De forma geral, por meio da Q_{95} , pode-se avaliar a vazão outorgável média para cada uma das principais regiões hidrográficas do Cerrado (Figura 9.8). Por exemplo, a região hidrográfica Amazônica é a que apresenta maiores valores de Q_{95} para suas ottobacias, variando de $0,25$ a $1,77 \text{ mm dia}^{-1}$, com média de $0,95 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 9.8A). Analisando a Q_{95} ponderada pela área de drenagem de suas ottobacias, obtém-se uma Q_{95} igual a $1,10 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 9.8B). As regiões hidrográficas com as menores Q_{95} médias ponderadas pela área das ottobacias são Atlântico Leste ($0,06 \text{ mm dia}^{-1}$), Atlântico Nordeste Ocidental ($0,12 \text{ mm dia}^{-1}$) e Parnaíba ($0,18 \text{ mm dia}^{-1}$). Além da Amazônica ($1,10 \text{ mm dia}^{-1}$), as únicas outras regiões que estão acima da média do Cerrado ($0,41 \text{ mm dia}^{-1}$) são as do Paraguai ($0,65 \text{ mm dia}^{-1}$) e do Paraná ($0,51 \text{ mm dia}^{-1}$).

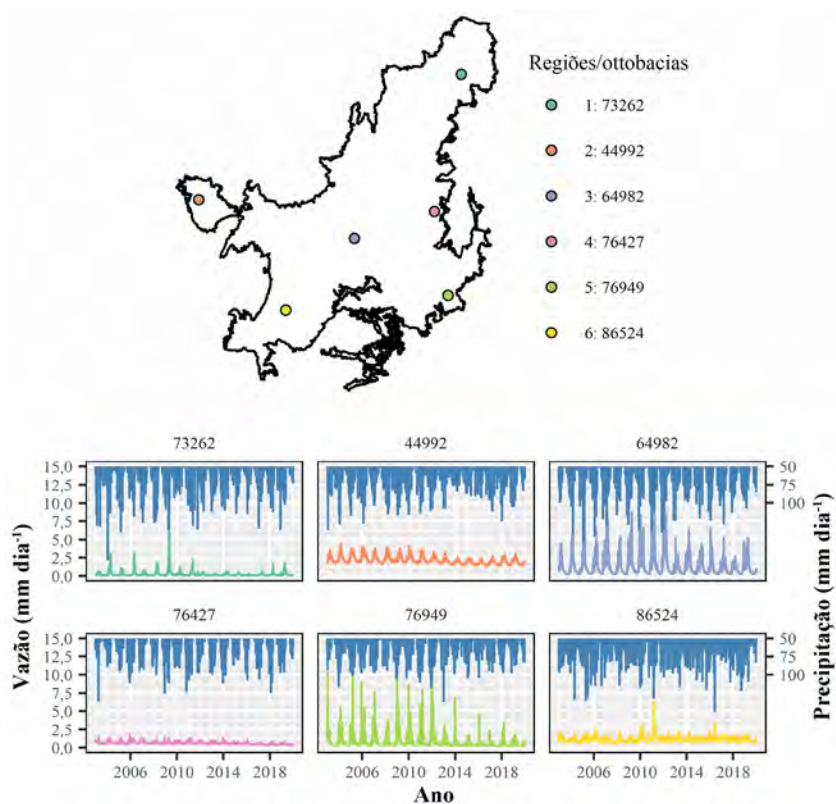


Figura 9.7. Séries de vazões simuladas para seis regiões distintas no Cerrado.

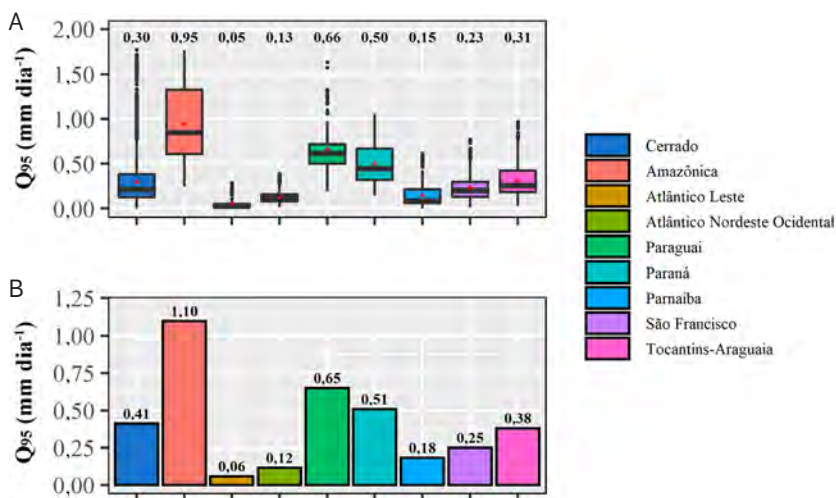


Figure 9.8. (A) Vazões igualadas ou superadas 95% do tempo (Q_{95}) para as otobacias dentro do Cerrado e suas principais regiões hidrográficas e (B) a Q_{95} média ponderada pela área de drenagem de cada otobacia. A média de cada boxplot é representado pelo triângulo vermelho e valor anotado.

Uma forma de aprimorar a gestão de recursos hídricos seria a adoção de vazões de referência baseadas no mês em questão (PRUSKI et al., 2014). Na Figura 9.9, apresenta-se, para o Cerrado, as vazões Q_{95} obtidas mensalmente para as otobacias de nível 5. Nesse caso, nota-se que os meses da estação chuvosa apresentaram uma Q_{95} distintamente mais elevada do que a Q_{95} calculada a partir de dados anuais.

A partir de vazões de referência mensais, pode-se, em alguns casos, aumentar a vazão outorgável em meses em que não há riscos relacionados à baixa disponibilidade hídrica ou até restringi-la em meses em que o risco é elevado. Na Figura 9.10, observa-se, por exemplo, regiões em que a disponibilidade hídrica mais que dobra ($> 100\%$) de dezembro a outubro ao se utilizar a Q_{95} mensal em relação a anual. Por outro lado, a Q_{95} mensal indica menor disponibilidade hídrica em relação à Q_{95} anual de agosto a novembro, indicando períodos em que o uso de água talvez tivesse que ser reduzido.

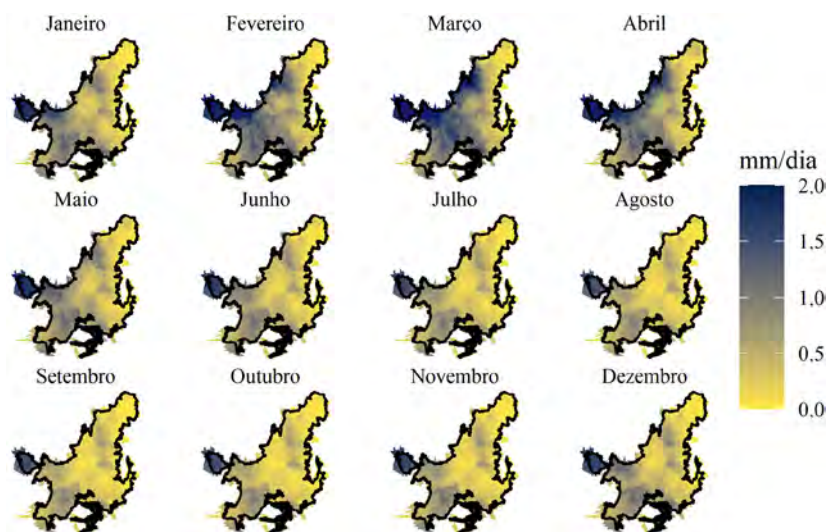


Figura 9.9. Vazão igualada ou superada 95% do tempo mensalmente para otto-bacias de nível 5.

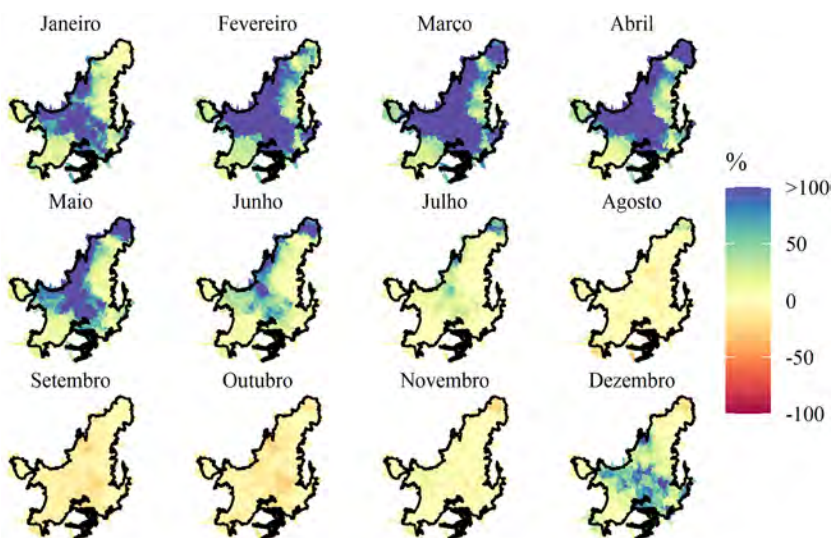


Figura 9.10. Diferença entre a Q_{95} mensal e a anual.

9.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma síntese do comportamento dos recursos hídricos e da disponibilidade hídrica no Cerrado. O Cerrado contribui para a formação das vazões de cursos d'água das principais regiões hidrográficas do País (Tocantins-Araguaia, Parnaíba, Paraguai, Atlântico Nordeste Ocidental, São Francisco, Paraná, Atlântico Leste e a Amazônica). Com 64,6%, a região hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a que apresenta a maior porcentagem de sua área como parte do Cerrado e a região hidrográfica do Parnaíba é a que apresenta a maior porcentagem de vazão originando em áreas de Cerrado (81,6%).

Assim, a região do Cerrado é crucial para a dinâmica de águas no território brasileiro, sendo essencial para o abastecimento de água para o semiárido e estratégico para a manutenção do equilíbrio hidrológico do País. Compreender o potencial hídrico dessa região é importante para o planejamento estratégico, o desenvolvimento econômico e o estabelecimento de políticas hídricas efetivas, que considerem as diferentes dimensões do uso e dos usuários de recursos hídricos.

9.7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Brasília, DF, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Subsídios para a discussão da compatibilização da geração de energia hidrelétrica com expansão da agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Portal de metadados geoespaciais**. Brasília, DF, 2020. E-book. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório Pleno / Agência Nacional de Águas. Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno setorial de recursos hídricos: agropecuária**. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/>

inserir-documentos-nos-artigos/pnrh/linha-do-tempo/2337-caderno-agropecuário/file. Acesso em: 5 abr. 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, n. 11, p. 176, 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Modelling & Software**, v. 149, 105615, 2022.

FURNANS, J.; OLIVERA, F. Watershed topology: the Pfafstetter system. In: ANNUAL ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE2001, 21., 2001, San Diego. **User Conference Proceedings**. Disponível em: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap1008/p1008.htm>. Acesso em: 22 dez. 2020.

HUFFMAN, G. J.; STOCKER, E. F.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; TAN, J. **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06. Greenbelt, MD**: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. Disponível em: 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06. Acesso em: 10 abr. 2020.

PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; SILVA, L. M. C. da; SILVA, J. M. A. da; REGO, F. S.; JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 496-509, 2014.

CAPÍTULO 10

Balanço Hídrico Climatológico e Impacto de Critérios de Outorga na Disponibilidade Hídrica Potencial para Irrigação no bioma Cerrado

Fernanda Laurinda Valadares Ferreira

Lineu Neiva Rodrigues



10.1 Introdução

Considerando que a água desempenha um papel essencial como elemento natural para sustentar a vida na Terra, torna-se necessário elaborar estratégias destinadas à gestão eficaz de seus recursos. Para atingir tal objetivo, é imprescindível conduzir pesquisas que aprofundem a compreensão do comportamento das diferentes variáveis hidrológicas que influenciam a dinâmica da água. Dentro desse contexto, a análise da vazão em corpos d'água se caracteriza como uma das variáveis de maior relevância, pois representa a capacidade de suporte de uma bacia hidrográfica (Uliana et al., 2015).

A disponibilidade hídrica superficial é a quantidade mínima de vazão de água estabelecida como padrão de referência para fins de gestão, representando a oferta de água a ser incorporada ao cálculo do balanço hídrico. O balanço hídrico, por sua vez, está associado à relação entre o fornecimento de água proveniente de fontes superficiais e a demanda por essa água nas diversas atividades humanas, desempenhando um papel crucial na orientação das ações de administração dos recursos hídricos (Agência Nacional de Águas, 2021).

Nos últimos anos, tem sido cada vez mais evidente o impacto das mudanças climáticas em várias regiões do mundo. As alterações no ciclo hidrológico podem afetar diretamente a quantidade, frequência e duração das precipitações, as taxas de evaporação, a temperatura, o escoamento e, por consequência, a disponibilidade de recursos hídricos. Essas mudanças têm levado a uma frequente ocorrência de eventos climáticos extremos (Rápalo et al., 2021; Santos et al., 2021). A análise dos ciclos de água e energia, por meio da estimativa do balanço hídrico, não apenas auxilia na compreensão da dinâmica das bacias hidrográficas diante dessas transformações (Moreira et al., 2019), mas também se revela uma ferramenta crucial para avaliar o potencial hídrico de uma determinada região (Agência Nacional de Águas, 2017). A compreensão do balanço hídrico, mesmo que de maneira simplificada,

desempenha um papel fundamental na redução dos processos de degradação e preservação dos recursos hídricos (Souza et al., 2017).

Na gestão dos recursos hídricos no Brasil, tem-se a outorga de uso da água como instrumento, conforme estabelecido na Lei Federal Nº 9.433 de 1997 (Brasil, 1997). A outorga para o direito de utilização dos recursos hídricos desempenha um papel fundamental na estrutura da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), visando assegurar tanto o controle qualitativo quanto o quantitativo dos diversos usos da água. Isso possibilita aos usuários o acesso ordenado a esse recurso, ao mesmo tempo em que regulariza e legitima o seu emprego dentro de uma bacia hidrográfica (Agência Nacional de Águas, 2011).

A outorga de concessão de uso da água se destaca como uma ferramenta de grande importância para o manejo dos cursos hídricos, sendo estabelecida através de um conjunto de métodos e procedimentos que têm como propósito auxiliar na definição das medidas necessárias para equilibrar a oferta e a demanda de água (Collares et al., 2022; Lemos; Magalhães Júnior, 2015). No caso das outorgas para a captação de águas superficiais a fio d'água em rios, córregos e ribeirões, onde a retirada ocorre diretamente do curso d'água, a base para essas decisões reside na análise da disponibilidade hídrica. Essa disponibilidade é avaliada tendo como referência as vazões naturais observadas nos mananciais ou, alternativamente, considerando intervenções hidráulicas como barragens (Agência Nacional de Águas, 2011).

No contexto brasileiro, o critério para concessão ou definição da vazão máxima outorgável se fundamenta em vazões mínimas de referência e na estipulação de limites percentuais para o uso dessas vazões, os quais caracterizam uma condição de garantia hídrica nos cursos d'água. A determinação das vazões de referência é estabelecida por meio de análises dos períodos mais críticos de estiagem (Finkler et al., 2015). As vazões mínimas de referência representam as vazões de elevada permanência no tempo, sendo as mais empregadas a Q95 e Q90 (vazões com permanência de 95% a 90% do tempo), obtidas por meio da análise da curva de permanência. Além disso, a Q7,10,

que corresponde à menor vazão média consecutiva de sete dias, associada a um intervalo de retorno de 10 anos, também é amplamente utilizada (Reilly; Kroll, 2003; Agência Nacional de Águas, 2011; Gomes; Fernandes, 2017; Oliveira et al., 2017; Ramos et al., 2021).

No Brasil, a vazão mínima de referência adotada nos cursos hídricos de domínio Federal pela Agência Nacional de Águas (ANA) está associada a uma garantia de 95%. Dessa forma, em segmentos de cursos d'água, ela corresponde à média diária da vazão com uma probabilidade de ocorrência de 95% (Agência Nacional de Águas, 2021).

A Constituição Federal brasileira de 1988 estabeleceu uma divisão do domínio das águas entre a União, os estados e o Distrito Federal (DF). No contexto dessa divisão, cabe aos estados e ao DF a jurisdição sobre as águas subterrâneas, rios estaduais e cursos d'água distritais. Uma complexidade que surge no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos diz respeito à utilização de critérios distintos de outorga por parte dos estados e da União (Gomes; Fernandes, 2017). Essa discrepância nos critérios adotados para definir as vazões mínimas de referência e as diferentes porcentagens dessas vazões para fins de outorga, em algumas situações, pode restringir o uso da água. Esse cenário pode impactar uma variedade de usos, como na irrigação, abastecimento urbano, geração de energia elétrica, atividades industriais, entre outros (Silva et al., 2015; Siqueira et al., 2021).

10.2 Disponibilidade hídrica potencial para irrigação no bioma Cerrado, mediante a aplicação de distintos critérios de outorga

Diante da importância do bioma Cerrado na dinâmica da água no país, é essencial entender como esses diferentes critérios de vazões mínimas de referência influenciam na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas e nas estratégias de expansão das atividades eco-

nômicas, como, por exemplo, da agricultura irrigada. Na Figura 10.1, estão representados os diferentes critérios de vazões mínimas de referência anuais e os limites percentuais para o uso dessas vazões que são adotados nos estados brasileiros que compõem o bioma Cerrado.

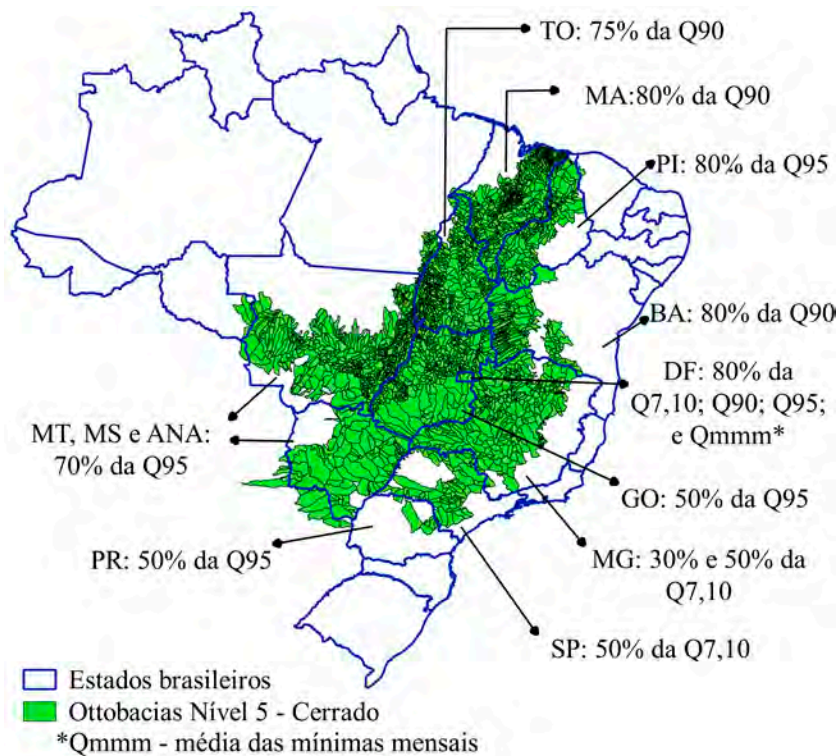


Figura 10.1. Subdivisão da região do bioma Cerrado em ottobacias nível 5 e as vazões mínimas de referência de cada um dos estados que compõem o bioma.

Segundo Castro et al. (2016), a entidade responsável pela gestão hídrica é responsável pela escolha tanto do critério de referência quanto do percentual permitido. Por meio desse processo de outorga, é determinada a quantidade de água que pode ser alocada e utilizada de um curso d'água para diversos fins, além de estabelecer a vazão que deve

ser preservada para a manutenção da saúde das comunidades aquáticas, conhecida como vazão remanescente.

Esses critérios são aplicados pelos órgãos competentes dos estados, DF e União para outorgar com base no critério anual. Além disso, outras modalidades de outorga, como a outorga sazonal, têm sido consideradas como uma alternativa para áreas com conflitos hídricos. É de suma importância analisar essa modalidade de outorga em diversas regiões, uma vez que as vazões variam espacial e temporalmente (Hannaford; Buys, 2012). A compreensão do potencial hídrico de uma bacia hidrográfica desempenha um papel crucial no planejamento estratégico para o desenvolvimento econômico de uma região (Rápalo et al., 2021).

Ferreira (2023) avaliou os efeitos da aplicação dos diferentes critérios de outorga (Figura 10.1), tanto anuais quanto sazonais, que são adotados no Brasil, sobre a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas do bioma Cerrado, bem como estimaram a área irrigável com base em cada um desses critérios de outorga avaliados. A avaliação foi realizada considerando-se a disponibilidade hídrica no Cerrado (Figura 10.2), a adoção, para todo o bioma da outorga anual e as seguintes vazões mínimas de referência: Q7,10; Q95 e Q90.

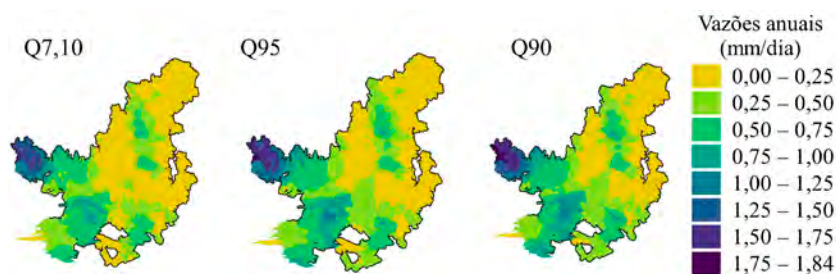


Figura 10.2. Vazões mínimas anuais de referência (Q7,10; Q95 e Q90).

Fonte: Adaptado de Ferreira (2023).

De forma geral, o critério Q7,10 é o mais restritivo (Figura 10.2). A quantidade potencial de água disponível para outorga é reduzida, indicando que a área para aumento da prática de irrigação é menor

em comparação a regiões que adotam outros critérios. Em média, no Cerrado (Figura 10.2), o valor da Q90 é maior em 8% em relação à Q95 e apresenta um aumento de 22% em comparação com a Q7,10. Um bom exemplo é a ottobacia 76869, localizada no município de Paracatu e inserida na bacia hidrográfica do Rio Paracatu, um dos principais afluentes do Rio São Francisco. Nessa ottobacia, a disponibilidade hídrica potencial para outorga, de acordo com o critério de Q7,10, é de $0,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, equivalente a 77.760 m^3 por dia. Se fosse adotado o critério Q90 para essa mesma ottobacia, o potencial de outorga aumentaria para 36.860 m^3 por dia, representando um acréscimo significativo em 47% na disponibilidade hídrica.

Independentemente da vazão mínima de referência utilizada (Q7,10; Q95; ou Q90), as regiões com maior potencial de disponibilidade hídrica estão situadas no Oeste e Sul do Cerrado (conforme indicado na Figura 10.2). Essas regiões incluem, por exemplo, os municípios de Campos de Júlio, no Mato Grosso; e Paranhos, no Mato Grosso do Sul. Por outro lado, as áreas com menor disponibilidade estão localizadas no Leste, como no município de Igaporã, na Bahia; e ao norte, como o município de Matões do Norte, no Maranhão.

A discrepância na disponibilidade hídrica potencial nas diversas regiões do bioma Cerrado pode ser atribuída à considerável variação espacial da precipitação nesse bioma. Em média, a precipitação média anual varia de 700 mm a 2.063 mm (média de 1.471 mm), aumentando de Leste para Oeste e do Norte ao Sul (Ferreira et al., 2023).

As regiões que adotam a Q7,10 mensal como critério de referência também apresentam uma disponibilidade hídrica potencial menor em suas ottobacias, quando comparadas com outras vazões de referência mensais para o mesmo período. Por exemplo, na ottobacia 69667, que abrange uma área de 14.433 ha e está situada no município de Caiapônia, GO, durante o mês de janeiro, a disponibilidade hídrica potencial média, segundo a Q7,10 mensal, é de $1,44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto a Q95 é de $1,54 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a Q90 é de $1,72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. As maiores disponibilidades

hídricas potenciais para outorga, independentemente da vazão de referência, concentram-se na mesma região dos critérios mensais.

A maior disponibilidade hídrica potencial mensal ocorre durante os meses do período chuvoso, principalmente em fevereiro e março, enquanto os meses de setembro e outubro apresentaram as menores disponibilidades hídricas potenciais. Embora outubro seja, em geral, o mês que marca o início da estação chuvosa no Cerrado (Klink, 2014; Rodrigues et al., 2012), ainda não ocorrem mudanças significativas na vazão nesse período. Isso se deve ao fato de que as chuvas que acontecem durante esse mês, antes de contribuírem para o aumento das vazões, são inicialmente direcionadas para a recuperação do déficit hídrico do solo (Assani et al., 2011; Cambraia Neto; Rodrigues, 2021). Dessa forma, com o intuito de saber a diferença relativa da disponibilidade hídrica das ottobacias considerando a adoção das vazões mínimas de referência nas bases mensal e anual, utilizou-se a Equação 1, de acordo com a metodologia proposta por Silva et al. (2015) e Serrano et al. (2020).

$$D_p = \frac{Q_{mensal} - Q_{anual}}{Q_{anual}} \times 100 \quad (1)$$

em que

D_p = diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica (%).

Q_{mensal} = vazão estimada em base mensal ($m^3 s^{-1}$).

Q_{anual} = vazão estimada em base anual ($m^3 s^{-1}$).

Sendo assim, a diferença relativa percentual entre as disponibilidades hídricas mensais e anuais considerando os valores de Q7,10, Q95 e Q90 para os meses de março (maior disponibilidade) e outubro (menor disponibilidade) estão representadas na Figura 10.3.

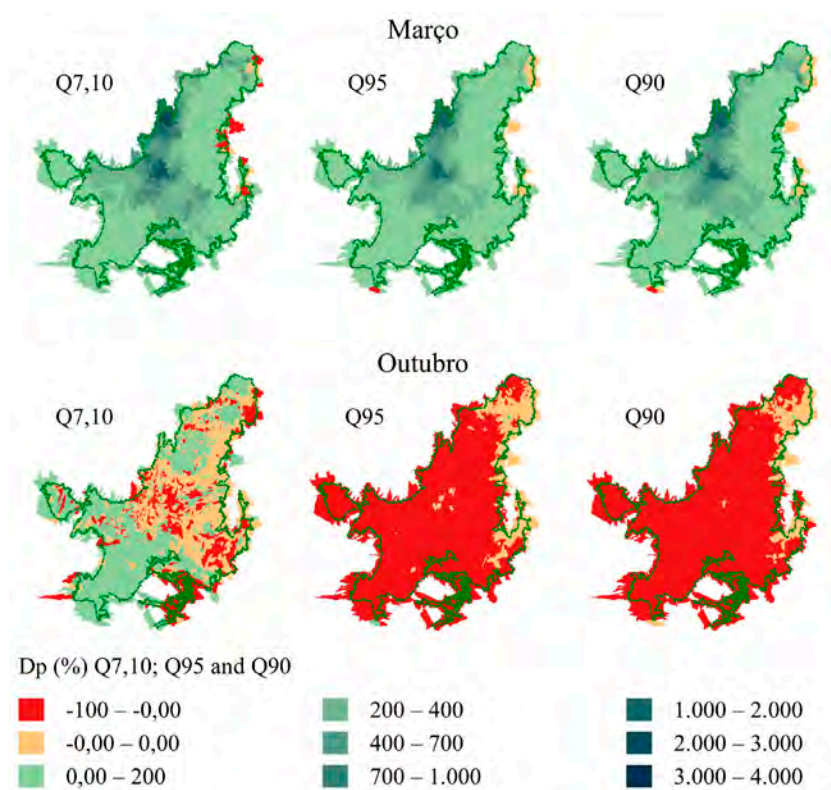


Figura 10.3. Diferença relativa percentual (Dp) entre a disponibilidade hídrica potencial das vazões mensais em relação à vazão anual de Q7,10; Q95 e Q90 nos meses de março e outubro.

Fonte: Adaptado de Ferreira (2023).

Considerando a adoção de um único critério para as outorgas no Cerrado, para cada uma das vazões mínimas de referência (Q7,10; Q95 ou Q90), observa-se um aumento geral na disponibilidade hídrica potencial ao utilizar a vazão de referência em base mensal. Ao comparar os dados das vazões mínimas de referência anuais com as mensais, é evidente que durante os meses que compreendem a estação chuvosa (março), a diferença percentual relativa na disponibilidade hídrica potencial é predominantemente positiva em grande parte da área. Isso

significa que a disponibilidade hídrica potencial anual é menor do que a mensal, especialmente nas regiões Oeste, Sul e na porção Central do bioma Cerrado, independentemente do critério utilizado.

Como exemplo, no mês de março, considerando a Q7,10 como referência (Figura 10.3), constata-se que, em 98,6% da extensão do Cerrado, abrangendo 4.468 ottobacias, a disponibilidade hídrica potencial mensal é maior, ou seja, há uma diferença positiva. Esse padrão também se repete para a Q95 (Figura 10.3), com 98,8% da área (abrangendo 4.478 ottobacias), e para a Q90 (Figura 10.3), englobando 99,3% da área (4.497 ottobacias). Além disso, em certas ottobacias, a diferença positiva na disponibilidade hídrica potencial chega a atingir até 4.000%, especialmente em áreas caracterizadas por elevada sazonalidade. Esses resultados ressaltam que os critérios baseados em vazões mínimas de referência anuais, de maneira geral, restringem o aproveitamento da água nos meses de maior potencial hídrico na região do Cerrado.

Ao adotar a Q7,10 em todo o território do Cerrado, ocorreram situações em que a diferença percentual relativa na disponibilidade hídrica potencial foi negativa (conforme representado na Figura 10.3). Isso indica que a vazão mínima de referência anual seria superior à vazão mínima de referência mensal, especialmente durante a estação seca. No contexto da disponibilidade hídrica, essa observação sugere que o critério mensal nem sempre contribui para um aumento efetivo da disponibilidade hídrica potencial. Como exemplo, consideremos o mês de outubro, no qual 17,8% da área (abrangendo 806 ottobacias) apresentou uma diferença de disponibilidade hídrica negativa. Nesse caso, o fato de ser mais restritivo no período de estiagem possui vantagens, uma vez que se evita outorgas de vazões que excedam a disponibilidade real de água, prevenindo possíveis conflitos pelo uso desse recurso.

Esse fato ocorre de maneira mais acentuada nas vazões de referência Q95 e Q90, conforme ilustrado na Figura 10.3, onde a grande maioria das ottobacias do Cerrado apresenta uma diferença percentual relativa negativa na disponibilidade hídrica potencial, especialmente

nos meses de estiagem, como agosto, setembro e outubro. O mês mais crítico, por exemplo, que é outubro, exibe essa característica em 82,1% da área total (abrangendo 3.720 ottobacias) para a Q95, e em 86,9% da área (abrangendo 3.935 ottobacias) para a Q90.

A estimativa das vazões mínimas de referência anuais deriva de uma análise da disponibilidade hídrica nos períodos mais críticos de estiagem (Finkler et al., 2015). No entanto, é evidente a necessidade de compreender e considerar tanto a sazonalidade dessas vazões como também as particularidades das condições regionais em que as bacias estão situadas. No contexto de otimizar a disponibilidade hídrica potencial, nota-se que mesmo o critério mais rigoroso pode, em certas circunstâncias, ser mais vantajoso durante os períodos de maior disponibilidade hídrica.

Dessa forma, na Figura 10.4, está representada a disponibilidade hídrica potencial cumulativa das ottobacias, ou seja, considerando a área total do Cerrado, com base nas Q7,10; Q95 e Q90, mensais (M) e anuais (A).

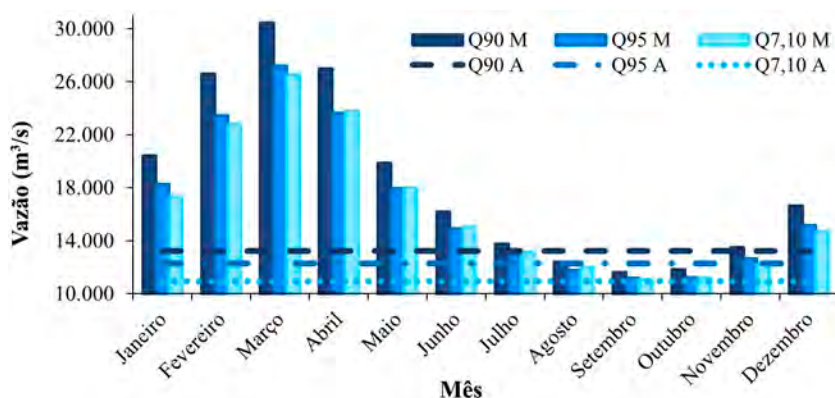


Figura 10.4. Disponibilidade hídrica potencial total do Cerrado calculada com base nas vazões de referência anuais (Q7,10A; Q95A e Q90A) e mensais (Q7,10M; Q95M e Q90M).

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2023).

O gráfico representado na Figura 10.4 mostra que a disponibilidade hídrica potencial anual é mais elevada ao adotar a Q90, seguida pela Q95 e pela Q7,10, com valores de $13.234 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $12.289 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $10.954 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. No contexto das vazões de referência mensal, essa mesma hierarquia é mantida, exceto nos meses de abril a agosto, quando a Q7,10 supera a Q95.

Ao contrastar os critérios anuais e mensais em termos de permissividade e restrição, a Q7,10 demonstra ser a mais limitante em geral. Contudo, nos meses de setembro e outubro, a diferença na disponibilidade hídrica potencial entre Q7,10M, Q7,10A e Q95M não é expressiva. Durante os períodos de chuva, de forma geral, os critérios mensais proporcionam uma disponibilidade hídrica potencial superior em comparação com os critérios anuais. Entre julho e novembro, essa tendência se aplica apenas à Q7,10.

Para os meses abrangendo o período de maior disponibilidade hídrica potencial, exemplificado pelo mês de março, a comparação com os critérios anuais revela um aumento de 143% na Q7,10; 130% na Q90; e 121% na Q95, traduzindo-se em um incremento de $15.609 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $17.211 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $14.892,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Dessa forma, para estimar o potencial de aumento da área de irrigação em função da quantidade de água disponível (Figura 10.4), utilizou-se a Equação 2.

$$A_i = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (2)$$

em que

A_i = área irrigável (ha).

Q_o = Vazão máxima outorgável em base anual ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Q_i = Vazão requerida pela irrigação ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$).

Para estimar o potencial de desenvolvimento da agricultura irrigada no bioma Cerrado, foi calculada a quantidade de área em hectares que poderia ser irrigada adicionalmente considerando o uso de água de irrigação por hectare igual a $1,4 \text{ L s}^{-1}$ ($0,0014 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010). Assumiu-se que a disponibilidade hídrica para a outorga era destinada apenas para irrigação.

Na Figura 10.5, é apresentado o potencial de área irrigável no Cerrado, calculado a partir da consideração da disponibilidade hídrica potencial total e conforme os diferentes critérios de outorga mensais (M) e anuais (A).

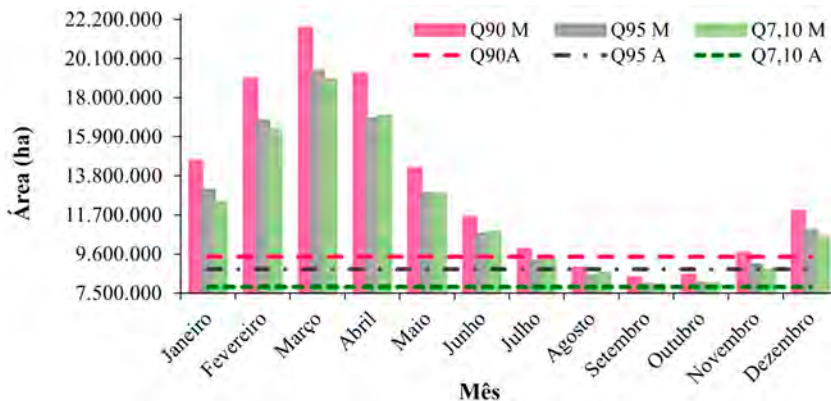


Figura 10.5. Potencial de área irrigável no Cerrado, calculada com base na disponibilidade hídrica potencial total considerando as Q7,10A; Q95A e Q90A anuais e nas Q7,10M; Q95M e Q90M mensais.

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2023).

Os diferentes critérios de outorga podem ser fatores de permissão ou restrição no uso dos recursos hídricos. Ao adotar a Q7,10 anual como referência, por exemplo, a área irrigável totalizaria aproximadamente 7.824.252 ha durante todos os meses do ano. Por sua vez, as áreas passíveis de irrigação ao utilizar as vazões Q95 e Q90 anuais seriam de 8.777.566 ha e 9.452.948 ha, respectivamente. A Q7,10 anual é o critério mais restritivo; entretanto, nos períodos de estiagem, sua

aplicação se alinha melhor com os padrões de vazão do momento. Tomando setembro, mês de estiagem, como exemplo, o potencial de irrigação seria de 7.917.945 ha para Q7,10; 7.980.197 ha para Q95; e 8.294.590 ha para Q90.

Quando analisamos as vazões outorgáveis mensais, considerando o mês de março, período de maior disponibilidade, o potencial de irrigação se expande para cerca de 18.973.273 ha com a Q7,10; 19.141.877 ha com a Q95; e 21.746.687 ha com a Q90. Isso corresponde a um aumento de 142%, 121% e 130%, respectivamente, quando comparado ao potencial anual. Esse aumento pode desempenhar um papel significativo no avanço da agricultura irrigada na região do Cerrado.

Durante os meses de estiagem, quando o fluxo de água diminui, os valores a serem concedidos por outorgas devem considerar tanto a disponibilidade nos cursos d'água para os usuários quanto a vazão restante necessária para preservar o meio ambiente, mesmo que haja uma demanda maior por água devido aos cultivos irrigados. Nesse contexto, onde a exigência hídrica dos cultivos irrigados é mais intensa, é essencial explorar alternativas que se ajustem às características específicas da bacia hidrográfica e ao tipo de cultura. Algumas possíveis estratégias incluem a adoção de práticas de irrigação deficitária ou a construção de barragens. Por meio dessa última abordagem, a água acumulada durante os períodos de maior excedente hídrico pode ser armazenada e disponibilizada durante as fases de maior necessidade hídrica.

A adoção de critérios que se baseiam em vazões mensais como parâmetros de referência para definir critérios de outorga, em vez de considerar valores anuais, oferece um potencial considerável para ampliar a quantidade de água passível de ser concedida por outorga durante os períodos de maior disponibilidade hídrica. Ao mesmo tempo, essa abordagem impõe uma restrição mais realista durante os momentos críticos de escassez hídrica, sem aumentar o risco de deficiência de recursos hídricos ou causar prejuízos ao meio ambiente.

10.3 Variabilidade do balanço hídrico climatológico em bacias hidrográficas do Cerrado

O balanço hídrico climatológico (BHC) é outra forma importante de avaliação da dinâmica hídrica. Para uma gestão integrada dos recursos hídricos no Cerrado, Ferreira et al. (2023) calcularam o déficit e o excesso hídrico mensal provável das ottobacias (Nível 5 – Figura 10.1), além de realizarem uma análise de tendência dos dados mensais de BHC e de suas variáveis de entrada, como precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo) na região de estudo.

Na Figura 10.6, é mostrada a variação mensal do BHC nas ottobacias do Cerrado. Durante a estação chuvosa, a análise revela que, em outubro, apenas 0,6% das ottobacias apresentam valores positivos no BHC. Essa proporção aumenta para 47% em novembro, 53% em dezembro, 56% em janeiro, 79% em fevereiro, 76% em março e 26% em abril. Mesmo durante os meses chuvosos, é possível observar áreas com déficit hídrico em algumas regiões do Cerrado.

O BHC positivo indica que nessas áreas há excedente hídrico no período analisado. Em outubro, que marca o início da estação chuvosa no Cerrado, apenas 29 ottobacias apresentaram BHC positivo, ou seja, essas áreas possuem maior P em relação à ETo. Essas ottobacias estão localizadas ao Oeste e Noroeste do Cerrado, região de transição com o bioma Amazônia, caracterizado por um clima tropical com maiores taxas de precipitação (Althoff et al., 2021).

Durante o período da estação seca, de maio a setembro, a maior parte do Cerrado apresentou BHC negativo. Os meses de maio e junho foram os únicos meses em que algumas poucas ottobacias registraram BHC positivo, sendo 2,9% e 0,02%. Nos outros meses, entre julho e setembro, todas as ottobacias do bioma apresentaram BHC negativo.

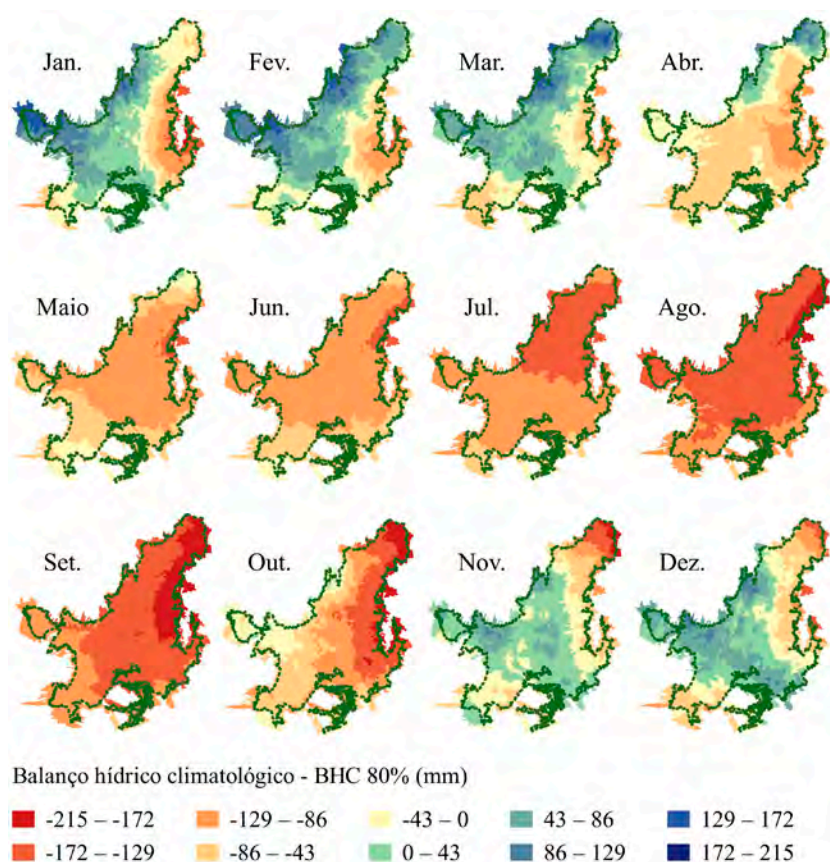


Figura 10.6. Balanço hídrico climatológico (BHC) mensal das otobacias do Cerrado, estimados com base na frequência igual ou superior a 80% de permanência no tempo, do período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019.

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2023).

Os resultados evidenciam um déficit hídrico em algumas otobacias, principalmente durante o período que se estende de abril a outubro.

A avaliação da tendência do BHC e de suas variáveis de entrada revelou que, na maioria dos meses, houve uma tendência de redução

do BHC, indicando um aumento do déficit hídrico ao longo do tempo. Quanto à precipitação total mensal (P), também foi observada uma tendência significativa de redução em algumas ottobacias na maioria dos meses. Por outro lado, a evapotranspiração de referência (ET_o) mensal total mostrou uma tendência significativa de aumento na maioria dos meses.

Para compreender melhor essas tendências, foram selecionados os meses de janeiro e julho para análise, por englobarem uma área mais abrangente de ottobacias com tendências significativas na região de estudo. Os resultados são apresentados na Figura 10.7.

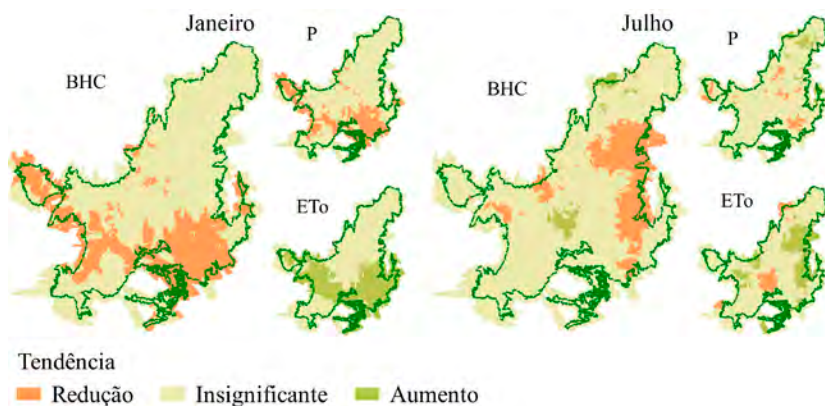


Figura 10.7. Tendência do balanço hídrico climatológico (BHC) e das variáveis precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_o) nos meses de janeiro e julho para as ottobacias do Cerrado.

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2023).

No mês de janeiro, 15% das ottobacias do Cerrado apresentaram tendências significativas de redução no BHC. As regiões com declínios notáveis no BHC coincidem com as áreas que exibiram tendências significativas de redução nas precipitações, abrangendo 13% das ottobacias, e aumento na evapotranspiração de referência, afetando 26% das ottobacias. É provável que a diminuição observada no BHC durante o mês de janeiro seja atribuída à interação entre a diminuição das preci-

pições, indicada pela tendência de redução, e o aumento da evapotranspiração, apontado pela tendência de aumento, resultando em um decréscimo no BHC.

Para o mês de julho, foram também identificadas (Figura 10.7) tendências significativas no BHC em 16% das ottobacias do Cerrado. Desse total, 13% apresentaram uma tendência de redução, enquanto 4% registraram uma tendência de aumento. No que diz respeito às precipitações, tendências foram observadas em 10% das ottobacias, com 4% exibindo uma tendência de redução e 6% apresentando uma tendência de aumento. Em relação à evapotranspiração, foi constatada uma tendência em 22% das ottobacias, das quais 7% demonstraram um declínio na tendência e 15% exibiram uma tendência de aumento.

Assim como nos meses de janeiro e julho foram observadas tendências no BHC e nas variáveis precipitação e evapotranspiração, nos outros meses também foi identificada essa tendência de mudança. Possivelmente essas dinâmicas de tendências identificadas no BHC estejam correlacionadas com as tendências das variáveis que compõem o próprio BHC.

As mudanças climáticas na região do Cerrado são evidentes. As tendências observadas nas variáveis climáticas, com aumento da evapotranspiração e redução das precipitações em algumas das ottobacias, poderão resultar em alterações no regime hidrológico e, consequentemente, na disponibilidade hídrica e nos processos de alocação de água (Ferreira et al., 2021). As ottobacias que apresentaram BHC negativo, ou seja, com déficit hídrico, são as regiões com maior risco de comprometimento da disponibilidade hídrica e de não ter água suficiente para atender às demandas.

Analisando na perspectiva futura, as pesquisas de Jesus et al. (2017) revelaram um agravamento desse déficit hídrico durante as estações secas. Além disso, Assad et al. (2020) sinalizaram um provável aumento dos déficits hídricos no bioma ao longo do século atual, um cenário que pode impor restrições aos diversos usos da água e intensificar os conflitos em torno de sua utilização. Para garantir a contí-

nua expansão e sustentabilidade da produtividade agrícola, torna-se imprescindível buscar soluções de adaptação mais eficazes. Isso envolve o desenvolvimento de variedades de culturas mais resilientes, aprimoramentos no manejo de pastagens e sistemas de irrigação, bem como a integração de abordagens de gestão do solo e da água. A intensificação sustentável da irrigação emerge como uma ferramenta crucial para fomentar o progresso agrícola, especialmente durante os períodos em que as precipitações não atendem às demandas da evapotranspiração.

10.4 Considerações finais

A análise da dinâmica hídrica das bacias hidrográficas por meio da outorga de uso da água revela a importância e a complexidade de compreender os critérios que regem as vazões mínimas de referência ao longo do tempo. Esses critérios exercem um impacto direto e significativo sobre a disponibilidade hídrica das regiões, moldando estratégias de desenvolvimento econômico, notadamente na agricultura irrigada. As variações sazonais das vazões mínimas ressaltam a necessidade urgente de adoção de outorgas que levem em conta essas flutuações, garantindo uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos ao longo do ano. A disparidade nos critérios adotados pelos estados que compõem o Cerrado alerta para potenciais distorções no desenvolvimento regional, apontando a necessidade de uma padronização que promova equidade e eficiência na gestão dos recursos. Além disso, a análise em conjunto do balanço hídrico sazonal emerge como uma ferramenta fundamental para compreender e adaptar-se às mudanças climáticas, influenciando diretamente as condições hidrológicas e o desenvolvimento socioeconômico das regiões afetadas.

10.5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília, DF, 2017. 169 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Disponibilidade hídrica superficial**. 2021. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7ac42372-3605-44a4-bae4-4dee7af1a2f8>. Acesso em: 16 ago. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, DF: SAG, 2011. 50 p. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, 6).

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, N. L.; SILVA, D. D. da. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, p. 176, 2021.

ASSAD, E. D.; VICTORIA, D. de C.; CUADRA, S. V.; PUGLIERO, V. S.; ZANETTI, M. R. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado**: análises e projeções. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 7, p. 213-228.

ASSANI, A. A.; CHALIFOUR, A.; LÉGARÉ, G.; MANOUANE, C. S.; LEROUX, D. Temporal regionalization of 7-day low flows in the St. Lawrence watershed in Quebec (Canada). **Water Resources Management**, v. 25, p. 3559-3574, 2011.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 jan. 1997, col. 1, p. 470. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 16 ago. 2023.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N. Impact of land use and occupation on potential groundwater recharge in a Brazilian savannah watershed. **Water International**, v. 46, n. 3, p. 348-364, 2021.

CASTRO, E. R. R. S.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. Environmental flow in the river Ondas basin in Bahia, Brazilian Cerrado. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, p. 1-10, 2016.

COLLARES, E. G.; ARAUJO, E.; SILVA, B. C. B.; GONÇALVES, G. G.; NASCIMENTO, A. C. Análise comparativa entre vazão medida e vazão regionalizada em três pares de bacias hidrográficas morfometricamente semelhantes do estado de Minas Gerais. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 3, E022007, 2022.

FERREIRA, F. L. V. Disponibilidade hídrica e aptidão da agricultura de sequeiro e irrigada no Cerrado. 2023, 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.782>

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; AMORIM, R. S. S. Spatial–temporal variability of climatic water balance in the Brazilian Savannah region river basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, 2023.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Influence of changes in land use and land cover and rainfall on the streamflow regime of a watershed located in the transitioning region of the Brazilian Biomes Atlantic Forest and Cerrado. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 1-17, 2021.

FINKLER, N. R.; MENDES, L. A.; SCHEIDER, E. H. M.; BORTOLIN, T. A.; SCHEIDER, V. E. Comparação de funções de distribuição de probabilidades na determinação de vazão mínima anual e sazonal. **Scientia Cum Industria**, v. 3, n. 2, p. 42-49, 2015.

GOMES, R. R. K. de A.; FERNANDES, L. L. Hydrological characterization of the Araguaia river through reference flows. **Applied Water Science**, v. 7, p. 4605-4614, 2017.

HANNAFORD, J.; BUYS, G. Trends in seasonal river flow regimes in the UK. **Journal of Hydrology**, v. 475, p. 158-174, 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (Minas Gerais). **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídrico no estado de Minas Gerais**. 2010, 105 p. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/outorga/manual/manual-de-outorga.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

JESUS, T. C. L.; SENNA, M. C. A.; CATALDI, M.; PAIVA, C. M.; FRANZ, B. Impacto do aumento da concentração atmosférica de CO₂ no balanço hídrico climatológico do Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 1-14, 2017.

KLINK, C. A. Policy intervention in the Cerrado savannas of Brazil: changes in land use and effects on conservation. In: CONSORTE-MCCREA, A.; SANTOS, E. F. (ed.). **Ecology and conservation of the maned wolf**: multidisciplinary perspectives. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 293-308.

LEMOES, R. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Reflexões sobre os critérios de cálculo de vazões outorgáveis em áreas de conflito do estado de Minas Gerais: o caso da Bacia do Ribeirão Ribeiro Bonito. **Revista Espinhaço**, v. 4, n. 2, p. 4-12, 2015.

MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; SOUZA, V. A.; ROCHA, H. R.; DE PAIVA, R. C. D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 131-147, 2019.

OLIVEIRA, K. P. D.; MATOS, T. S.; SOUSA JÚNIOR, M. F. D.; ULIANA, E. M. Vazões mínimas de referência Q95, Q90 e Q7,10 para a bacia do rio Jequitinhonha, Minas Gerais. In: JORNADA ACADÊMICA DA ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL, 5., 2017. Sinop. **[Anais...]**. Sinop, MT: Universidade Federal de Mato Grosso, 2017.

RAMOS, M. C. A.; PRUSKI, F. F.; GENEROSO, T. N.; PINTO, E. J. A. Methodology for optimizing water use in shared management schemes under conflict conditions. **Water Resources Management**, v. 35, p. 3161-3177, 2021.

RÁPALO, L. M. C.; ULIANA, E. M.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D.; RIBEIRO, C. B. M.; CRUZ, I. F.; PEREIRA, D. R. Effects of land-use and-cover changes on streamflow regime in the Brazilian Savannah. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, 100934, 2021.

REILLY, C. F.; KROLL, C. N. Estimation of 7-day, 10-year low-streamflow statistics using baseflow correlation. **Water Resources Research**, v. 39, n. 9, 2003.

RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; STEENHUIS, T. S.; PASSO, D. P. Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah Region. **Water Resources Management**, v. 26, p. 873-882, 2012.

SANTOS, E. F. N.; BARRETO, I. D. de C.; BARBOSA, E. A. S.; CAMPOS, L.; SILVA, A. S. A. da. Contribuição de técnicas multivariadas a índices de seca na compreensão das otto-regiões da bacia do São Francisco. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e7210313118, 2021.

SERRANO, L. D. O.; RIBEIRO, R. B.; BORGES, A. C.; PRUSKI, F. F. Low-flow seasonality and effects on water availability throughout the river network. **Water Resources Management**, v. 34, p. 1289-1304, 2020.

SILVA, B. M. B.; SILVA, D. D. da; MOREIRA, M. C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 623-634, 2015.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A. A.; RODRIGUES, D. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, 100931, 2021.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.; GURSKI, B. C.; SCHAFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 284-298, 2017.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D. da; ULIANA, E. M.; RODRIGUES, B. S.; CORRÊDO, L. de P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Ambiente & Água**, v. 10, p. 82-88, 2015.

CAPÍTULO 11

Massas de Água no Cerrado

Níckolas Castro Santana

Lineu Neiva Rodrigues



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 2 e 3); Wardsson L. Borges (da esquerda para a direita - 4); Daniel Medeiros (primeiro plano).



11.1 Introdução

As massas de água existentes no Cerrado, como lagos, lagoas, açudes, represas, reservatórios e trechos de rios são reservas hídricas importantes para o desenvolvimento dessa região. Reservatórios artificiais e barragens são intervenções hídricas que visam a acumulação de volume de água para diferentes fins e usos.

O Brasil possui 240.899 massas de água, incluindo lagos, lagoas, barragens e segmentos de rios, das quais 27,6% são de origem natural e 72,4% são artificiais (Agência Nacional de Águas, 2020). Os usos principais são para irrigação, hidroeletricidade, abastecimento humano e contenção de rejeitos de mineração. Os maiores volumes de água estão armazenados nos reservatórios para geração de energia hidrelétrica, onde três bacias hidrográficas, todas com nascentes no Cerrado, respondem por mais de 87% do volume total: Bacia do Paraná, Tocantins-Araguaia e São Francisco (Agência Nacional de Águas, 2020; Rodrigues; Althoff, 2021).

No caso específico da agricultura irrigada, as pequenas barragens são as mais relevantes, uma vez que se constituem em infraestruturas estratégicas para o desenvolvimento do setor. Elas armazenam o excesso de água durante a estação chuvosa para suprir a deficiência hídrica durante a seca, quando a demanda é geralmente maior que a oferta. Em regiões onde a disponibilidade hídrica é muito variável durante o ano, as pequenas barragens são estruturas essenciais para viabilizar a prática da irrigação e, conseqüentemente, manter a qualidade de vida das pessoas no meio rural (Rodrigues; Althoff, 2021).

11.2 Mapeamento das massas de água no Cerrado

O mapeamento das massas de água existentes no Cerrado é estratégico para o gerenciamento de recursos hídricos dessa região e para o desenvolvimento de estratégias de segurança hídrica e alimentar para

o Brasil. Para caracterizar a distribuição espaço-temporal de massas de água no Cerrado (pequenos e grandes reservatórios naturais e antrópicos, incluindo água em áreas de mineração), foram utilizados dados do Projeto MapBiomas dos anos de 1985 e 2021 (MapBiomas, 2022a).

O projeto MapBiomas é uma iniciativa multi-institucional que envolve universidades federais públicas, empresas privadas e organismos não-governamentais para a produção de diversos mapas temáticos como mapas anuais de uso e cobertura de terras do Brasil, cicatrizes de queimadas, desmatamentos para fins de fiscalização e dinâmica da água superficial. Os dados básicos desse projeto são as séries históricas de imagens do satélite Landsat, as quais são processadas em nuvem na plataforma da Google Earth Engine e complementadas com outras imagens de alta resolução espacial e temporal, notadamente as imagens do satélite PlanetScope, com resolução espacial de 3 m e periodicidade diária.

Em relação aos seis biomas brasileiros, o Cerrado ocupa o quarto lugar em termos de extensão total de água superficial, com um total de 1.356.738 ha, atrás dos biomas Amazônia (10.229.270 ha), Mata Atlântica (2.043.318 ha) e Pampa (1.787.571 ha) (Figura 11.1). No Cerrado, destacam-se os grandes reservatórios para geração de energia hidrelétrica instalados nas bacias do Rio Tocantins, Rio Paranaíba e Rio Grande. Apesar dessa relativamente modesta contribuição do Cerrado no cenário nacional, é importante ressaltar que o Cerrado desempenha um importante papel no processo de distribuição de recursos hídricos para outros biomas devido à sua localização em regiões de altitudes elevadas.

Analisando a Figura 11.2, observa-se uma tendência de aumento expressivo na área ocupada por águas superficiais no bioma Cerrado no período 1985–1991, porém, com uma tendência de redução gradativa e consistente a partir de 2009. No período 1985–2021, houve uma perda de quase 1,5 milhão de hectares de água superficial no bioma Cerrado. A figura mostra alguns picos de aumento significativo na área ocupada

por águas superficiais no Cerrado, principalmente durante a década de 1990, o que pode ser explicado pelo enchimento de reservatórios destinados à geração de energia hidrelétrica. Por exemplo, o aumento expressivo verificado em 1999 coincide com o enchimento do reservatório de Serra da Mesa no norte do estado de Goiás, iniciado em 1997.

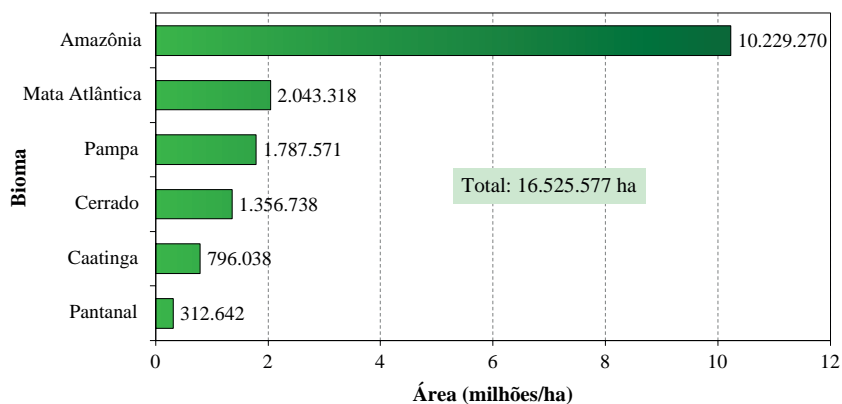


Figura 11.1. Área ocupada por águas superficiais nos diferentes biomas brasileiros em 2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022a).

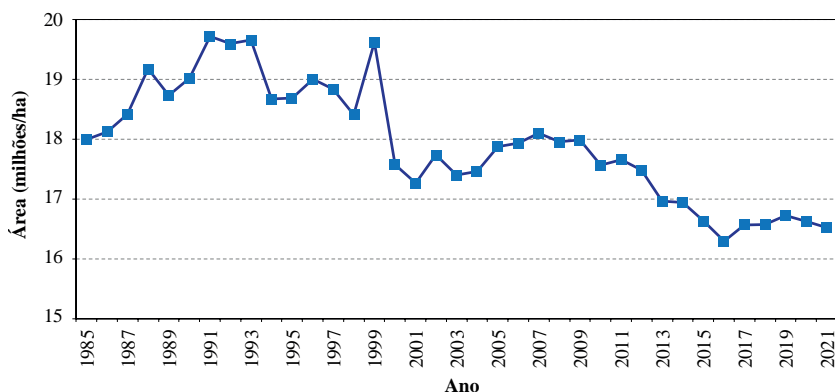


Figura 11.2. Variação temporal da área ocupada por águas superficiais no bioma Cerrado para o período 1985–2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022a).

O balanço de perda e ganho de água superficial no bioma Cerrado no período 1985–2021 é negativo (–68.293 ha) (Figura 11.3), indicando que há um número acentuado de rios e lagos que eram perenes em 1985 e acabaram secando em 2021. Conforme ressaltado anteriormente, os ganhos estão relacionados principalmente com a construção de reservatórios para geração de energia hidrelétrica, armazenamento de rejeitos de mineração e irrigação agrícola.

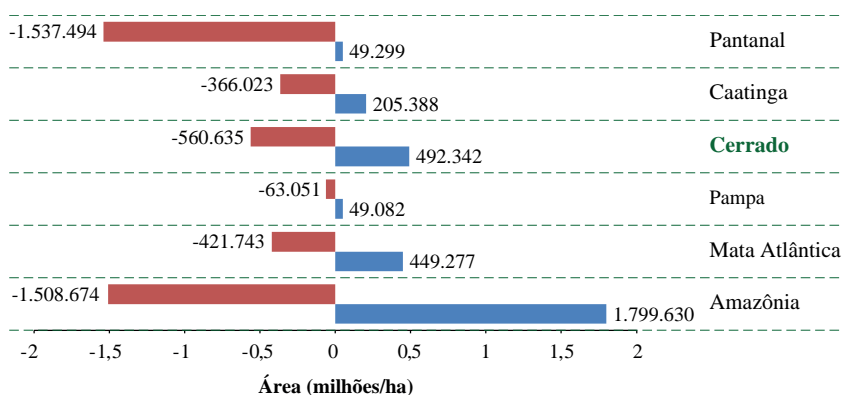


Figura 11.3. Comparação de perda (em vermelho) e ganho (em azul) de água superficial no bioma Cerrado em relação aos outros biomas brasileiros no período 1985–2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022a).

Foram identificadas cerca de 59 mil massas de águas individuais no Cerrado, compostas de lagos e lagoas naturais (mais de 60%), barragens artificiais para uso agrícola, abastecimento humano e contenção de rejeitos de mineração (cerca de 39%) e barragens para usinas hidrelétricas (menos de 1%) (Figura 11.4).

As massas de água classificadas como artificiais somam 72,4% da área total de 45.583,76 km², sendo a maioria (92%) com área superficial menor ou igual a 10 ha.

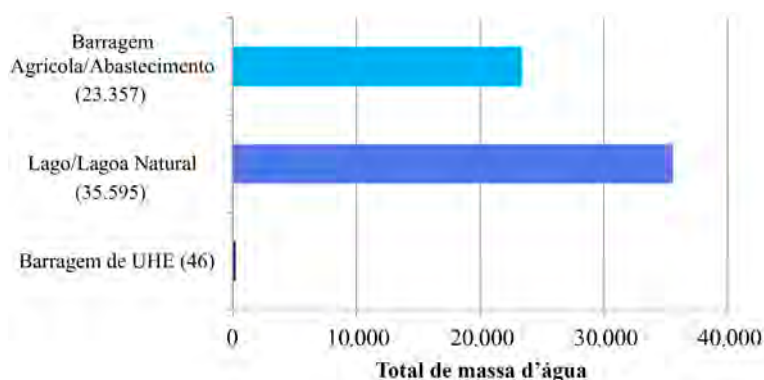


Figura 11.4. Número total de massas de água por tipo de armazenamento.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022a).

Apesar do número expressivo de lagos e lagoas naturais, sua área total média é a menor, cerca de 4 ha. As barragens agrícolas artificiais possuem uma área média de cerca de 7 ha, enquanto as barragens de usinas hidrelétricas possuem, em média, mais de 16 mil hectares (Tabela 11.1).

Tabela 11.1. Estatísticas gerais para a área em hectares de cada tipo de massa de água no Cerrado.

Tipo	Mínimo (ha)	Máximo (ha)	Média (ha)	Desvio padrão (ha)
Barragem agrícola/abastecimento	0,001	6.204	7	74
Lago/lagoa natural	< 0,0001	2.536	4	49
Barragem de usina hidrelétrica	154	96.906	16.484	21.820

Em todo o Cerrado, mais de 10 mil quilômetros quadrados foram classificados como massas de água com represamento. Dessa área total, 75% foram definidas como barragens de usinas hidrelétricas (UHE), 17% como barragens para uso agrícola, abastecimento humano e con-

tenção de rejeitos de mineração, assim como 8% como lagos e lagoas naturais (Figura 11.5). Apesar de possuírem um número menor de massas de água individuais, as barragens de usinas hidrelétricas são as principais responsáveis pelo armazenamento de água no Cerrado.

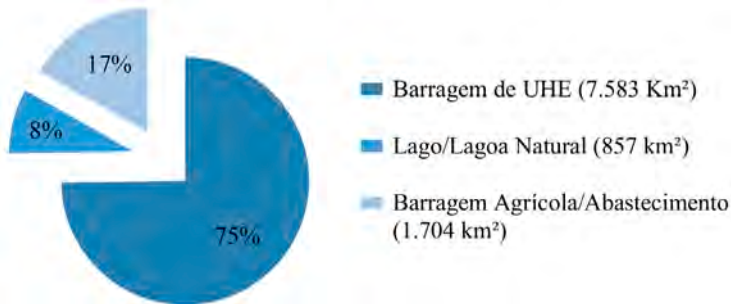


Figura 11.5. Área total de massas de água com represamento no Cerrado no ano de 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022a).

Foram identificadas 46 massas de água de represas de usinas hidrelétricas, considerando apenas a área inserida no Cerrado, em casos de limites com outros biomas. Dentre essas, a menor é a de São Domingos, localizada no município de São Domingos, GO, com cerca de 154 ha de área inundada, e a maior é a de Três Marias, localizada no município de Três Marias, MG, com cerca de 97 mil hectares de área inundada (Figura 11.6). No quesito geração de energia, a maior é a de Marimbondo, no Rio Grande, MG, com capacidade de potência nominal geradora das turbinas de até 1.440 MW, seguida pela usina de Serra da Mesa, no Rio Tocantins, GO, com capacidade de potência nominal geradora das turbinas de até 1.275 MW.

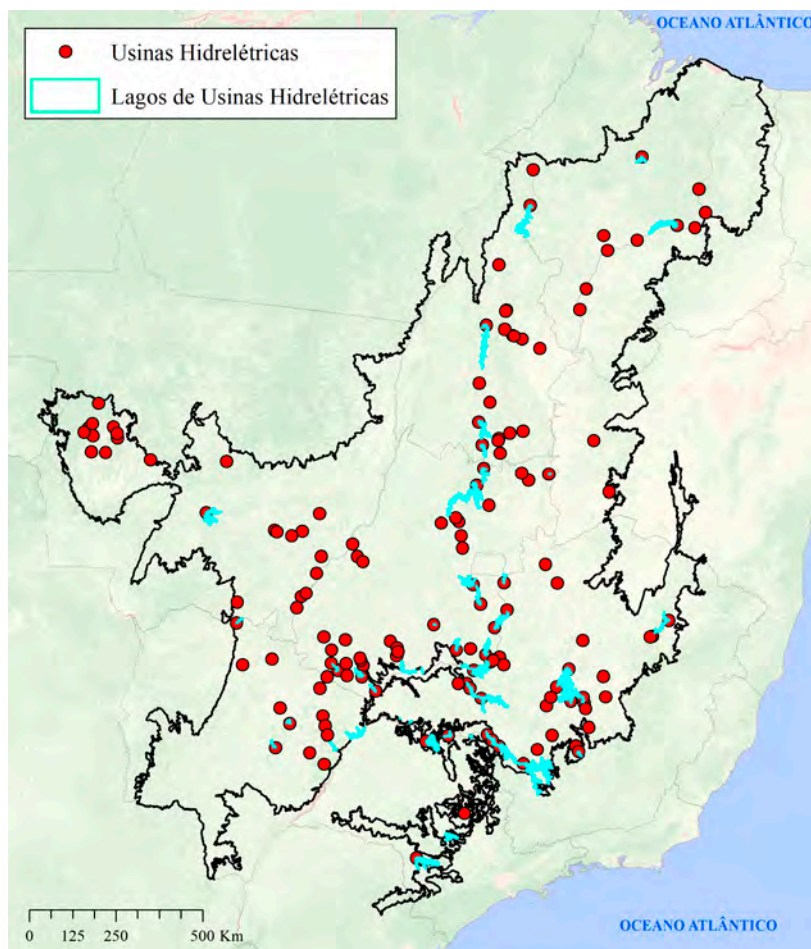


Figura 11.6. Localização das usinas hidrelétricas do Cerrado e os seus respectivos lagos no ano de 2019⁹.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022b) e Agência Nacional de Energia Elétrica (2020).

Os municípios do Cerrado seguem padrões distintos com relação à localização de lagoas naturais e barragens, especialmente as destinadas para irrigação. Os municípios com maior área total de lagoas

⁹ A área dos lagos apresentada na figura foi aumentada para facilitar a visualização. Somente lagos com mais que 900 m² de largura foram incluídos.

e lagos naturais são Santo Amaro do Maranhão e Barreirinhas, ambos no Maranhão, com 54,5 km² e 43,1 km², respectivamente, na região do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (Figura 11.7). Outra região com muitas lagoas naturais é a planície do Rio Araguaia, destacando-se o município de Cocalinho, MT, que possui a maior área total de massas de água naturais (cerca de 28 km²).

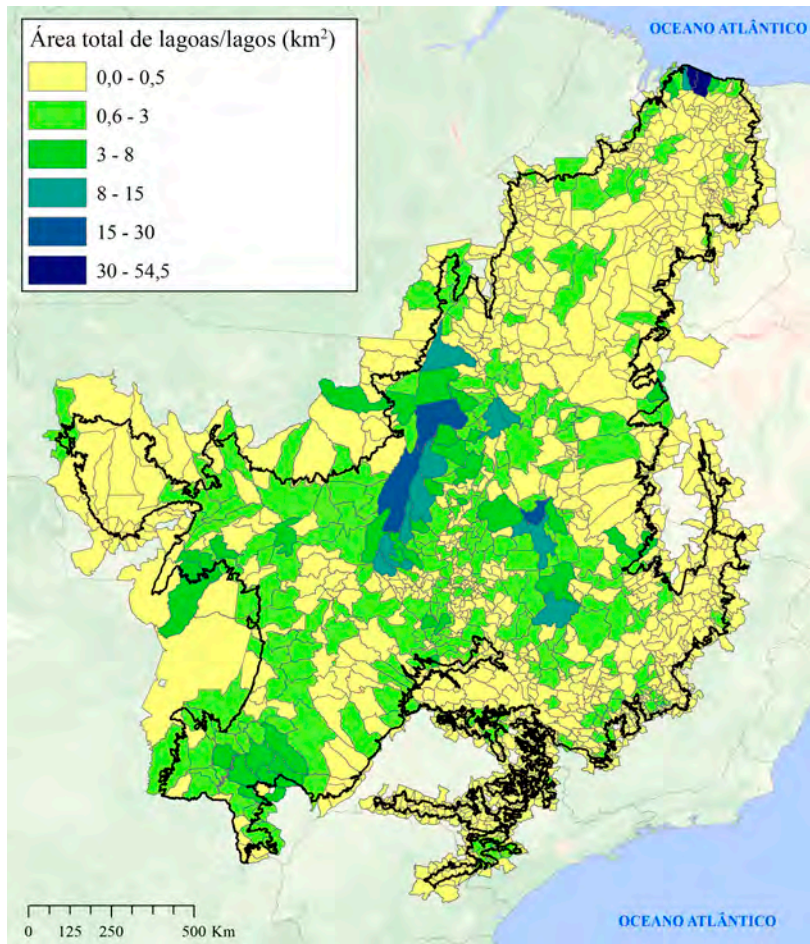


Figura 11.7. Área total (km²) de lagoas e lagos naturais por município do Cerrado.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022b).

O município com maior área total de barragens artificiais, excluindo-se as destinadas para geração de energia hidrelétrica, é o Formoso do Araguaia em Tocantins, com cerca de 65,23 km², compostas de grandes áreas inundadas para cultivo de arroz, além de diversas barragens para uso agropecuário em geral. A região que engloba a cidade de Brasília no Distrito Federal, Cristalina, em Goiás, e Unaí e Paracatu, em Minas Gerais, forma o principal complexo de áreas irrigadas no Cerrado, com barragens utilizadas principalmente para atender à irrigação por pivô central.

Brasília possui a segunda maior área de barragens, com cerca de 57,91 km², compostas principalmente por barragens para abastecimento humano, mas também por áreas utilizadas para irrigação. O município de Cristalina apresenta a terceira maior área de barragens, com 33,69 km², sendo a maior parte utilizada para irrigação (Figura 11.8).

11.3 Área ocupada por barragens artificiais

Analisando a Figura 11.9, observa-se que grande parte dos municípios apresenta uma pequena área ocupada por barragens, com menos que 1 km² no total. Os municípios considerados "outliers" são Formoso do Araguaia, TO, com 65 km² de área de barragens; Brasília, DF, com 57 km² de área de barragens; e Cristalina, GO, com 33,7 km² de barragens, conforme relatado no parágrafo anterior.

A partir da análise do percentual de áreas ocupadas por barragens artificiais em cada município (Figura 11.10), excluindo-se as destinadas para usinas hidrelétricas, foram identificados três municípios com as maiores porcentagens: Nerópolis, GO, com cerca de 14%, Taquaral, SP, com cerca de 13% e Taquarivaí, SP, com cerca de 12%. Esses municípios não são destaque na agricultura irrigada, mas por terem área total pequena, acabam apresentando alta porcentagem do seu território coberto por barragens.

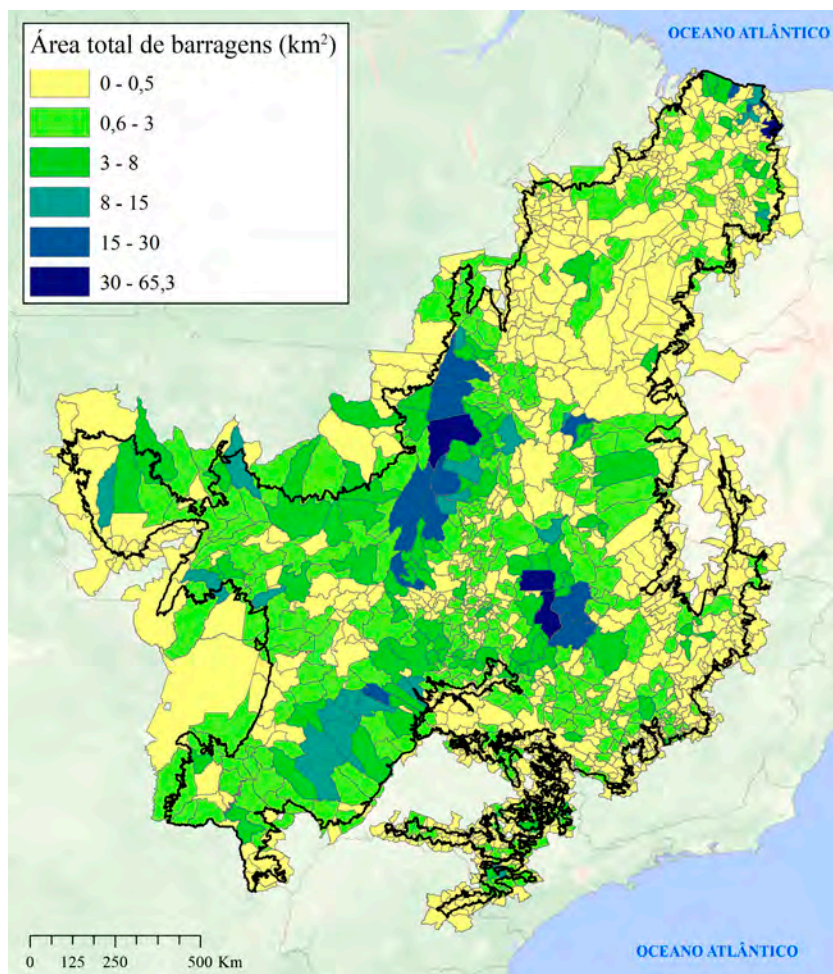


Figura 11.8. Área total (km²) de barragens, excluindo-se barragens de usinas hidrelétricas.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022b).



Figura 11.9. Boxplot do total de barragens (km²) por município.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022a).

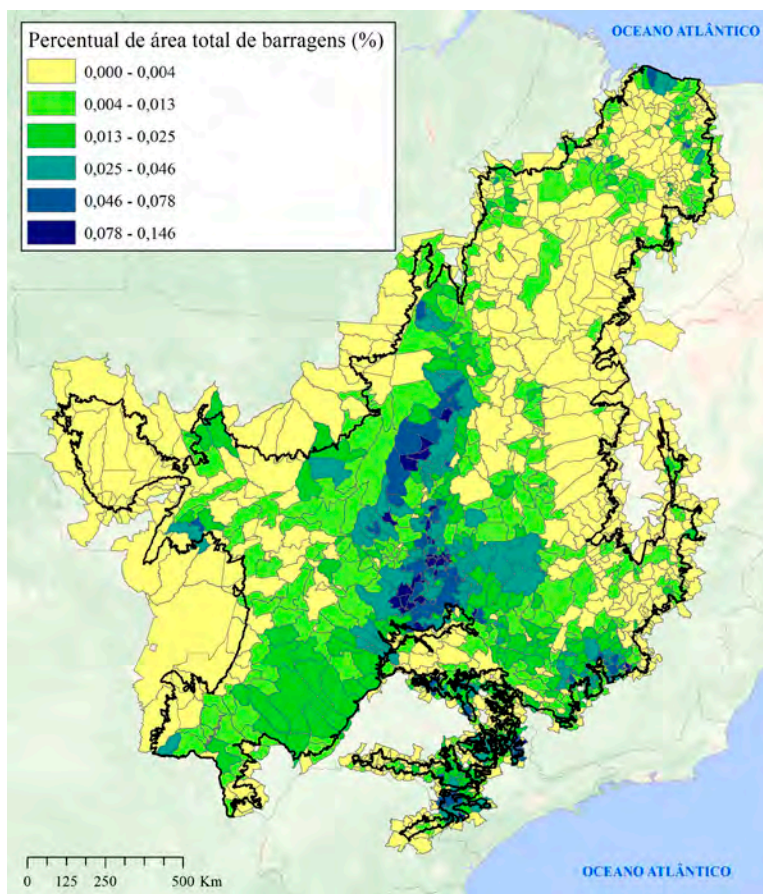


Figura 11.10. Percentual da área ocupada por barragens em cada município.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022b).

Na Figura 11.11, é apresentada a área total ocupada por barragens antrópicas no Cerrado, podendo ser observada a alta concentração de pequenas barragens.

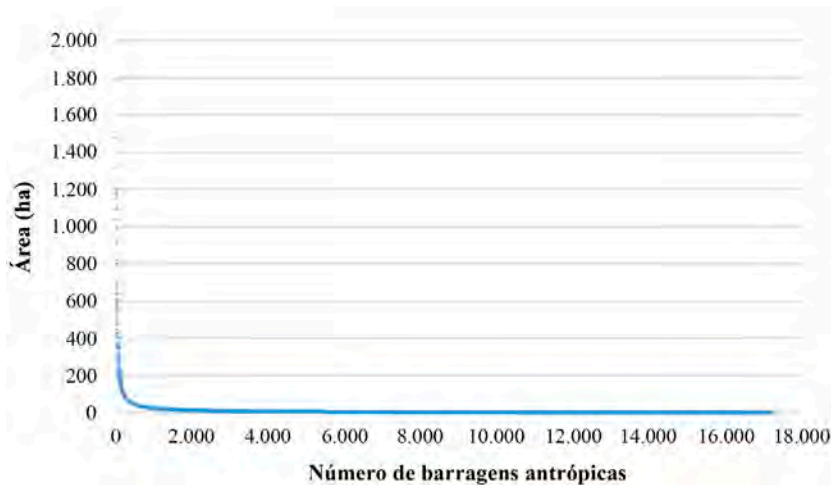


Figura 11.11. Área total ocupada por barragens antrópicas no Cerrado. Para facilitar a visualização, foram selecionadas apenas barragens com área entre 2 ha e 2.000 ha.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022a).

11.4 Volume armazenado e evaporação

Com base na equação $V = 0.019 A^{1.1762}$ proposta por Pinhati et al. (2020), foram calculados os volumes armazenados nas barragens. As barragens de usinas hidrelétricas não foram consideradas. Os volumes das barragens antrópicas analisadas variaram entre 0,00007 hm³ até 549,112 hm³, com média de 0,33 hm³ e mediana de 0,02 hm³. O total de volume de água acumulado nas barragens do Cerrado foi de 7.799,33 hm³. Se somado o valor das barragens de usinas hidrelétricas, chega-se em um volume de 170.480,70 hm³, havendo ainda cerca de 12.043,50 hm³ de água armazenada em lagos e lagoas naturais.

Quanto à evaporação anual, estimada pelo método do coeficiente de tanque (Althoff et al., 2019), as lagoas e os lagos naturais apresentaram a maior amplitude média de evaporação, assim como de desvio padrão (Tabela 11.2), enquanto as barragens agrícolas/abastecimento apresentaram a menor taxa média de evaporação, assim como de desvio padrão.

Tabela 11.2. Estatísticas referentes a evaporação média anual (mm), considerando cada tipo de massa de água no Cerrado.

Tipo	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Lago/lagoa natural	1.031,1	1.539,3	1.348,5	146,1
Barragem agrícola/abastecimento	1.135,0	1.338,0	1.237,1	67,6
Barragem de usina hidrelétricas	1.087,7	1.417,4	1.259,2	78,0

11.5 Considerações finais

O desenvolvimento econômico e social de um país está fundamentado na disponibilidade hídrica, seja ela superficial ou subterrânea. No Cerrado brasileiro, há grande disponibilidade de água superficial tanto em mananciais quanto em reservas como lagos, o que propicia o desenvolvimento da agricultura irrigada na região.

A maior parte dos reservatórios de água são artificiais, criados com o intuito de regularizar a disponibilidade hídrica ao longo do ano, ou para a geração de energia elétrica. Em geral, os reservatórios menores têm usos relacionados com a irrigação, dessedentação animal e abastecimento humano, enquanto os reservatórios maiores estão relacionados com usinas hidrelétricas.

A partir dos dados do projeto Mapbiomas, foi possível observar a distribuição espaço-temporal das massas de água no Cerrado. Quanto à distribuição espacial, o Cerrado apresenta uma concentração de lagos naturais na planície do Araguaia, enquanto os reservatórios arti-

ficiais, excluindo-se os de usinas hidrelétricas, estão localizados nos municípios com maior produção agrícola irrigada, como Formoso do Araguaia, Brasília, Cristalina.

11.6 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: Relatório Pleno. Brasília, DF, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Usinas Hidrelétricas**. 2020.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D.; BAZAME, H. C. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian savanna. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 105-112, 2019.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas**. Coleção [5] da Série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 31 out. 2022a.

MAPBIOMAS. **MapBiomas Água**. Disponível em: <https://plataforma.agua.mapbiomas.org/map/-8.139086/-45.321527/5.0/biome/3/biome/water/2021/2021>. Acesso em: 5 ago. 2022b.

PINHATI, F. S. C.; RODRIGUES, L. N.; SOUZA, S. A. Modelling the impact of on-farm reservoirs on dry season water availability in an agricultural catchment area of the Brazilian savannah. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106296, 2020.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D. Pequenas barragens na agricultura irrigada. In: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (ed.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil**: história, política pública, economia e recurso hídrico. Piracicaba: Esalq/USP, 2021. p. 447-461.

CAPÍTULO 12

Mudanças Climáticas no Cerrado

Sin Chan Chou

André de Arruda Lyra

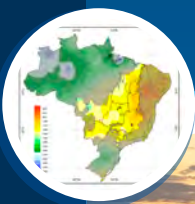
Daniela Carneiro Rodrigues

Isabel Pilotto

Jorge Luís Gomes

Pedro Regoto

Priscila da Silva Tavares



12.1 Introdução

A pluviosidade anual acumulada nas regiões do Cerrado varia de cerca de 1,2 mil milímetro na parte leste a 2,2 mil milímetros na parte oeste, enquanto que a temperatura média anual varia de 22 °C na parte sul até cerca de 30 °C na parte norte, segundo a climatologia de 30 anos (1991–2020) do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2022) (Figura 12.1). Na região, existem duas estações bem definidas: os meses mais chuvosos (de novembro a março) e os meses de seca (de maio a setembro). Os 2 meses restantes, outubro e abril, correspondem aos meses de transição. O clima predominante da região enquadra-se no tipo Aw (clima tropical de savana e inverno seco) de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). Durante o período chuvoso, os valores mais altos de precipitação são encontrados na porção oeste do bioma, notadamente no estado de Mato Grosso e na porção litorânea do estado do Maranhão.

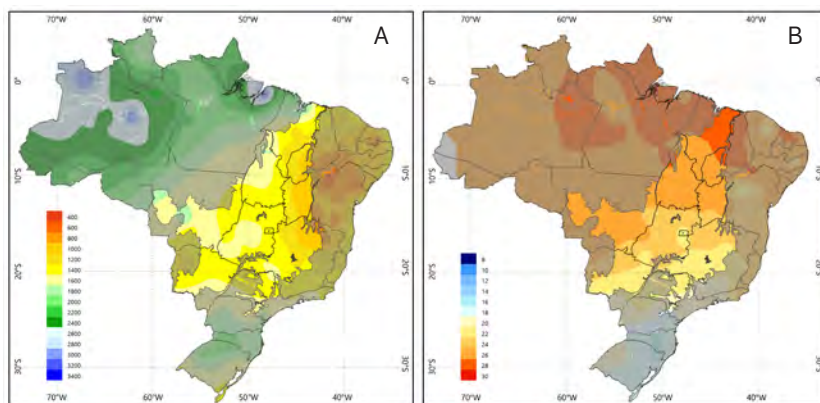


Figura 12.1. Normais climatológicas do Brasil de 1991–2020 para precipitação anual acumulada (mm) (A) e temperatura média compensada (°C) (B). Os limites do Cerrado estão em destaque.

Fonte: Adaptado de Inmet (2022).

Nos últimos anos, as variações climáticas e mudanças no clima têm sido frequentemente discutidas pela comunidade científica e pela população em geral. Considera-se mudanças climáticas as alterações na variabilidade natural do clima devido às atividades humanas ou fontes antropogênicas, como liberação de Gases de Efeito Estufa (GEE), mudanças no uso e cobertura do solo e desmatamento, entre outras. Em 2021, foi lançado o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). O relatório mostra o aquecimento global em cerca de 1 °C em relação ao período pré-industrial e é categórico em afirmar que este aquecimento em curto período de tempo é devido às ações antrópicas.

Para descrever o clima de várias décadas à frente, é necessário o uso de modelos climáticos dinâmicos que reproduzam o sistema climático terrestre. Diferente de uma previsão de tempo, as projeções climáticas, devido ao longo horizonte temporal (décadas), consideram diferentes cenários mundiais de desenvolvimentos socioeconômicos e mudanças tecnológicas que resultam em diferentes cenários de emissão dos GEE. Portanto, a principal ferramenta utilizada para simular o clima futuro, supondo diferentes cenários de emissão dos GEE, são os Modelos Climáticos Globais (MCGs). As tendências de longo prazo podem variar substancialmente de um local para outro (até dentro da mesma bacia hidrográfica) e os MCGs, devido a sua baixa resolução espacial, não capturam facilmente as variações temporais e espaciais detalhadas em uma escala local ou regional. Portanto, o estudo dos impactos locais das mudanças climáticas globais necessita de detalhamento das projeções dos modelos globais a partir de regionalização (downscaling) dinâmica ou estatística. Os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) podem ser usados para regionalizar as saídas dos MCGs de grande escala para uma resolução espacial mais refinada.

Uma questão a ser destacada nos estudos das mudanças climáticas é o possível aumento na ocorrência de eventos climáticos extremos. Tais eventos geralmente geram grandes impactos no ambiente

e na sociedade, incluindo perdas humanas e materiais. Esses eventos podem ocorrer, por exemplo, na forma de chuvas muito intensas, ou extremamente reduzidas, secas prolongadas, temperaturas extremamente altas, maiores riscos de incêndios, redução da disponibilidade hídrica, entre outros. Por outro lado, também podem trazer oportunidades tais como a possibilidade de maior fonte de energia solar e consequentemente de energia fotovoltaica, ou maior energia eólica, entre outros. Identificar os riscos e as oportunidades é o primeiro passo para construir medidas de adaptação às mudanças climáticas.

Com o objetivo de analisar as mudanças climáticas no Cerrado, este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte são apresentados estudos observacionais de mudanças na temperatura, precipitação e umidade relativa, com foco no Cerrado brasileiro. As mudanças são apresentadas na forma de tendências das últimas décadas. Na segunda parte são apresentadas as projeções de mudanças climáticas para as décadas futuras. As tendências observadas até o presente podem não se manter nas décadas futuras. Os impactos na mudança do bioma devido aos efeitos climáticos também são considerados. Ao final do capítulo, são traçadas algumas considerações sobre as mudanças climáticas no Cerrado.

12.2 Mudanças observadas

12.2.1 Temperatura do ar

Nesta seção, será dada ênfase ao percentil 90 das temperaturas máximas (TX90p) e ao percentil 10 das temperaturas mínimas (TN10p). Dessa forma, cada estação meteorológica na área do Cerrado possui um valor individual das temperaturas TX90p e TN10p.

Almeida (2012) utilizou séries observadas das estações meteorológicas do INMET para analisar a tendência dos extremos de temperatura no Centro-Oeste do Brasil. As séries possuem tamanhos variados, desde 24 anos até 50 anos, com início diferentes, mas a maioria com o final em 2011. Na área que se refere ao Cerrado, as tendências das

temperaturas máximas que excedem o percentil 90 se apresentaram positivas com alta significância estatística, portanto, pode-se afirmar com confiança que as temperaturas que excedem TX90p estavam se tornando mais frequentes no período estudado. A série da única estação que apresentou tendência negativa também não apresentava significância estatística. Por outro lado, as tendências das temperaturas inferiores a TN10p, estavam se tornando mais frequentes no período estudado, entretanto, a significância estatística era menor em comparação com o índice das temperaturas máximas.

Em uma análise específica para Brasília, DF, Almeida (2012) observou que as temperaturas mínimas estão aumentando em uma taxa maior do que as temperaturas máximas, o que está reduzindo a amplitude térmica na cidade. Esse resultado concorda com os encontrados por Salvador e Brito (2018) para a região do Matopiba, em que utilizando séries de temperaturas máximas e mínimas para o período de 1970 a 2012, encontraram tendência de aumento na frequência de temperaturas máximas e mínimas que excedem o percentil 95.

Utilizando séries observadas de temperatura das estações do INMET, porém abrangendo o período de 1961 a 2017, totalizando assim 57 anos, Regoto et al. (2021) estimaram a magnitude das tendências do TX90p e do TN10p para cada estação meteorológica (Figura 12.2). Os resultados revelam, em grande parte do Cerrado, um aumento estatisticamente significativo da frequência do TX90p de cerca de 5 a 10% por década (Figura 12.2A). Palmas é a cidade do Cerrado com a maior tendência de aumento na frequência do TX90p, a qual ultrapassa os 10% por década. Em relação ao TN10p, os resultados indicam que tendem a ser menos frequentes (Figura 12.2B). Na parte nordeste e sudeste do Cerrado, predomina a tendência de redução do TN10p de 0,1 a 5% por década, enquanto que na parte que abrange Tocantins e Mato Grosso, predomina tendência maior de redução, com várias estações apresentando tendência estatisticamente significativa superior a 10% por década.

As temperaturas no Cerrado podem ser alteradas pelo aumento global dos GEE bem como pela alteração do uso do solo. A contribuição de cada efeito nas mudanças da temperatura não é clara, mas se nota que regiões como Tocantins e Mato Grosso, onde há forte urbanização e culturas agrícolas substituindo o bioma Cerrado, apresentam as maiores tendências seja no aumento das temperaturas máximas, seja na redução das temperaturas mínimas.

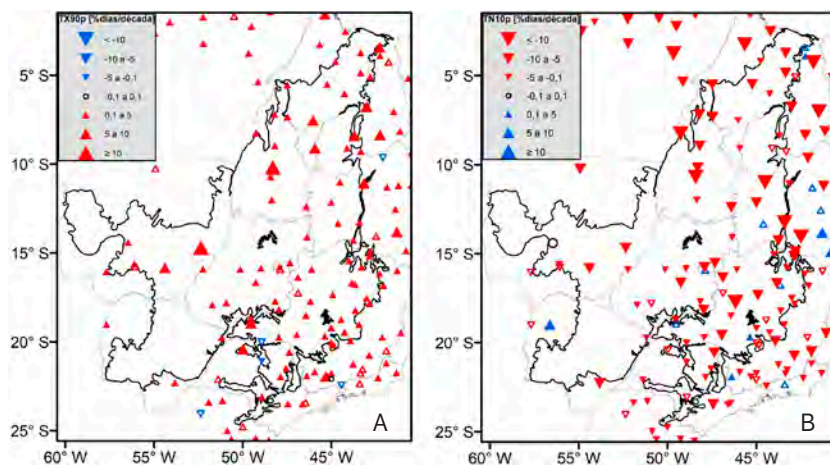


Figura 12.2. Tendência anual observada das temperaturas máximas TX90p (A) e das temperaturas mínimas TN10p (B) no Cerrado considerando o período de 1961 a 2017.

Fonte: Adaptado de Regoto et al. (2021).

A tendência de aumento da temperatura média anual tem sido observada no Cerrado a partir de diferentes conjuntos de dados de temperatura ou diferentes recortes temporais. Penereiro et al. (2018) utilizaram dados do INMET de diferentes tamanhos considerando o período de 1961–2015 e encontraram tendência positiva na temperatura média em todas as estações do ano. Correa et al. (2022), utilizando o conjunto de dados do Climatic Research Unit (CRU) (Harris et al., 2020), identificaram que a tendência mais acentuada de aumento da temperatura média ocorreu nos estados de Tocantins e Goiás, entre 1985 e 2014, o qual chegou a 1,16 °C.

12.2.2 Precipitação

Almeida (2012) utilizou dados observados do INMET também para analisar índices extremos de chuva em localidades do Centro-Oeste brasileiro. No Cerrado, o inverno (junho, julho e agosto) é a estação que apresenta longos períodos sem chuva. A qualidade do regime das chuvas pode ser representada pelo índice de contagem de dias consecutivos máximos sem chuva em cada ano, do inglês *Consecutive Dry Days* (CDD), podendo indicar se o período seco é longo ou curto. Esse índice apresentou tendência de aumento em grande parte do Cerrado. Esse resultado também foi encontrado por Regoto et al. (2021), que mostraram aumento pequeno em grande parte do Cerrado, mas aumentos estatisticamente significativos no Cerrado do noroeste de Minas Gerais (Figura 12.3A). Isso significa que ao longo dos últimos anos se observou um aumento na duração do período de estiagem. Além disso, análises de dados históricos de precipitação na bacia do rio São Francisco, que abrange boa parte do leste do Cerrado, mostram um declínio de totais de chuva em mais de 25% em relação à média de longo prazo de 1961–1990 (Jong et al., 2018).

Outra caracterização das chuvas pode ser representada pelo índice de número de dias consecutivos chuvosos em um ano, do inglês *Consecutive Wet Days* (CWD). Os resultados de Almeida (2012) mostraram tendências desse índice predominantemente negativas no oeste de Minas Gerais, leste, norte e sudoeste de Goiás. Entretanto, os resultados apresentados em Regoto et al. (2021) indicam que as tendências negativas são pequenas e sem significância estatística; sendo predominantemente nula (círculos) em várias partes do Cerrado, principalmente no Mato Grosso do Sul (Figura 12.3B). Nesse contexto, os resultados de Regoto et al. (2021) apontam que, na maior parte do Cerrado, a duração dos períodos de dias consecutivos chuvosos no clima presente permanece constante.

Levando em consideração a intensidade, as chuvas que se acumulam em grandes volumes ao longo de um único dia frequentemente são responsáveis por desencadear desastres, tais como inundações

ou deslizamentos de terra. Para acompanhar as chuvas diárias de alta intensidade, pode-se adotar como limiar os percentis 95 ou 99 das chuvas do conjunto de 30 anos. Os índices R95p ou R99p representam o acumulado do volume de chuvas que excedem os percentis 95 ou 99, respectivamente, em cada ano. Almeida (2012) encontrou tendências estatisticamente positivas desses índices em diversas partes do Cerrado. Em Regoto et al. (2021), a tendência do índice R95p concorda na parte sul do Mato Grosso do Sul, também com alta significância estatística, entretanto, nas demais regiões, há localidades com tendência de redução próximas de outras com aumento, não mostrando um sinal de tendência predominante na região como um todo (Figura 12.3C).

O total de chuva acumulada no ano é um índice comumente utilizado para identificar anos secos e anos chuvosos. Nos resultados de Almeida (2012), o índice que representa o total de chuva anual mostrou predomínio de tendências de aumento no Centro-Oeste, mas sem significância estatística. Entretanto, nos resultados de Regoto et al. (2021) (Figura 12.3D), a tendência foi de redução da chuva total anual na maior parte do Cerrado. A tendência de aumento das chuvas foi encontrada na parte sul do Cerrado, no Mato Grosso do Sul e na região da divisa entre São Paulo e Minas, com significância estatística, e partes do Maranhão, sem significância estatística. A região Centro-Oeste se destaca com uma das áreas no Brasil com menor disponibilidade de dados observacionais in situ, o que dificulta análises mais abrangentes das mudanças significativas na região.

Há localidades como, por exemplo, no noroeste de Minas Gerais, em que se observou tendência de redução das chuvas totais anuais e redução de dias chuvosos consecutivos, isto é redução no CWD, além de aumento na duração da estiagem, aumento no CDD, por outro lado, as chuvas intensas R95p tendem a aumentar (Figura 12.3). Consequentemente, é possível deduzir que em determinadas áreas do Cerrado, como no noroeste de Minas Gerais, as chuvas estão se tornando mais concentradas em períodos de tempo mais curto, acompa-

nhadas de períodos de estiagem mais prolongados. Isso pode ter um impacto negativo na biodiversidade e nos recursos hídricos. O que tem refletido na região no aumento do conflito pelo uso da água.

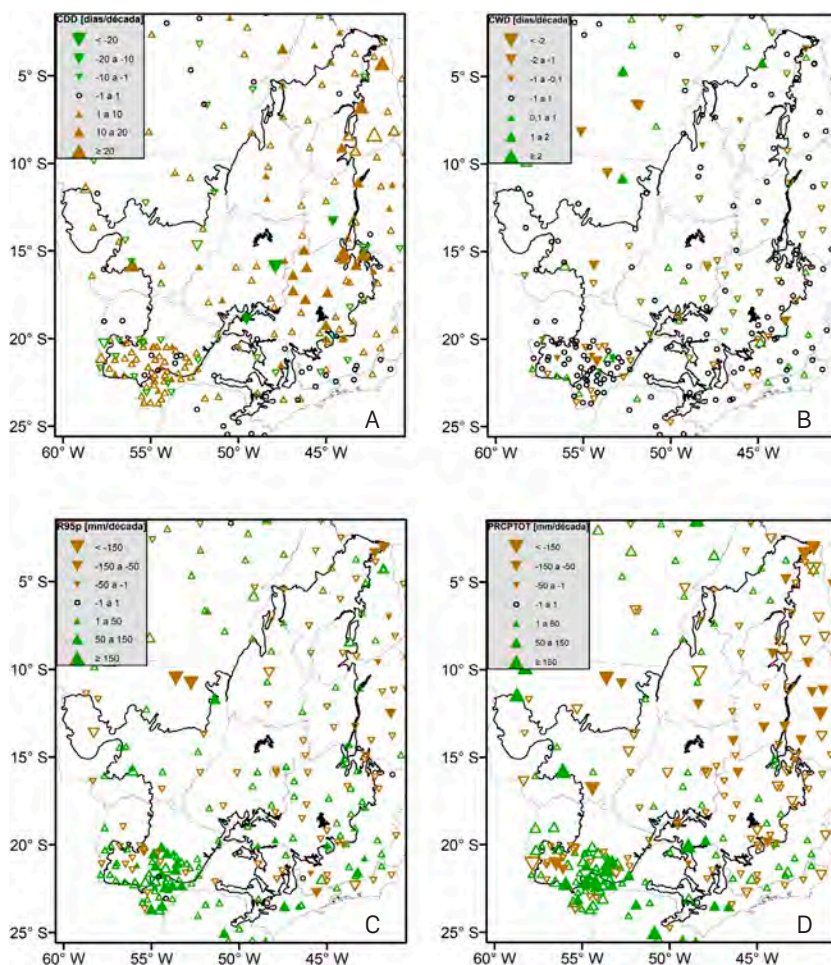


Figura 12.3. Tendência anual observada de número de dias secos consecutivos (A). CDD, número de dias chuvosos consecutivos (B). CWD, acumulados de chuva acima do percentil 95 (C). R95p, precipitação total anual (D), no Cerrado no período de 1961–2017.

Fonte: Adaptado de Regoto et al. (2021).

Uma informação útil para compor as análises da distribuição das chuvas ao longo do ano e avaliar o possível prolongamento dos períodos de estiagens consiste na identificação do início do período climatologicamente seco (chuvoso); e se o mesmo está adiantando (atrasando). Em estudo realizado por Costa e Pires (2010), os autores demonstraram que o desmatamento do Cerrado no entorno do arco do desflorestamento aumentou a duração da estação seca de cinco para seis meses.

O Índice de Precipitação Padronizada, do inglês Standardized Precipitation Index (SPI), e o Índice de Evapotranspiração e Precipitação Padronizado, do inglês Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010a, 2010b), são frequentemente utilizados para identificar extremos de precipitação. O SPI é calculado a partir da precipitação acumulada em diferentes escalas de tempo, enquanto que o SPEI é semelhante ao SPI, mas considera a evapotranspiração para identificar eventos extremos. Tomasella et al. (2023) utilizaram uma base longa de dados climatológicos (1980–2019) (Xavier et al., 2022), sobre o Brasil e estimaram o SPI e o SPEI para identificar os eventos climáticos extremos, seco ou úmido no Cerrado. Os autores verificaram, com significância estatística, que existem tendências negativas tanto no SPI quanto no SPEI durante o período 1980–2019 na maior parte do Brasil Central. A tendência negativa é mais intensa no SPEI pelo aumento da evaporação associado às temperaturas mais altas. No Centro-Oeste, onde está localizada grande parte do Cerrado, verificaram tendências negativas significativas para a precipitação e positivas para a evapotranspiração.

Diante dos resultados mencionados, há indicativos de que as chuvas estão se tornando mais concentradas em períodos de tempo mais curto, e os períodos de estiagem se tornando mais longos no Cerrado. Em geral, os trabalhos com dados observacionais verificaram uma maior concordância sobre o aumento da temperatura na região do

Cerrado, enquanto que as tendências da precipitação apresentam mais divergências em parte causadas pelas diferentes bases de dados, períodos considerados e metodologias adotadas.

12.2.3 Umidade relativa

A variável meteorológica umidade relativa tem relevância no Cerrado devido aos valores muito baixos encontrados na região por períodos longos. A baixa umidade relativa provoca problemas respiratórios e aumenta a evapotranspiração da biosfera, reduzindo a disponibilidade hídrica nessas condições.

Almeida (2012) analisou a série histórica da umidade relativa sobre o Centro-Oeste e observou o predomínio na região de tendência positiva (aumento) no número de dias nos quais a umidade relativa do ar permaneceu abaixo dos 30%, na grande maioria com significância estatística. Esse padrão foi verificado principalmente nas estações de inverno e primavera. A tendência de maior frequência de umidade relativa abaixo de 30% é consequência da tendência observada de aumento das temperaturas máximas e de redução na precipitação sobre a região. Os índices, baseados na quantidade de dias (UR30) e na duração dos dias consecutivos (DCUR30) nos quais a umidade relativa do ar ficou abaixo de 30%, mostraram que a região Centro-Oeste vem apresentando anualmente um aumento no número de dias secos (UR30) e na duração de períodos secos (DCUR30) com umidade relativa do ar abaixo de 30%.

Adicionando os dados MODIS às estações meteorológicas na região do Cerrado entre os anos 2000 e 2019, Hofmann et al. (2021) encontraram que nos meses secos, de julho a outubro, a tendência de aumento das temperaturas ao longo dos anos favoreceu o maior conteúdo de vapor d'água no ar, entretanto, acarretou em tendência de redução da umidade relativa. Além disso, as tendências de mudança eram mais significativas no período diurno do que noturno.

12.3 Projeções de mudanças climáticas

Modelos climáticos estão sujeitos a incertezas, especialmente em projeções climáticas de longo prazo em escala regional. Portanto, análises considerando diferentes modelos e cenários são práticas recomendadas para analisar as projeções de mudanças climáticas. Devido à impossibilidade de identificar o cenário que ocorrerá, são apresentados os cenários mais pessimistas, de alta emissão, e otimistas, de baixa emissão de GEE, na forma de intervalo ou faixa de valores em que a mudança pode ocorrer. A partir das projeções climáticas resultantes da combinação dos quatro modelos globais do Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): BESM (Nobre et al., 2013), CanESM2 (Chylek et al., 2011), HadGEM2-ES (Collins et al., 2011) e MIROC5 (Watanabe et al., 2010), e de dois cenários de concentração de GEE, RCP4.5 e RCP8.5 (Moss et al., 2010), geraram a combinação de oito projeções climáticas globais. Essas projeções foram regionalizadas para uma grade de resolução de 20 km sobre a América do Sul utilizando o Modelo Eta/INPE (Pesquero et al., 2010; Chou et al., 2012; Mesinger et al., 2012; Chou et al., 2014a).

O fenômeno El Niño/La Niña, caracterizado por aquecimento anômalo das águas do Oceano Pacífico Equatorial Central, impacta fortemente o clima global. Durante os eventos de El Niño, a parte norte do Cerrado apresenta redução das chuvas. Entretanto, os modelos climáticos globais apresentam muitas incertezas nas projeções da amplitude do fenômeno no futuro. Em geral, em cenários de maior aquecimento global, RCP8.5 ou SSP5-8.5, as projeções indicam que o fenômeno se torna mais intenso, enquanto que em cenários moderados RCP4.5 ou SSP2-4.5, as projeções não mostram mudança na amplitude do fenômeno (Beobide-Arsuaga et al., 2021).

A seguir, são apresentadas as projeções de mudanças na temperatura, precipitação e disponibilidade hídrica no bioma Cerrado. Esses resultados distinguem-se de Chou et al. (2014b) por incluírem mais

um modelo climático global e por conterem correção de viés (Tavares et al., 2023b) pelo método de mapeamento quantil empírico (Bárdossy; Pegram, 2011) aplicado nas variáveis precipitação e evapotranspiração. As comparações de aumento ou redução dos percentis referem-se às comparações com o valor do percentil do clima presente em cada caixa da grade na área do Cerrado. Por exemplo, se o valor do percentil 90 das temperaturas máximas, TX90p, de uma localidade no clima presente é 30 °C, nas projeções do clima futuro serão mostradas a frequência em que as temperaturas máximas excedem ou são inferiores a 30 °C.

12.3.1 Temperatura

As projeções de mudanças de temperatura no Cerrado são apresentadas em médias para 5 décadas: 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090. Os limites inferior e superior das mudanças de temperatura média do ar (°C), e dos índices extremos TN10p e TX90p em cada década foram extraídos de oito projeções construídas a partir do downscaling com o Modelo Eta. Entre as oito projeções, resultantes da regionalização dos quatro modelos globais e dois cenários de emissão, e em cada caixa de grade do modelo, a mudança de maior valor foi atribuída ao limite superior e a mudança de menor valor atribuído ao limite inferior, o que resultou nos mapas da Figura 12.4.

Em geral, as magnitudes das mudanças máximas e mínimas apresentam a tendência de aumento a cada década. Na primeira década (2041–2050), os limites inferiores das mudanças de temperatura média anual variam entre 0,5 a 1,5 °C e os limites superiores das mudanças variam entre 2 a 4 °C sobre o Cerrado (Figura 12.4). A última década (2081–2090) se apresenta como o período com maior aquecimento, as mudanças máximas atingem o aquecimento acima de 5 °C sobre toda a área do Cerrado. Em quase todas as décadas, as mudanças de temperatura têm intensidade menor na parte norte do Cerrado e se intensificam em direção à parte sudoeste.

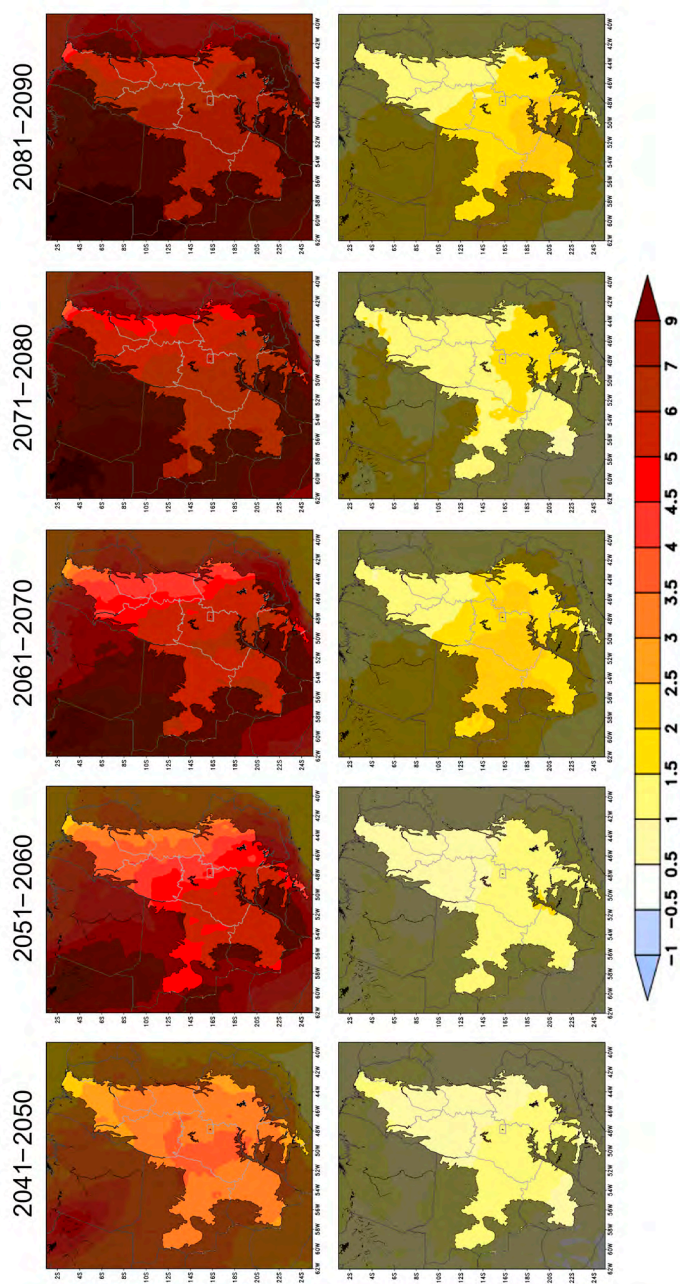


Figura 12.4. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na temperatura média anual (°C) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas de 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090, em relação à climatologia do modelo de 1976–2005.

Assim como em Regoto et al. (2021) com dados observados no clima presente, as projeções para o clima futuro indicam também tendência de redução na frequência das menores temperaturas mínimas em relação ao TN10p do clima presente, e tendência de aumento na frequência das maiores temperaturas máximas em relação ao TX90p do clima presente. Essa redução na frequência de temperaturas mínimas menores que TN10p do presente está compreendida no intervalo de -2 a -8% em todas as décadas. As maiores reduções na frequência de temperaturas mínimas menores que o TN10p do presente são notadas na parte Sul e Leste do Cerrado (Figura 12.5). Portanto, estas projeções indicam que as menores temperaturas mínimas ocorreram com menos frequência, o que resulta do aquecimento global.

Por outro lado, os aumentos nas frequências das maiores temperaturas máximas são mais expressivos do que a redução das menores temperaturas mínimas na região. As projeções indicam que no clima futuro, a frequência de temperaturas máximas maiores que o TX90p do presente aumentam desde de 20 a 80% na maioria das regiões do Cerrado (Figuras 12.6). Este aumento é maior na parte Noroeste do Cerrado e se expande para todo o Cerrado na última década, quando são notados limiares superiores entre 80 e 100%.

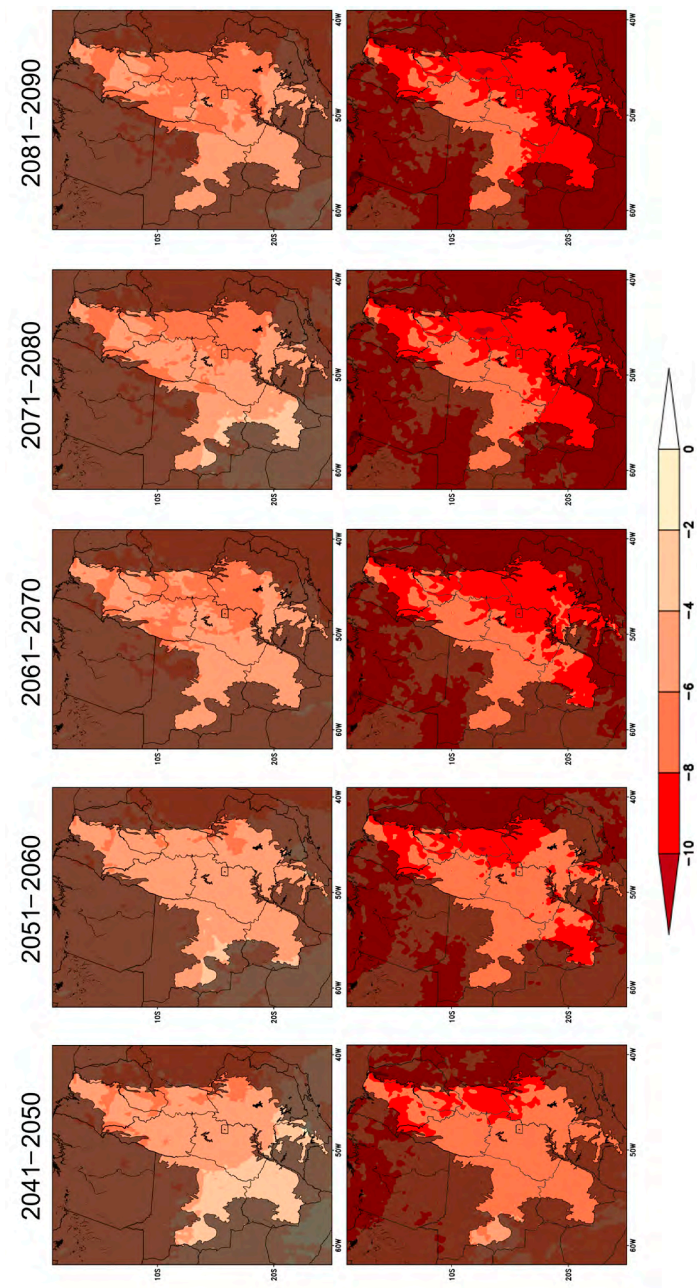


Figura 12.5. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na frequência de temperaturas mínimas menores que a TN10p do presente (%) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090, em relação à climatologia do modelo de 1976–2005.

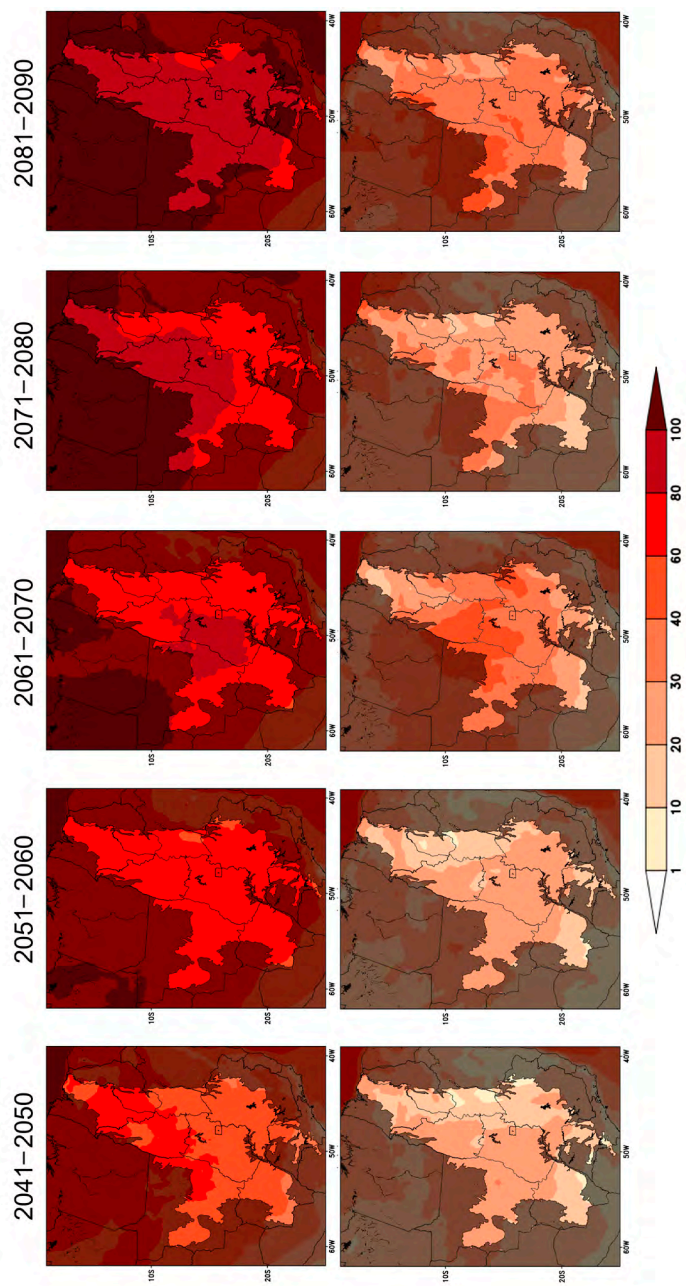


Figura 12.6. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na frequência das temperaturas máximas maiores que TX90p do presente (%) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005.

12.3.2 Precipitação

As projeções a seguir mostram a amplitude das mudanças da precipitação a partir das oito projeções do Modelo Eta descrito acima. Com base no conjunto do downscaling dos quatro modelos globais e os dois cenários de emissão, extraíram-se os limites inferior e superior das mudanças da precipitação projetada para a região.

As mudanças do máximo anual de dias consecutivos sem chuva, o índice CDD, extraído do conjunto das oito projeções, para o período de 2041 a 2090, fatiadas em décadas são mostradas na Figura 12.7. Os tons avermelhados indicam aumento no número de dias sem chuva consecutivos e os tons azulados indicam a redução do CDD do futuro em relação ao CDD do clima presente de 1976–2005. Nota-se que entre as oito projeções, as mudanças na duração de estiagem podem desde reduzir a até aumentar. Verifica-se que no norte do Cerrado, entre Maranhão e Piauí, há um aumento maior na duração das estiagens, mesmo os limites inferiores já indicam aumento de cerca de 10 dias, e os limites superiores excedem 50 dias. Quando se analisa o sinal das mudanças entre as projeções (terceira linha), nota-se que a partir da década de 2051–2060, a maioria das projeções concordam com o sinal positivo de CDD, ou seja de aumento do número de dias sem chuva consecutivos ao ano, portanto, aumento na duração máxima da estiagem a cada ano. A partir da década de 2051–2060, também se verifica que o aumento do índice CDD é mais expressivo do que a redução de CDD anual (limite inferior).

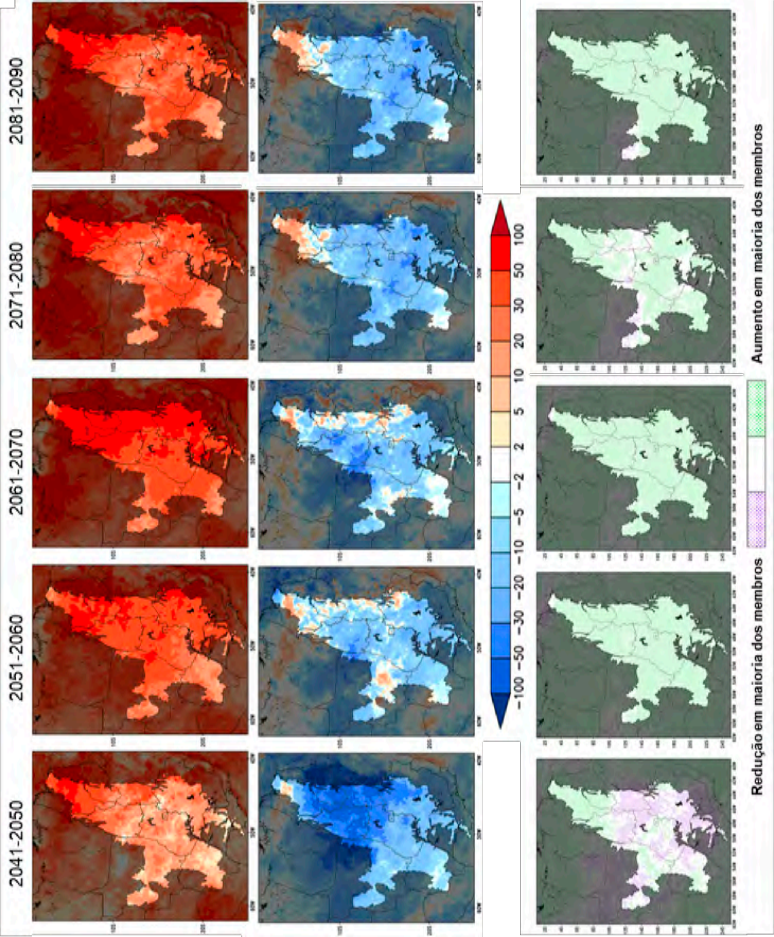


Figura 12.7. Limites superiores (linha superior) e inferiores (segunda linha) das mudanças no número de dias consecutivos de estiagem máximo anual (CDD) no Cerrado. São mudanças médias projetadas pelo Modelo Eta dos climas nas décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação ao clima de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

Na Figura 12.8, mostra-se as mudanças na máxima duração anual dos dias consecutivos chuvosos, isto é, são mudanças do índice CWD. As mudanças são médias a cada década em relação ao clima presente de 1976–2005. Os tons avermelhados indicam redução do índice CWD e os tons azulados indicam aumento do CWD. Na maior parte do Cerrado, as projeções indicam as possibilidades de os dias consecutivos chuvosos reduzir em cerca de 10 dias e até aumentar em cerca de 50 dias. Em uma área do Cerrado situada entre aproximadamente 10 °S e 6 °S, nota-se aumento no número de dias consecutivos chuvosos, CWD, em todas as décadas em relação ao clima presente. Contudo, considerando o sinal da mudança, há uma alta variabilidade entre as décadas. Em geral, a maioria das projeções do Modelo Eta apresenta predomínio do aumento na duração de dias chuvosos na década de 2041–2050, mas inverte para o predomínio de redução na duração de dias chuvosos na década de 2061–2070, e volta o aumento na década de 2071–2080.

As projeções de mudanças nas chuvas extremas, chuvas que excedem a taxa do percentil 95, R95p, do clima presente, apresentam desde redução a aumento destas chuvas (Figura 12.9). Alta variabilidade decadal também é mostrada. Enquanto que na década de 2041–2050, predomina o aumento nas chuvas extremas no Cerrado, com concordâncias entre as projeções, nas décadas de 2051–2060 e 2061–2070, predomina a redução das chuvas extremas no Cerrado, com maioria entre as projeções e, na década de 2071–2080, volta o aumento das chuvas. O padrão de mudanças se mantém no final do século, 2080–2099, mas em maior intensidade.

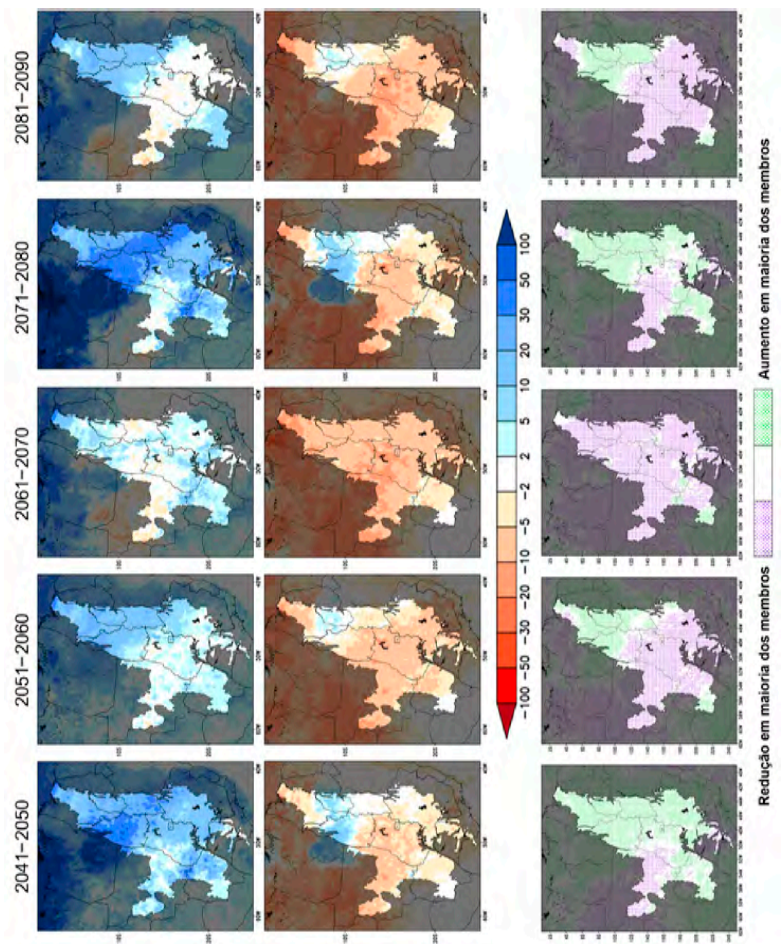


Figura 12.8. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças no número de dias consecutivos chuvosos máximo anual (CWD) no Cerrado. São mudanças médias projetadas pelo Modelo Eta dos climas das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação ao clima de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

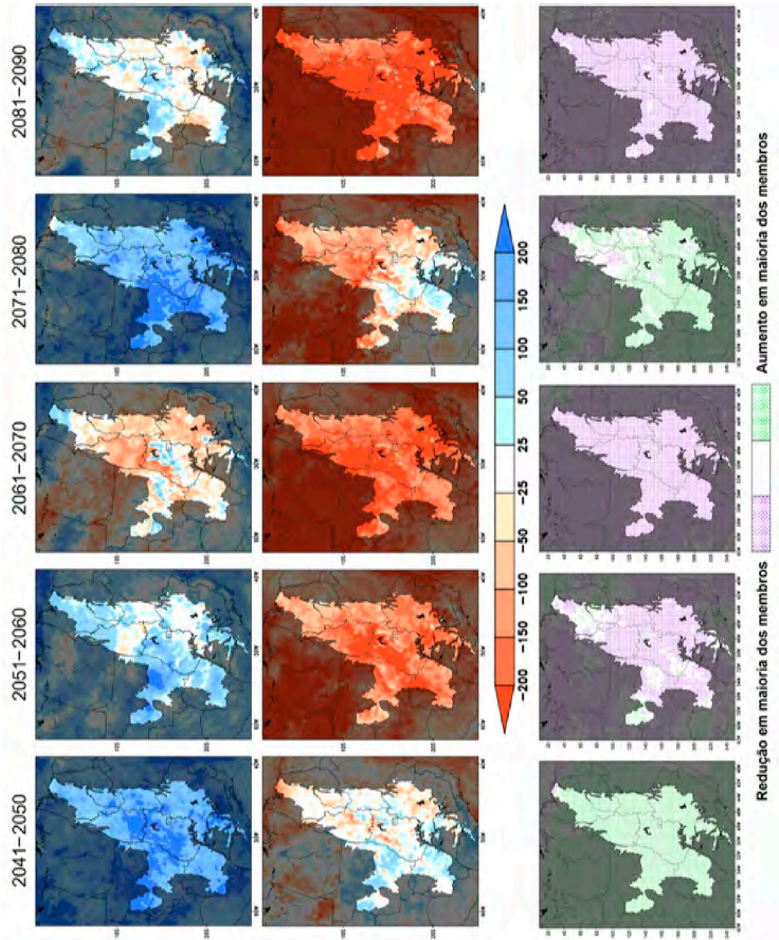


Figura 12.9. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças nas chuvas extremas (mm/ano) que excedem o R95p do clima presente no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

Essas diferenças de sinal entre os limites superiores e inferiores do intervalo das mudanças indicam uma divergência entre os dois cenários de emissão. Os sinais opostos dos limites superiores e inferiores e alta variabilidade decadal das projeções de chuvas extremas também ocorrem nas projeções da chuva total anual (Figura 12.10). O sinal de aumento da chuva anual predomina no Cerrado na década de 2041–2050 e é maioria das projeções do modelo. Entretanto, nas décadas 2051–2060, 2061–2070 e 2081–2090, a maioria das projeções do modelo Eta passa a indicar redução da chuva total anual. Na década de 2071–2080, há sinais mistos no Cerrado, mas com predomínio de redução da chuva anual na parte oeste. Nota-se que em regiões do Cerrado, onde as projeções indicam na maioria redução da chuva anual, as projeções também indicam aumento das chuvas extremas em relação a R95p, portanto, chuvas mais concentradas quando ocorrem.

As projeções para a América do Sul realizadas por Llopart et al. (2020), embora não abranjam especificamente a região do Cerrado, indicam um aumento das chuvas no período de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e uma redução no inverno (junho, julho, agosto) no final do século, 2070–2100, com significância estatística. Essas projeções foram realizadas utilizando os cenários RCP8.5 e RCP4.5.

Além disso, as projeções dos modelos climáticos globais do Coupled Models Intercomparison Project 6 (CMIP6) indicam uma forte redução da chuva anual na parte noroeste e oeste do Cerrado, mas um aumento na parte leste durante as décadas de 2040–2059 (Almazroui et al., 2021). Essas mudanças são projetadas nos quatro cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 (Riahi et al., 2017), que variam de baixa a alta emissão, respectivamente. A área de redução das chuvas se expande para leste no cenário SSP5-8.5.

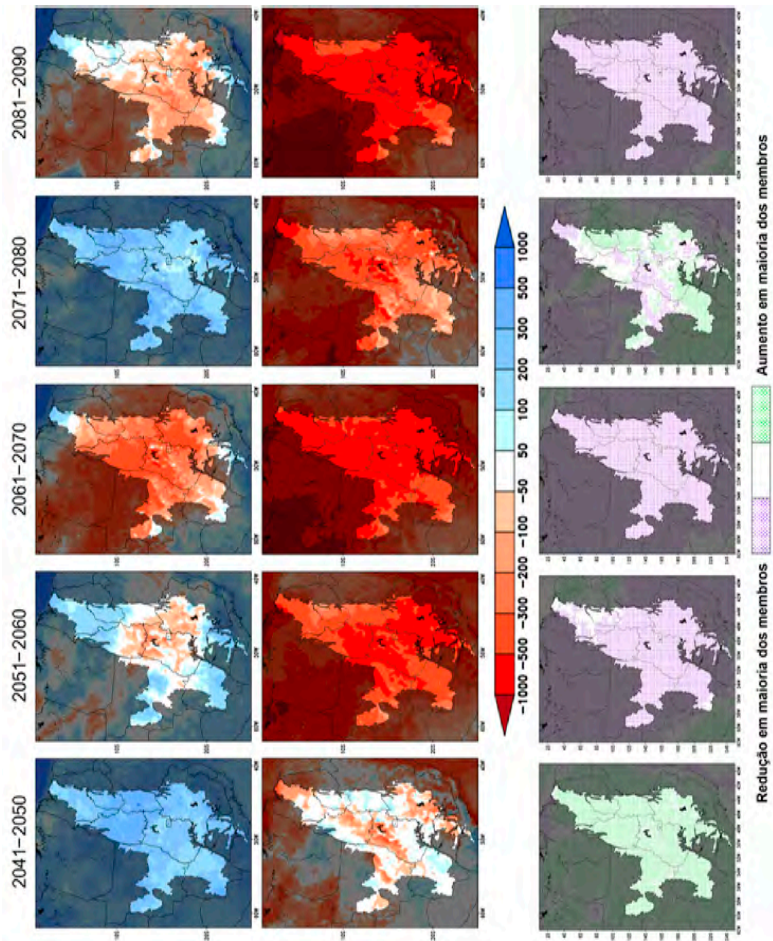


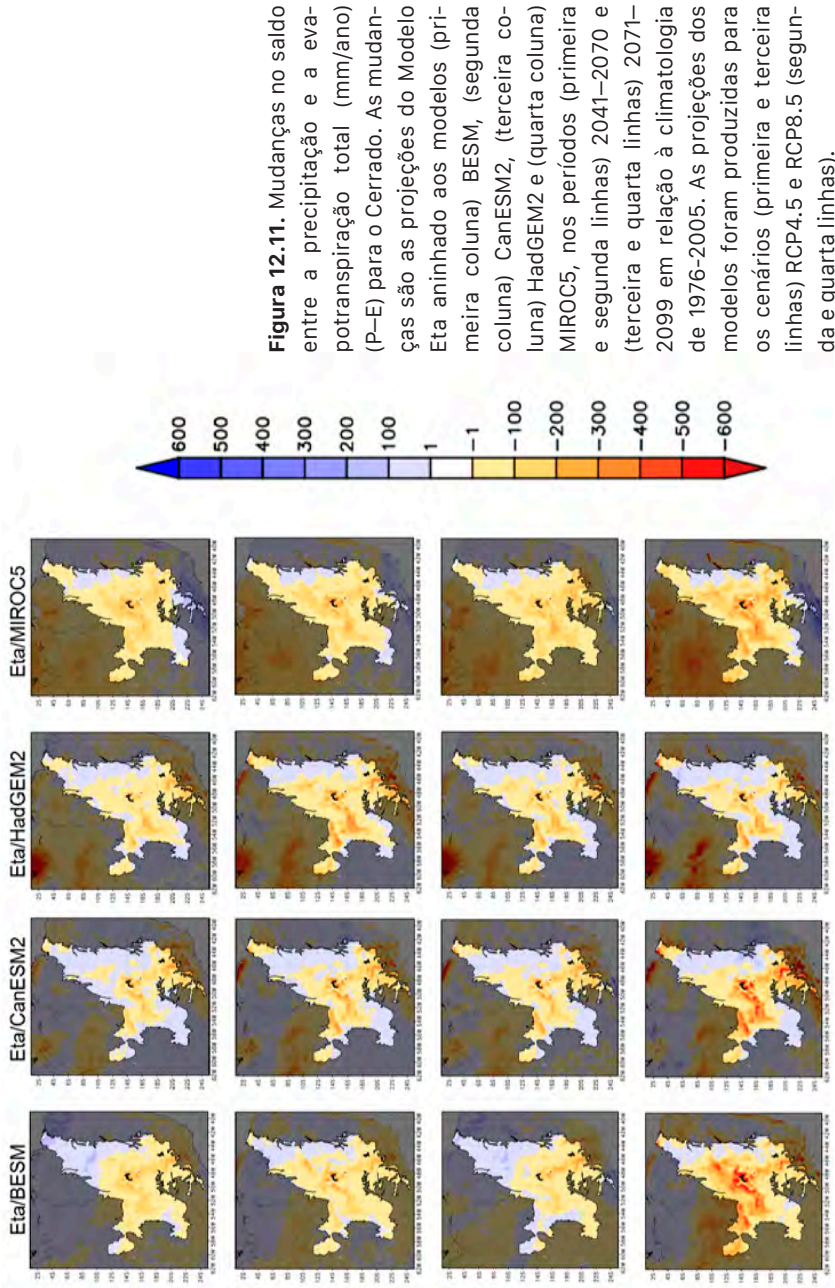
Figura 12.10. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na chuva total anual (mm/ano) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

12.3.3 Disponibilidade hídrica

As mudanças na precipitação e temperatura no Cerrado têm como resultado alterações na disponibilidade hídrica. A disponibilidade hídrica, sob uma perspectiva climática, pode ser estimada por meio do saldo entre a precipitação (P) e a evapotranspiração total (E), representado por $P-E$.

As projeções de mudanças na disponibilidade hídrica no Cerrado para o futuro em relação ao clima presente foram geradas pelo modelo Eta, abrangendo o período do meio para o final do século (Figura 12.11). A técnica de correção de viés foi aplicada na precipitação e evapotranspiração total. As projeções indicam um padrão consistente dessas mudanças, independentemente do modelo, cenário e período. Observa-se uma redução na disponibilidade hídrica ($P-E$) de até 500 mm ano⁻¹ em grande parte do Cerrado, sugerindo um potencial de déficit hídrico significativo nesta região para o futuro. Na parte norte do Cerrado, as projeções mostram mudanças positivas de $P-E$ em torno de 100 mm ano⁻¹.

Oliveira et al. (2019) verificaram, a partir das projeções do Modelo Eta, uma tendência decrescente na vazão na bacia do Alto Paranaíba, localizada no oeste de Minas Gerais. Os maiores decréscimos ocorreram principalmente no período chuvoso, entre outubro e março, com redução média de 44,4 e 52,3% para os dois cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, ao longo do século XXI. Os autores encontraram uma redução de até 75% nos picos da vazão durante o período de 2071 a 2099 para o RCP8.5, o que indica um potencial problema futuro na disponibilidade hídrica nestas bacias do Cerrado.



No Leste do Cerrado, Ribeiro Neto et al. (2016) analisaram as mudanças na vazão do Rio São Francisco a partir das projeções do Modelo Eta no cenário de alta emissão, RCP8.5. Os autores constataram que as projeções indicam diminuição na vazão entre cerca de 41 a 63% no período de 2041–2070. Em bacias a leste do Rio Tocantins, Rodrigues et al. (2019) estimaram os índices SPI e SSFI (do inglês Standardized StreamFlow Index) a partir das projeções do Modelo Eta e do modelo hidrológico SWAT. Os autores encontraram as tendências de secas hidrológicas aumentando mais intensamente que as secas meteorológicas.

A partir de sete modelos do CMIP6 com correção de viés nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, Siqueira et al. (2021) avaliaram a vazão nas bacias hidrográficas do Cerrado para até 2100. Os autores encontraram uma redução na vazão devido à redução na precipitação e ao aumento na temperatura do ar. Essa redução na vazão foi acentuada quando considerados os experimentos de reflorestamento nas bacias. De acordo com os autores, além dos impactos das mudanças climáticas, as florestas produzem uma alta evapotranspiração e uma grande quantidade de água interceptada pelas copas das árvores. Além disso, o sistema radicular mais profundo das árvores resulta em absorção e demanda adicionais de água, o que, por sua vez, leva a um aumento na transpiração e a menos água disponível para a recarga das águas subterrâneas. Por outro lado, em experimentos numéricos de reflorestamento utilizando modelo hidrológico desacoplado (offline) ao modelo climático, a água da evapotranspiração da floresta não é reciclada na precipitação.

Tavares et al. (2023a) avaliaram as mudanças nos componentes do balanço hídrico sob níveis de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C para as principais bacias hidrográficas brasileiras, utilizando projeções regionalizadas do modelo Eta. Os autores identificaram que, mesmo que o aquecimento global seja limitado a 1,5 °C, um marco crítico apontado pelo IPCC, a disponibilidade hídrica das bacias inseridas no bioma Cerrado pode diminuir em torno de 20%, aliada a um aumento nos períodos de seca, podendo produzir impactos significativos na agricultura, geração de energia hidroelétrica e turismo.

Na Quarta Comunicação Nacional do Brasil (Brasil, 2021), indicadores de escassez e estresse hídrico foram utilizados para dimensionar a disponibilidade hídrica, que é um dos componentes do Índice de Segurança Hídrica no contexto da mudança do clima (ISHmc). Projeções sob níveis de aquecimento médio global de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C indicaram que o Cerrado, juntamente com os biomas Caatinga e Mata Atlântica, serão os mais afetados, com reduções significativas na disponibilidade hídrica em cenários futuros. O ISHmc considera não apenas a disponibilidade, mas também a acessibilidade, a segurança, a qualidade e a governança dos recursos hídricos como componentes essenciais. Os resultados apresentados na Comunicação sugerem que os riscos atuais podem ser agravados. Isso ocorre principalmente devido à expansão agrícola irrigada, à falta de saneamento e controle de qualidade da água, à poluição difusa no meio rural e à perda de biodiversidade.

Por fim, ressalta-se que independentemente do modelo climático ou do cenário de emissão, as projeções têm indicado que o balanço hídrico sobre a região do Cerrado pode ser negativamente afetado pelas mudanças climáticas. De acordo com o conjunto de projeções, o balanço hídrico (P–E), que indica a disponibilidade de água para a hidrologia de superfície, indica decréscimos significativos de até 81,6% até o final de 2099.

12.3.4 Bioma Cerrado

Diante da importância socioeconômica e ambiental do Cerrado, apresentam-se os possíveis impactos das mudanças climáticas no bioma a partir de simulações do Modelo Eta, adotando dois cenários de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) no clima futuro, RCP4.5 e RCP8.5. O modelo climático regional Eta é forçado pelas projeções do modelo climático global HadGEM2-ES. Essas projeções (Chou et al., 2014b) indicam redução das chuvas anuais, períodos de estiagem mais longos e aumento significativo das temperaturas médias, máximas e mínimas no Cerrado (Seção 12.3.2 deste capítulo). As projeções de mu-

danças climáticas no Cerrado produzidas pelo Modelo Eta alimentam o modelo de vegetação dinâmica Inland.

O Inland é baseado no modelo Integrated Biosphere Simulator (IBIS) (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000) e faz parte da nova geração de modelos da biosfera terrestre. O modelo considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais, e representa os processos da superfície terrestre relacionados à energia, água, solo e atmosfera.

As projeções do Eta-Inland, forçadas pelo modelo global HadGEM2-ES no cenário RCP8.5, indicaram grandes mudanças na cobertura vegetal sobre a Amazônia, principalmente a substituição da floresta tropical e cerrado por pastagem (Lyra et al., 2016). No bioma Cerrado, os impactos são ainda mais significativos; por exemplo, no meio do século, na década de 2055–2065, já são projetadas mudanças nos tipos de vegetação que abrangem praticamente toda a área do Cerrado (Figura 12.12). Considerando ambos os cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, em praticamente toda a área, os tipos de vegetação iniciais, como Savana e Floresta Decídua, são substituídos pelo tipo de vegetação Pastagem Natural (Figura 12.12). No final do século, esse mesmo padrão de mudança se mantém. As projeções de Lyra et al. (2016) resultam da mudança na cobertura do solo em resposta às mudanças de temperatura e precipitação devido às mudanças climáticas globais, ou seja, em que os níveis dos gases de efeito estufa se alteram.

Por outro lado, mudanças na temperatura e precipitação ocorrem devido às mudanças no uso do solo. Grande parte da área do bioma Cerrado atualmente é utilizada para agricultura. Essas mudanças nos biomas também acarretam mudanças na distribuição das chuvas, no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica. Loarie et al. (2011) quantificaram os efeitos climáticos diretos da conversão de cerrado para pastagem. Os estudos foram realizados com base em mapas da expansão da cana-de-açúcar e remoção de vegetação natural. Os principais efeitos climáticos devido à conversão da vegetação natural para agricultura ou pastagem foram aumento da tem-

peratura e do albedo da superfície e diminuição da evapotranspiração. Desta forma, da mesma maneira que as alterações no clima causam impactos na cobertura da vegetação, as mudanças no uso do solo também podem afetar os processos que controlam o clima em uma região.

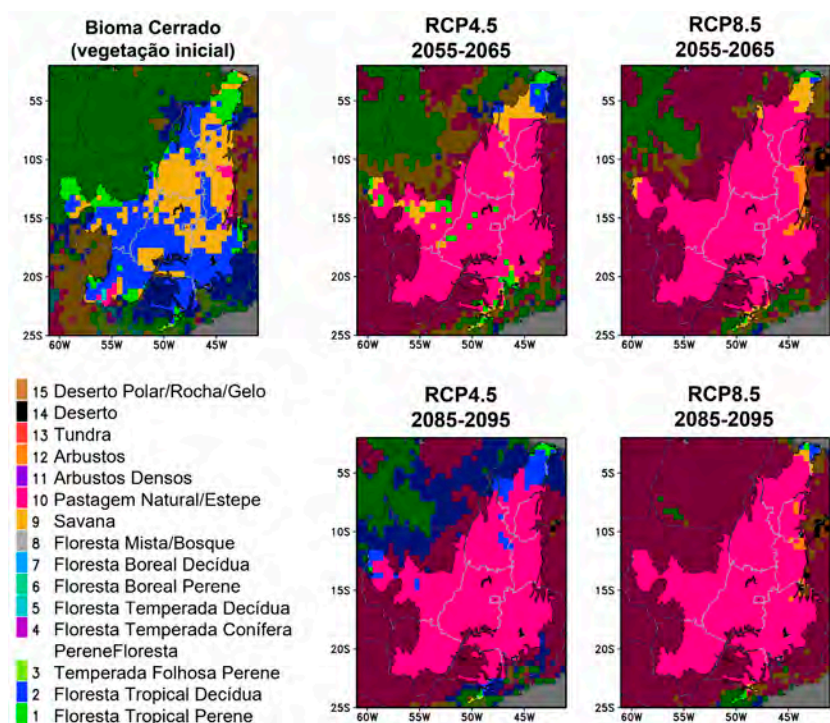


Figura 12.12. Tipos de vegetação inicial (coluna da esquerda) e mudanças na cobertura vegetal a partir das projeções do modelo de vegetação dinâmica Inland, que por sua vez utilizou as projeções do Modelo Eta forçado pelo modelo climático HadGEM2-ES, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, no meio (linha superior) e no final (linha inferior) do século XXI na região do bioma Cerrado. A área em destaque delimita o bioma Cerrado.

Outros estudos, utilizando diferentes modelos climáticos, métodos de modelagem e cenários de emissão de carbono, analisaram os efeitos das mudanças climáticas sobre o Cerrado. Simon et al. (2013)

usaram modelos bioclimáticos para os impactos na distribuição geográfica de espécies de importância econômica e cultural. As espécies estudadas apresentaram fortes reduções na distribuição geográfica no Cerrado, com redução média de $78\% \pm 7\%$ da área até o ano de 2080. Portanto, as mudanças climáticas no Cerrado mostram a possibilidade de perda de área e redução da distribuição geográfica considerando o uso econômico de algumas espécies.

12.4 Considerações finais

É importante destacar que são observadas no clima atual tendências de mudanças na temperatura, umidade relativa do ar e precipitação no Cerrado. As tendências de mudanças projetadas para o clima futuro são consistentes com as tendências observadas nas últimas décadas. Isso indica que o Cerrado está enfrentando mudanças significativas na precipitação e temperatura do ar. A redução na umidade relativa do ar é consequência do aumento da temperatura do ar.

As taxas de redução de precipitação observada em afluentes de rios, como Tocantins e São Francisco, podem se agravar, segundo as projeções climáticas. As incertezas das projeções são altas, principalmente na parte central e sudeste do Cerrado. Por outro lado, bacias do Cerrado atendem a múltiplos usos e já sofrem com conflitos pelo uso da água e também abrigam boa parte da capacidade hidrelétrica instalada do Brasil (Eletrobrás, 2018).

O bioma Cerrado tem sofrido aumento significativo nas taxas de desmatamento, especialmente em áreas de expansão da fronteira agrícola, como o Matopiba. A região Central do Cerrado, que já teve mais de 50% de sua área desmatada, continua também sendo uma das mais afetadas pelo desmatamento (Pires, 2020). Entretanto, a substituição do bioma Cerrado por outra cobertura do solo não é considerada nas projeções climáticas. A inclusão nos modelos climáticos de uma cobertura mais fiel ao uso do solo atual pode aprimorar as estimativas das mudanças na precipitação, temperatura e evapotranspiração, e ajudar a reduzir as incertezas das projeções.

Há concordância entre as projeções numéricas de que o Cerrado sofrerá com secas mais prolongadas e severas, principalmente no Noroeste e divisa com a Amazônia. Os estudos mostraram que a perda do bioma Cerrado, combinada com a perda do bioma Amazônia, contribui para a redução nas chuvas nas estações chuvosa e de transição da estação seca para a chuvosa, principalmente na região de contato entre os dois biomas. A identificação precoce de sinais de secas severas ou períodos de estiagem prolongados nas áreas mais críticas do Cerrado é crucial para um planejamento de ações eficazes de mitigação e adaptação à seca.

12.5 Referências

- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, p. 155-183, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.
- ALMEIDA, J. M. V. de. **Índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas na região Centro-Oeste do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4892>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BÁRDOSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, p. 1039-1056, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009689.
- BEOBIDE-ARSUAGA, G.; BAYR, T.; REINTGES, A.; LATIF, M. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 11-12, p. 3875-3888, 2021. DOI: 10.1007/s00382-021-05673-4.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF, 2021. 621 p.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES,

P. (2012). Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635-653. DOI: 10.1007/s00382-011-1002-8.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, Dec. 2014a. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014b. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043.

CHYLEK, P.; LI, J.; DUBEY, M. K.; WANG, M.; LESINS, G. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: canadian earth system model CanESM2. **Atmospheric Chemistry and Physics Discuss**, v. 11, n. 8, p. 22893-22907, 2011. DOI: 10.5194/acpd-11-22893-2011.

COLLINS, W. J. Development and Evaluation of an Earth-System Model—HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011. DOI: 10.5194/gmd-4-1051-2011.

CORREA, W. de S. C.; SOARES, W. R.; AYLAS, G. Y. R.; REIS JUNIOR, N. C.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, v. 43, e774, 2022. DOI: 10.14295/derb.v43.77.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, p. 1970-1979, 2010. DOI: 10.1002/joc.2048.

ELETOBRÁS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro por Bacias**: Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT). 2018. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 30 abr. 2024.

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, p. 603-628, 1996. DOI: 10.1029/96GB02692.

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1-18, 2020. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; de TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. D. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. de. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060-4073, 2021. DOI: 10.1111/gcb.15712.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1991 – 2020**. Edição Digital. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <http://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 30 abr. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. B.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, b. (ed.). Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

JONG, P.; TANAJURA, C.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 1540-1553, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.256.

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; GOWER, S. T.; LENTERS, J. D.; YOUNGMOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 795-825, 2000. DOI: 10.1029/1999GB001138.

LLOPART, M.; REBOITA, M. S.; PORFÍRIO DA ROCHA, R. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 99-116, 2020. DOI: 10.1007/s00382-019-04990-z.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011. DOI: 10.1038/nclimate1067.

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high-resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201502225.

MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3, p. 63-79, 2012. DOI: 10.1007/s00703-012-0182-z.

MOSS, R.; EDMONDS, J.; HIBBARD, K.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, 463, p. 747-756, 2010. DOI: 10.1038/nature08823.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; DE ALMEIDA, R. A. F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JR., M.; IRBER JR., L.; MARCONDES, G. G. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00580.1.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; BESKO, S.; VIOLA, M. R.; SRINIVASANC, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.021.

PENEREIRO, J. C.; BADINGER, A.; MACCHERI, N. A.; MESCHIATTI, M. C. Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 97-113, 2018. DOI: 10.1590/0102-7786331012.

PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, 2010. DOI: 10.1007/s00704-009-0123-z.

PIRES, M. O. 'Cerrado', old and new agricultural frontiers. **Brazilian Political Science Review**, v. 14, 2020. DOI: 10.1590/1981-3821202000030006.

REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021. DOI: 10.1002/joc.7119.

RIAHI, K.; VARREN, D. P. van;; KRIEGLER, E. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

RIBEIRO NETO, A.; DA PAZ, A. R.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal**

of Water Resource and Protection, v. 8, p. 1103-1127, 2016. DOI: 10.4236/jwarp.2016.812087.

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R. de; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A. de; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal Climatology**, v. 40, p. 2511-2526, 2020. DOI: 10.1002/joc.6347.

SALVADOR, M. d. A.; BRITO, J. I. B. de. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253-261, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.

SIMON, L. M., OLIVEIRA, G. D., BARRETO, B. D. S., NABOUT, J. C., RANGEL, T. F. L. V. B.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Effects of global climate changes on geographical distribution patterns of economically important plant species in Cerrado. **Revista Árvore**, v. 37, p. 267-274, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000200008.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; NETO, A. A. M.; RODRIGUES, D. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, 100931, 2021. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100931.

TAVARES, P.; ACOSTA, R.; NOBRE, P.; RESENDE, N. C.; CHOU, S. C.; LYRA, A. A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5° C and 2.0° C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, 40, 2023a. DOI: 10.1007/s10113-023-02042-1.

TAVARES, P. S.; PILOTTO, I. L.; CHOU, S. C.; SOUZA, S. A.; FONSECA, L. M. G. Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta com correção de viés. **Repositório LattesData**, v. 1, 2023b. DOI: 10.57810/lattesdata/WAVGSL.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. M.; SIMÕES, P. A.; ZERI, M. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 2173-2190, 2023. DOI: 10.1007/s11069-022-05759-0.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, p. 1033-1043, 2010a. DOI: 10.1175/2010JHM1224.1.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation

evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696-1718, 2010b. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010. DOI: 10.1175/2010JCLI3679.1.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

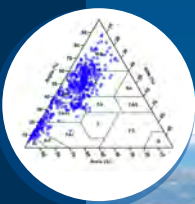
CAPÍTULO 13

Funções de Pedotransferência para a Estimativa de Parâmetros Físico-Hídricos do Solo do Bioma Cerrado

Mariana Faria Veloso

Lineu Neiva Rodrigues

Marta Vasconcelos Ottoni



13.1 Introdução

A carência de dados, de parâmetros e de informações hidroclimáticas representativos do bioma Cerrado tem limitado a utilização de modelos de simulação, o que muitas vezes leva à simplificação dos processos de tomada de decisão, trazendo incertezas no planejamento e gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas do bioma (Rodrigues, 2016).

Dentre os dados necessários na modelagem e simulação de processos hidrológicos, destacam-se os parâmetros físico-hídricos do solo, como os teores de água e a condutividade hidráulica do solo saturado. Esses parâmetros são essenciais na compreensão da dinâmica de água na zona vadosa dos solos.

A estimativa dessas propriedades físico-hídricas, entretanto, apresenta dependência de rotinas trabalhosas para aquisição dos dados, inviabilizando, muitas vezes, a sua obtenção, principalmente quando se deseja representar grandes áreas, como é o caso do bioma Cerrado. Além disso, à medida que a análise passa do nível macrorregional para o local, aumentando a escala de trabalho, há necessidade de maior detalhamento das amostragens, aumentando o esforço e o custo do trabalho.

A falta desses dados na escala apropriada oportuniza a utilização de funções de pedotransferência (FPTs), que são funções que possibilitam estimar propriedades do solo utilizando outros parâmetros do solo de mais simples obtenção e acessível custo, como são os casos dos teores granulométricos, teor de matéria orgânica, densidade do solo, densidade de partícula e entre outros (Pachepsky; Rawls, 2004).

A precisão e confiabilidade das FPTs dependem das características do conjunto de dados (escala, variáveis preditoras, tamanho da amostra, heterogeneidade etc.) e das técnicas utilizadas. Nos últimos anos, vários métodos têm sido utilizados para o desenvolvimento das FPTs. Na literatura, é verificado que a técnica de regressão linear múltipla tem sido uma das mais empregadas, mas atualmente, tem ganhado

forças os métodos de aprendizado de máquina, que são modelos mais complexos, capazes de realizar análises não lineares entre as variáveis envolvidas (Araya; Ghezzehei, 2019; Veloso et al., 2022; Veloso et al., 2023).

13.2 Solos do Cerrado

Os solos desempenham funções primordiais como filtro e regulador da água de chuva e da recarga de aquíferos. Além disso, condicionam o tipo de vegetação e são indicadores das atividades antrópicas e da interação entre sua conservação e a dos recursos hídricos (Campos; Freitas-Silva, 1998).

Com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o Cerrado apresenta um total de 12 classes de solos, e a sua distribuição espacial pode ser observada na Figura 13.1 em conjunto com as áreas de corpos hídricos, afloramentos rochosos e dunas, sendo estas representadas pela classe “Outros”.

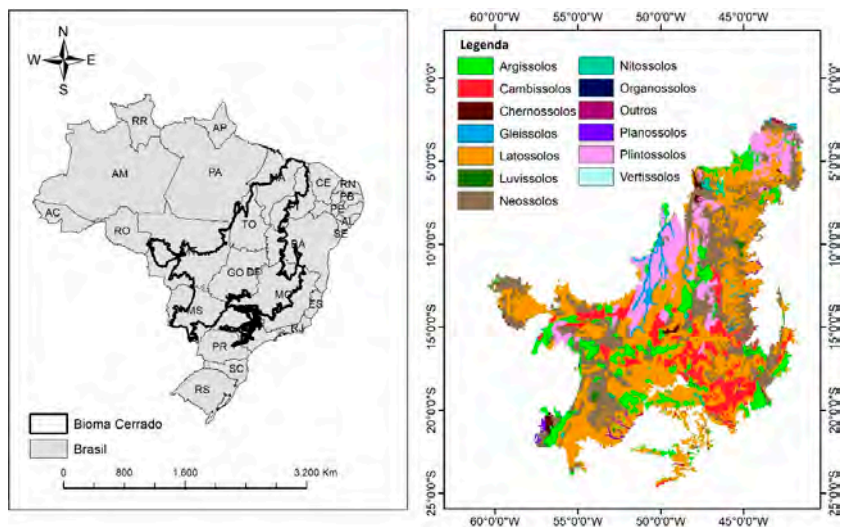


Figura 13.1. Localização e classes de solo predominantes do bioma Cerrado.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

Ocupando cerca de 793.488,88 km², ou seja, 39,8% do bioma, o Latossolo é a classe de solo predominante do Cerrado, seguida pelos Neossolos com aproximadamente 24,3% da área do Cerrado (Tabela 13.1).

Tabela 13.1. Classes de solos e seus respectivos valores de área ocupada no bioma Cerrado.

Classe de solo	Área (km ²)	Área (%)
Latossolos	793.488,88	39,8
Neossolos	484.808,99	24,3
Argissolos	231.110,81	11,6
Plintossolos	227.310,19	11,4
Cambissolos	172.780,61	8,7
Gleissolos	34.732,79	1,7
Nitossolos	13.434,29	0,7
Chernossolos	13.316,31	0,7
Planossolos	10.073,09	0,5
Outros	9.164,05	0,5
Luvissolos	8.203,82	0,4
Vertissolos	1.374,77	0,1
Organossolos	150,12	0,1
Soma	1.999.948,73	100,00

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

Os Latossolos são solos profundos, com boa drenagem, apresentando um avançado estágio de intemperização. Contudo, a baixa fertilidade proveniente da deficiência nutricional, acidez e elevada saturação de alumínio e ferro requerem, de modo geral, a adoção de práticas conservacionistas que visam a utilização do solo para a agricultura (Santos et al., 2018). Em contrapartida, os Neossolos são solos pouco evoluídos, constituídos basicamente por material mineral ou orgânico, devido à baixa intensidade dos processos pedogenéticos (Santos et al., 2018).

Segundo Ferreira (1988), os Latossolos brasileiros apresentam um aumento da taxa de infiltração à medida que os teores de argila aumentam no solo. Silva e Kato (1997) acrescentam que esse comportamento se deve à estrutura dos Latossolos, principalmente aos maiores valores de macroporosidade e pela estabilidade dos agregados dada à presença dos óxidos de ferro e alumínio.

Sendo assim, os Latossolos brasileiros fogem às generalizações, tendo em vista que os solos arenosos possuem maior quantidade de macroporos, condutividade hidráulica e taxas de infiltração. Diante disso, as FPTs desenvolvidas em climas temperados, que constituem em sua maioria na literatura, apresentando solos bem menos intemperizados e similares aos solos arenosos, quando aplicadas em solos tropicais podem não representar as reais características dos locais em estudo (Tomasella et al., 2000; Gunarathna et al., 2019), principalmente em regiões com a predominância de Latossolos.

Veloso et al. (2022) desenvolveram FPTs para o Cerrado utilizando uma base de dados com mais de 500 amostras de solos espalhadas pelo bioma, com percentuais elevados de areia e argila, sendo a maioria classificados como argiloso e franco argilo-arenoso (Figura 13.2).

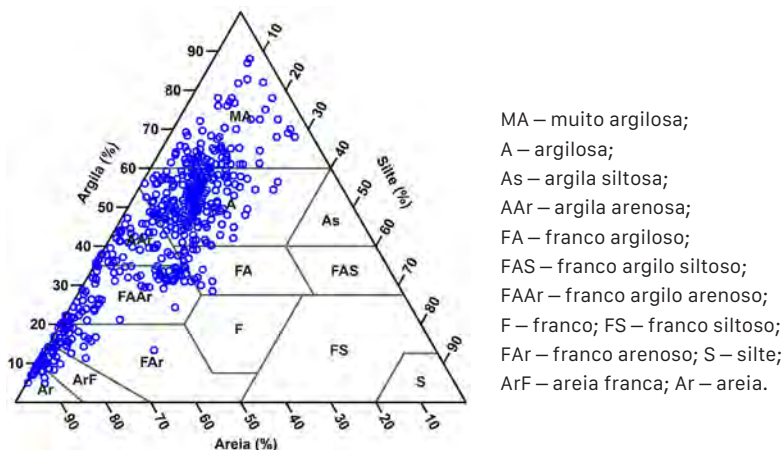


Figura 13.2. Triângulo textural das amostras de solos do bioma Cerrado.

Fonte: Adaptado de Veloso et al. (2022).

De acordo com Veloso et al. (2022), essas amostras apresentaram valores médios para as frações areia, silte e argila iguais a 41,1, 16,7 e 42,1%, respectivamente. Já a densidade do solo e a densidade de partícula apresentaram valores médios iguais a 1,37 e 2,61 g cm⁻³, respectivamente. A umidade do solo na capacidade de campo (CC), equivalente ao teor de água no solo na tensão de 10 kPa, e no ponto de murcha permanente (PMP), teor de água na tensão de 1500 kPa, apresentaram valores médios iguais a 0,364 e 0,285 m³ m⁻³, tendo as suas variações de valores apresentadas na Figura 13.3A, em que a CC apresentou valores na faixa de 0,148 e 0,505 m³ m⁻³ e os valores de PMP variaram entre 0,098 e 0,435 m³ m⁻³.

Com base ainda nas amostras de solo utilizadas por Veloso et al. (2022), na Figura 13.3B, apresenta-se a variação da disponibilidade total de água no solo (DTA), com valores variando na faixa de 0,32 e 3,98 mm cm⁻¹, e média igual a 1,49 mm cm⁻¹. Vale ressaltar que à medida que a textura do solo se torna mais fina (solos mais argilosos), a tendência é ocorrer um aumento na DTA.

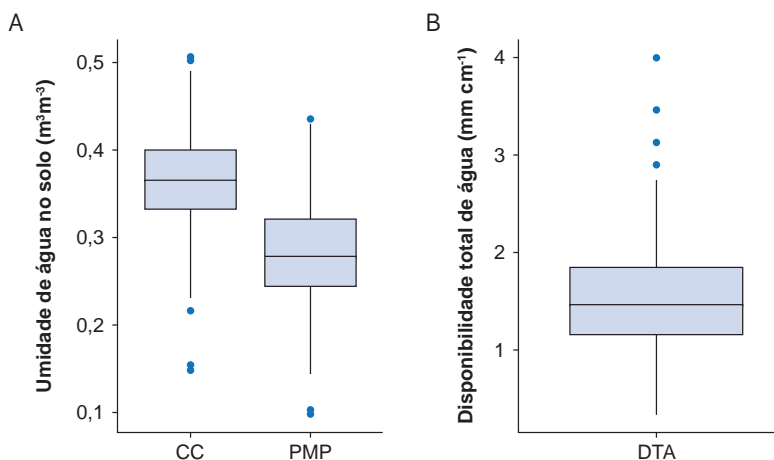


Figura 13.3. Boxplot dos valores da capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) (A); disponibilidade total de água (DTA) (B).

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) variaram de 0,19 a 246,25 mm h^{-1} , com média igual a 34,01 mm h^{-1} , mediana igual a 14,57 mm h^{-1} e um Coeficiente de Variação (CV) igual a 138,49%, o que pode ser explicado pela alta variabilidade espacial e temporal inerente a esse parâmetro do solo (Baiaomonte et al., 2017; Hirmas et al., 2018; Ottoni et al., 2019). Veloso et al. (2022) comentam que essa alta variabilidade de K_s dificulta a obtenção de FPTs representativas dos solos do Cerrado.

13.3 Funções de pedotransferência para o bioma Cerrado

Na literatura, podem ser encontradas algumas FPTs desenvolvidas para o Brasil. Tomasella et al. (2000) propuseram FPTs para a estimativa de curvas de retenção de água do solo baseadas no modelo de van Genuchten. Benites et al. (2006) elaboraram FPTs para a predição da densidade dos solos brasileiros. Ottoni et al. (2019) desenvolveram FPTs para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado em solos internacionais (brasileiros e europeus). Barros et al. (2013) construíram FPTs para a região nordeste do país e Kotlar et al. (2020) para os solos siltosos da região amazônica. Esses trabalhos representaram um avanço para a caracterização físico-hídrica de solos no Brasil; entretanto, as funções de pedotransferência desenvolvidas nesses estudos ainda carecem de verificações, principalmente quanto às suas incertezas.

No caso do Cerrado, algumas FPTs foram elaboradas para a estimativa de parâmetros do solo da região. Veloso et al. (2022, 2023) trabalharam com os dados de solos do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Embrapa Cerrados e do Hybras (Ottoni et al., 2018) para gerar FPTs para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, umidade do solo em diferentes tensões matriciais e parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten.

As FPTs foram desenvolvidas considerando diferentes conjuntos de variáveis preditoras, como percentuais de areia, silte e argila, densidade do solo e de partículas, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, além das umidades na CC (teor de água no solo na tensão de 10kPa) e PMP (teor de água no solo na tensão de 1.500 kPa).

Veloso et al. (2022, 2023) utilizaram a regressão linear múltipla e algoritmos de aprendizado de máquina para o desenvolvimento das FPTs. Verificou-se um melhor desempenho nos algoritmos *Random Forest* e *Support Vector Regression* nas estimativas de Ks, umidades nas tensões de 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa, e parâmetros de van Genuchten (umidade de saturação, umidade residual, α e n) quando comparado a outros modelos de aprendizado de máquina e à regressão linear múltipla.

Nas Tabelas 13.2, 13.3 e 13.4, são apresentadas as FPTs, obtidas por regressão linear múltipla para o Cerrado, para estimativa da Ks, umidades do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa, e parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (Veloso, 2021; Veloso et al., 2023).

Tabela 13.2. Funções de pedotransferência para a estimativa de Ks para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² ⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\log(k_s) = -4.254974 - 1.406278(\log(\text{Silte})) - 10.335965(\log(D_s))$	0,36	0,59	-0,01
$\log(k_s) = 3.798054 - 7.860309(\log(D_s)) - 5.236486 \theta_{1.500}$	0,42	0,56	0,01

⁽¹⁾ Ks = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h⁻¹); $\theta_{1.500}$ = umidade do solo na tensão de 1500 kPa (m³ m⁻³); Silte (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso (2021).

Tabela 13.3. Funções de pedotransferência para a estimativa da umidade do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² ⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_0 = 0,3174383 - 0,0730122(\log(\text{Areia})) - 1,0636051(\log(\text{Ds})) + 1,0621988(\log(\text{Dp})) - 0,022102(\log(\text{Macro}))$	0,71	0,03	-0,01
$\theta_6 = -1,0186139 + 0,248967(\log(\text{Argila})) + 0,6977942(\log(\text{Dp})) + 0,4748349(\log(\text{Pt})) - 0,1003896(\log(\text{Macro}))$	0,65	0,03	0,02
$\theta_{10} = -0,4836716 + 0,1764649(\log(\text{Argila})) + 0,1785483(\log(\text{Ds})) + 0,3710038(\log(\text{Micro})) - 0,0504698(\log(\text{Macro}))$	0,64	0,04	-0,01
$\theta_{33} = -0,50243206 + 0,3031745(\log(\text{Argila})) + 1,02206019(\log(\text{Ds})) - 0,08008585(\log(\text{Macro}))$	0,56	0,05	0,01
$\theta_{100} = -0,56801394 + 0,19508774(\log(\text{Argila})) + 0,6912217(\log(\text{Dp})) + 0,21932143(\log(\text{Micro})) - 0,06917081(\log(\text{Macro}))$	0,64	0,04	0,01
$\theta_{1.500} = -0,24688953 + 0,04792146(\log(\text{Silte})) + 0,22503525(\log(\text{Argila})) + 0,4445548(\log(\text{Dp})) - 0,08125156(\log(\text{Macro}))$	0,58	0,04	-0,01
$\theta_0 = 0,1814579 - 1,088485(\log(\text{Ds})) + 0,8529062(\log(\text{Dp})) + 0,3163872 \theta_{1.500}$	0,77	0,03	-0,01
$\theta_6 = -0,07549893 + 0,06060497(\log(\text{Argila})) + 1,19910227 \theta_{10} - 0,27752582 \theta_{1.500}$	0,89	0,02	0,02
$\theta_{10} = -0,19465425 - 0,03766904(\log(\text{Silte})) + 0,2389363(\log(\text{Micro})) + 0,79487795 \theta_{1.500}$	0,85	0,03	0,01
$\theta_{33} = 0,04195487 + 0,23929856 \theta_{10} + 0,75331832 \theta_{1.500}$	0,95	0,02	0,01

Continua...

Tabela 13.3. Continuação.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_{100} = -0,1098622 + 0,2690601(\log(Dp)) + 0,3614433 \theta_{10} + 0,6516879 \theta_{1.500}$	0,95	0,02	0,01
$\theta_{1.500} = -0,02612024 + 0,0414105(\log(Silte)) + 0,06193916(\log(Argila)) - 0,08934998(\log(Micro)) + 0,83206566 \theta_{10}$	0,82	0,03	-0,01

⁽¹⁾ θ_s , θ_{10} , $\theta_{1.500}$, $\theta_{0,6}$, $\theta_{10,33}$ e θ_{100} = umidades do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100, e 1500 kPa, respectivamente (cm³ cm⁻³); Areia (%); Silte (%); Argila (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³); Dp = densidade de partículas (g cm⁻³); Pt = Porosidade total (%); Micro = microporosidade (%); Macro = macroporosidade (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso (2021).

Tabela 13.4. Funções de pedotransferência para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_s = -0,5486392 - 0,7762026(\log(Ds) + 0,800532\log(Dp))$	0,62	0,02	-0,01
$\theta_r = -8,83933 + 2,7462026(\log(Areia) + 1,310042(\log(Argila) + 1,029454\log(Macro)))$	0,21	0,09	0,01
$\theta = -0,974911 + 0,3520109(\log(Silte) + 0,5497387\log(Macro))$	0,15	0,61	0,06
$n = 0,74627149 - 0,0031476(\log(Silte) - 0,33812542\log(Micro))$	0,11	0,15	-0,01

⁽¹⁾ θ_s = umidade de saturação (m³ m⁻³); θ_r = umidade residual (m³ m⁻³); α , n = parâmetros de ajuste (adimensional); Areia (%); Silte (%); Argila (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³); Dp = densidade de partículas (g cm⁻³); Micro = microporosidade (%); Macro = macroporosidade (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso et al. (2023).

Um dos pontos importantes das FPTs desenvolvidas por Veloso (2021) é a opção de utilizar as umidades na capacidade de campo ($CC - \theta_{10}$) e ponto de murcha permanente ($PMP - \theta_{1500}$) como variáveis nas equações (Tabela 13.2), já que esses teores de água no solo são mais comumente obtidos em laboratório, podendo tornar a estimativa dos parâmetros do solo mais precisos, conforme foi verificado no aumento dos valores de R^2 . Gunarathna et al. (2019), Veloso et al. (2022, 2023) também utilizaram esses teores de água na CC e PMP nos modelos de aprendizado de máquina, destacando a importância dessas variáveis no desempenho dos modelos.

Quanto às FPTs desenvolvidas para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, a umidade residual, α e n apresentaram baixos desempenhos. Veloso et al. (2023) ressaltam a dificuldade de ajustar essas funções, em que as características inerentes desses parâmetros do solo dificultam o desenvolvimento dos modelos, mesmo utilizando técnicas como o aprendizado de máquina.

Medrado e Lima (2014) também desenvolveram FPTs para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para o Cerrado. Os autores utilizaram um banco de dados de 413 amostras, totalizando 1401 camadas de solo. O desempenho dessas FPTs foi avaliado estatisticamente e sua eficiência comparada com a FPT de Tomasella et al. (2000). Por fim, as FPTs desenvolvidas foram superiores em 70% quando comparadas ao modelo de Tomasella considerando a estatística p -value.

Outras FPTs para o Cerrado podem ser encontradas na literatura, como Rodrigues et al. (2011), que desenvolveram FPTs para a estimativa da CC (teor de água no solo na tensão de 6 kPa), PMP (tensão de água no solo na tensão de 1500 kPa) e densidade do solo para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, localizada no Distrito Federal, utilizando 891 amostras de 92 perfis de solo. Já Rodrigues e Maia (2011) utilizaram o mesmo banco de dados do trabalho de Rodrigues et al. (2011) para desenvolver as FPTs para a estimativa da K_s e as umidades de saturação e residual para a mesma bacia hidrográfica. As FPTs de-

envolvidas por Rodrigues et al. (2011) e Rodrigues e Maia (2011) são apresentadas nas Tabelas 13.5 e 13.6, respectivamente.

Tabela 13.5. Funções de pedotransferência para a estimativa do ponto de murcha permanente, capacidade de campo e densidade do solo para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² (²)
$CC = 0,8 - 0,3711 DG + 0,0010 AG - 0,0006 AF$	0,58
$PMP = 0,3451 - 0,1369 DG + 0,0106 MO + 0,0007 ARG - 0,0007 SLT$	0,59
$DG = 1,1153 - 0,0016 ARG - 0,0208 MO - 0,0018 SLT$	0,10

⁽¹⁾ CC = capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$); PMP = ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); DG = densidade do solo ($g cm^{-3}$); MO = matéria orgânica (%); ARG = argila (%); SLT = silte (%); AG = argila grossa (%); AF = argila fina (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

Fonte: Rodrigues et al. (2011).

Tabela 13.6. Funções de pedotransferência para a estimativa da Ks, umidade de saturação e umidade residual para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² (²)	RMSE(³)
$K_s = 1,4064 - 0,8527 DG + 0,0011 SLT$	0,30	274,77
$\theta_s = 0,3442 - 0,1372 DG + 0,0105 MO + 0,0007 ARG - 0,0007 SLT$	0,90	0,02
$\theta_r = 1673,84 - 1576,94 DG + 3,84 AF - 19,67 AG$	0,59	0,02

⁽¹⁾ Ks = condutividade hidráulica do solo saturado ($mm h^{-1}$); θ_s = umidade de saturação ($g g^{-1}$); θ_r = umidade residual ($g g^{-1}$); DG = densidade do solo ($g cm^{-3}$); MO = matéria orgânica (%); ARG = argila (%); SLT = silte (%); AG = argila grossa (%); AF = argila fina (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

Fonte: Rodrigues e Maia (2011).

O desenvolvimento de FPTs na escala microrregional tende a ser mais preciso quando aplicado à área de estudo para a qual a FPT foi desenvolvida. Contudo, a grande variabilidade das características do solo do bioma Cerrado pode dificultar o desenvolvimento preciso dessas FPTs, como foi verificado por Rodrigues e Maia (2011).

Já Rosseti et al. (2022) desenvolveram FPTs para a estimativa da CC (teor de água no solo na tensão de 33 kPa) e PMP (teor de água no solo na tensão de 1500 kPa) para os solos do Cerrado localizados no Sul do estado do Mato Grosso. Os autores utilizaram 156 amostras de solo para o desenvolvimento das FPTs e estudaram a aplicação de FPTs da literatura desenvolvidas para o Brasil e no mundo. A conclusão dos autores foi que as FPTs desenvolvidas para a área de estudo apresentaram melhores desempenhos quando comparadas àquelas FPTs publicadas na literatura.

Na Tabela 13.7, são apresentadas as FPTs desenvolvidas por Rosseti et al. (2022) para a estimativa da CC e PMP para os solos do Sul do estado Mato Grosso.

Tabela 13.7. Funções de pedotransferência para a estimativa da CC e PMP do sul do estado Mato Grosso.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾
CC = 0,264 – 0,002 Areia + 0,024 TOC + 0,002 Argila	0,94	0,04
CC = 0,057 – 0,001 Areia + 0,743 Micro	0,98	0,03
PMP = 0,386 – 0,004 Areia – 0,002 Argila	0,94	0,02
PMP = 0,568 – 0,003 Areia – 0,001 Argila – 0,281 Tp – 0,069 Ds + 0,005 TOC	0,95	0,04

⁽¹⁾ CC = capacidade de campo (cm³ cm⁻³); PMP = ponto de murcha permanente (cm³ cm⁻³); Areia (%); Argila (%); Tp = Porosidade Total (cm³ cm⁻³); TOC = Carbono Orgânico Total (%); Micro = Microporosidade (cm³ cm⁻³).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

Fonte: Rosseti et al. (2022).

Nas Figuras 13.4 e 13.5, apresentam-se comparação dos valores do coeficiente de determinação (R²) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE), respectivamente, das FPTs da literatura desenvolvidas para a região do Cerrado.

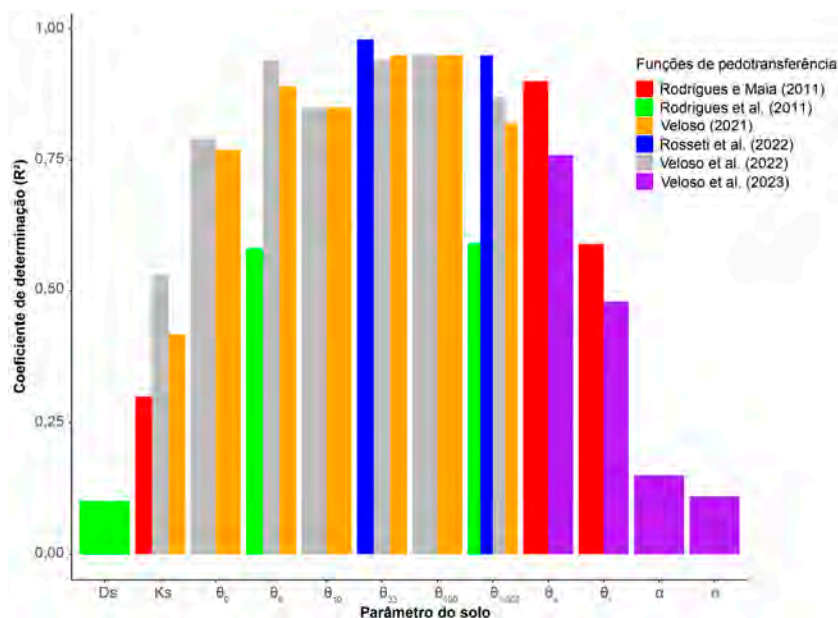


Figura 13.4. Comparação do coeficiente de determinação (R^2) das funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas no Cerrado e publicadas na literatura para a estimativa de parâmetros do solo.

Conforme verificado nos trabalhos de Rodrigues et al. (2011) e Veloso et al. (2022), as FPTs com piores desempenhos foram aquelas desenvolvidas para estimativa de K_s . Essas FPTs apresentaram valores de R^2 variando entre 0,30 e 0,42, e valores de RMSE maiores que 30 mm h^{-1} . Esse desempenho das FPTs foi observado mesmo quando se utilizou técnicas de aprendizado de máquina. As FPTs para estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, principalmente α e n , não apresentaram bom desempenho para o Cerrado, o que pode ser comprovado pelos altos valores de RMSE, que variaram entre 0,616 e 10,184 m para α , e 0,154 a 1,645 para o parâmetro n .

Em contrapartida, as FPTs para estimativa das umidades do solo nas diferentes tensões matriciais (0, 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa) apresentaram melhores desempenhos, com destaque para as FPTs de

Veloso (2021) e Veloso et al. (2022), valores de R^2 superiores a 0,75 e baixos valores de RMSE.

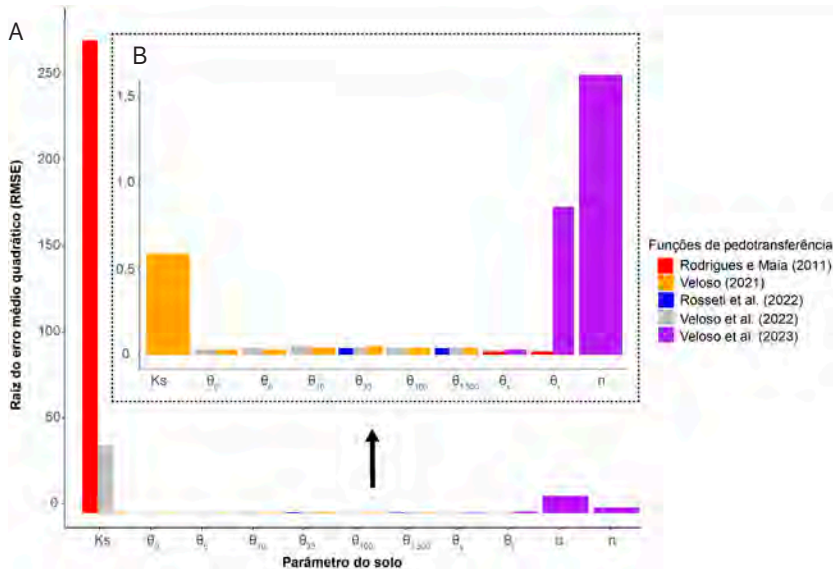


Figura 13.5. Comparação da raiz do erro médio quadrático (RMSE) das funções de pedotransferência desenvolvidas no Cerrado e publicadas na literatura para a estimativa de parâmetros do solo (A); detalhe ampliado da comparação das funções de pedotransferência com RMSE próximas de zero (B).

Além disso, as FPTs desenvolvidas para toda a extensão do Cerrado (Veloso, 2021; Veloso et al., 2022) apresentaram bons desempenhos quando comparadas às das FPTs calibradas para escala microrregional (Rodrigues e Maia, 2011; Rodrigues et al., 2011; Rosseti et al., 2022). Apesar da simplicidade da regressão linear múltipla, método utilizado por Veloso (2021), as FPTs que utilizaram esse método de ajuste apresentaram valores de R^2 relativamente próximos aos desenvolvidos por Veloso et al. (2022), que adotaram algoritmos de aprendizado de máquina.

A falta de planejamento é um dos gargalos para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Cerrado. A utilização das FPTs

nos modelos de simulação pode contribuir para melhorar o planejamento e a gestão de recursos hídricos. Para isso, entretanto, é fundamental entender como essas FPTs se comportam nesse ambiente. Neste sentido, utilizou-se três FPTs para estimativa da CC e PMP, que consequentemente permite obter a demanda hídrica, que no caso foi aplicado para a cultura do milho. Os dados utilizados na simulação são apresentados na Tabela 13.8.

Tabela 13.8. Características do solo, da cultura e as funções de pedotransferência utilizadas no cálculo da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente para estimativa da demanda hídrica da cultura de milho.

Característica do solo ⁽¹⁾	Cultura	Funções de pedotransferência
Ds = 1,3 g cm ⁻³ Dp = 2,7 g cm ⁻³ Argila: 42% Silte: 19% Areia Total: 39% Areia Grossa: 5% Areia Fina: 34% MO: 3,5% Microporosidade: 39% Macroporosidade: 16%	Milho Data de plantio: 01/04/2023 Duração do ciclo da cultura: 90 dias Profundidade efetiva do sistema radicular: 50 cm Fator de Disponibilidade de Água no Solo (f): 0,5	Veloso (2021) (Tabela 13.3) Rodrigues et al. (2011) (Tabela 13.5) Rosseti et al. (2022) (Tabela 13.7)

⁽¹⁾ Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; MO = matéria orgânica.

Utilizando a FPT apresentada por Rodrigues et al. (2011), a demanda hídrica da cultura do milho foi de 28,3 mm, ou seja, 283,2 m³ ha⁻¹. Para as FPTs de Veloso (2021), a demanda calculada foi de aproximadamente 25,6 mm (256,9 m³ ha⁻¹), um valor relativamente próximo ao obtido por Rodrigues et al. (2011). Já quando se aplicam as FPTs de Rosseti et al. (2022) na estimativa da CC e PMP, essa demanda praticamente dobra, obtendo-se um valor de aproximadamente 52,5 mm (525,7 m³ ha⁻¹).

Os resultados obtidos indicam a variabilidade que se pode obter nas simulações utilizando FPTs. Assim, deve-se ter uma atenção especial ao se utilizar essas funções na simulação, mesmo na fase de planeja-

mento. Recomenda-se, sempre que possível, utilizar várias FPTs nas simulações e apresentar os seus diversos cenários, como por exemplo, a aplicação dessas FPTs em modelos de simulações mais completos que permitem avaliar as incertezas espaciais e temporais das FPTs no manejo de irrigação. Além disso, ressalta-se a importância de validar essas estimativas com dados locais das áreas em estudo, tendo em vista a alta variabilidade dos dados de solo observados para o Cerrado.

13.4 Considerações finais

Os estudos de funções de pedotransferência desenvolvidos para o Cerrado representam um avanço para a caracterização físico-hídrica dos solos do bioma. Algumas FPTs para o Cerrado apresentaram bons desempenhos de estimativa, com destaque para a predição da CC, PMP e demais teores de água, como as apresentadas por Rosseti et al. (2022), Veloso (2021) e Veloso et al. (2022).

Já a condutividade hidráulica saturada foi o parâmetro do solo mais difícil de ser estimado com as FPTs, sua característica inerente como a alta variabilidade reflete na baixa e média capacidade preditiva das FPTs desenvolvidas para o Cerrado. Da mesma maneira, os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, principalmente α e n , apresentam baixas precisões em suas estimativas.

No entanto, mais estudos são necessários para aprimorar as FPTs desenvolvidas para o Cerrado, de forma a integrar outras propriedades do solo, mineralogia e manejo do solo, trazendo uma abordagem mais completa para o bioma.

13.5 Referências

ARAYA, S. N.; GHEZZEHEI, T. A. Using machine learning for prediction of saturated hydraulic conductivity and its sensitivity to soil structural perturbations. **Water Resources Research**, v. 55, n. 7, p. 5715–5737, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR024357>

BARROS, A. H. C.; LIER, Q. de J. van; MAIA, A. de H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 379-391, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/86806/1/2013AP09.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; LIMA, C. X. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 104). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/856032>.

CAMPOS, J. E. G.; FREITAS-SILVA, F. H. Geologia do Distrito Federal. In: INVENTÁRIO hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília, DF: Sematec: Iema: MMA-SRH, 1998, 86 p.

FERREIRA, M. M. **Influência da mineralogia na fração de argila nas propriedades físicas de Latossolos brasileiros**. 1988. 79 f. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GUNARATHNA, M. H. J. P.; SAKAI, K.; NAKANDAKARI, T.; MOMII, K.; KUMARI, M. K. N. Machine learning approaches to develop pedotransfer functions for tropical Sri Lanka soils. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1940, 2019.

HIRMAS, D. R.; GIMÉNEZ, D.; NEMES, A.; KERRY, R.; BRUNSELL, N. A.; WILSON, C. J. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle. **Nature**, v. 561, p. 100–103, 2018.

KOTLAR, A. M.; VAN LIER, Q. de J. BRITO, E. S. Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. **Geoderma**, v. 361, 114098, 2020.

MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59–66, Set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.08.003>.

OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345–1358, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.050>.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. de H. N. Funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada e as umidades de saturação e residual

do solo em uma bacia hidrográfica do Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. H. N.; SILVA, R. N.; Funções de pedotransferência para estimar capacidade de campo, ponto de murcha permanente e densidade global em solos de uma bacia hidrográfica do Bioma Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011.

RODRIGUES, L. N. Bacia experimental do Rio Buriti Vermelho, na ecorregião do Planalto Central. In: RODRIGUES, L. N.; SCHULER, A. E. (ed.). **Água: desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 233-255. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1145397/1/AGUA-Desafios-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-ed-01-2016.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

ROSSETI, R. A. C.; AMORIM, R. S. S.; DI RAIMO, L. A. Di L.; TORRES, G. N.; da SILVA, L. C. M.; ALVES, I. M. Pedotransfer functions for predicting soil-water retention under Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e02474, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02474>

SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGILO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTIN, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. de. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 13-20, 1997.

TOMASELLA, J., HODNETT, M.G., ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 327-338, 2000.

VELOSO, M. F. Desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimativa de propriedades físico-hídricas do solo do bioma Cerrado. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES FILHO, E. I. Evaluation of machine learning algorithms in the prediction of hydraulic conductivity and soil moisture at the Brazilian Savannah. **Geoderma Regional**, v. 30, e00569, 2022.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES FILHO, E. I.; VELOSO, C. F.; REZENDE, B. N. Pedotransfer functions for estimating the van Genuchten model parameters in the Cerrado biome. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 202-208, 2023.

CAPÍTULO 14

Erosividade da Chuva no Cerrado

David Bruno de Sousa Teixeira

Roberto Avelino Cecílio

Michel Castro Moreira

Gabrielle Ferreira Pires

Elpídio Inácio Fernandes Filho



14.1. Introdução

A erosão hídrica acarreta prejuízos ambientais, econômicos e sociais em todo o mundo. Entre os principais impactos, pode-se citar a perda do potencial produtivo das terras, o que reflete em menores produtividades e em um aumento dos custos de produção, reduzindo a lucratividade dos agricultores (Adimassu et al., 2017; Panagos et al., 2018; Chalise et al., 2019). Diante das estimativas de aumento na demanda global por alimentos ao longo das próximas décadas (Bodirsky et al., 2015; Davis et al., 2016; Natalini et al., 2019), as elevadas taxas de perda de solo no Brasil (Anache et al., 2017; Gomes et al., 2019; Steinmetz et al., 2018) se constituem como um desafio no que diz respeito à promoção da segurança alimentar atual e futura.

Dentre os agentes naturais capazes de promover a perda de solo, a água, através do impacto direto das gotas de chuva, bem como do escoamento superficial, se constitui como o principal agente indutor da erosão nos solos brasileiros (Oliveira et al., 2012; Anache et al., 2017). O fator climático conhecido como erosividade da chuva (RE), inserido nos principais modelos de predição de perda de solos (Wischmeier; Smith, 1978; Renard et al., 1991), expressa a capacidade que as precipitações possuem de causar erosão. Essa é uma das características da precipitação de maior importância para o planejamento e manejo conservacionista do solo e da água, estando presente nos principais modelos para estimativa da erosão hídrica, em especial a Equação Universal de Perda de Solo (USLE/RUSLE). O conhecimento da erosividade da chuva, bem como de sua variabilidade espacial, é fundamental para identificar áreas com maior potencial em sofrer erosão hídrica (Chalise et al., 2019; Liu et al., 2020).

Para a obtenção de valores de erosividades confiáveis, são necessárias séries históricas de dados pluviográficos, em escala sub-diária, com extensão mínima de 20 anos de dados consistentes e ininterruptos (Wischmeier; Smith, 1978). Estudos recentes deste tipo (Trindade et al., 2016; Oliveira et al., 2018; Cecílio et al., 2021; Teixeira et al., 2023)

utilizaram-se de longas séries pluviográficas (medidas ou sintéticas) para determinar a erosividade da chuva em algumas áreas sob Cerrado.

Como alternativa à falta de dados pluviográficos, médias históricas de totais mensais e anuais de precipitação podem ser usadas para estimar a RE a partir de equações empíricas. O uso desses modelos tem sido a alternativa mais comumente utilizada no país para se estimar a erosividade (Trindade et al., 2016; Almeida et al., 2017; Avanzi et al., 2019; Silva). Embora o uso destas equações se caracterize como uma forma prática para a realização de estimativas, o número reduzido de modelos gerados para o Brasil (Oliveira et al., 2018; Silva, 2004) tem levado à aplicação indistinta e generalizada das equações em locais com características climáticas diferentes daquelas para as quais foram ajustadas, acarretando na obtenção de valores de erosividade com grandes desvios em sua magnitude (Falcão; Duarte; Silva Veloso, 2020; Oliveira et al., 2018; Sousa; Paula, 2019).

Nesse contexto, a definição de regiões homogêneas em relação às características das precipitações (Fazel et al., 2018; Raziei, 2018; Fels et al., 2021), sobretudo em relação ao seu caráter erosivo, assume importância no intuito de facilitar a definição e a aplicabilidade de equações regionalizadas para a estimativa da erosividade da chuva (Teixeira et al., 2022a).

Este capítulo apresenta uma compilação e análise das informações atualmente existentes na literatura para estimativa da erosividade da chuva nas áreas sob Cerrado. No decorrer do texto, são apresentados os valores de erosividade da chuva disponíveis para este bioma. Além disso, são estabelecidas equações de regressão para estimar a RE a partir de dados pluviométricos, específicas para regiões homogêneas dentro do Cerrado. Estudos como este são fundamentais para programas de conservação do solo, uma vez que no Cerrado concentra-se boa parte da produção agrícola brasileira (Spera, 2017; Gomes et al., 2019).

14.2. Erosividade da chuva no Cerrado

14.2.1. Valores de erosividade da chuva

Utilizaram-se dados diários de total precipitado medidos em 887 estações pluviométricas, obtidos a partir do portal Hidroweb, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico¹⁰. Estabeleceu-se a extensão mínima das séries históricas igual a 10 anos, uma vez que a disponibilidade de dados para algumas localidades do Cerrado ainda é escassa (Silva, 2021).

Os dados pluviométricos diários de cada uma das estações foram inseridos no gerador climático estocástico ClimaBR 2.0, gerando séries sintéticas de dados pluviográficos em escala sub-diária, com extensão de 100 anos. Estas séries apresentam informações que caracterizam o perfil diário das chuvas, como o total precipitado diário e sua duração, a intensidade máxima instantânea de precipitação e seu tempo de ocorrência. O uso de séries sintéticas de chuva originárias do ClimaBR para a determinação da erosividade da chuva no Brasil foi anteriormente proposto e validado.

A partir das séries sintéticas de cada estação, a erosividade da chuva foi estimada com base nos critérios propostos por Wischmeier e Smith (1958) e Wischmeier (1959), modificados por Cabeda (1976). Para cada série pluviográfica, serão identificadas, dia por dia, as chuvas consideradas erosivas, ou seja, aquelas que apresentarem 10 mm ou mais de total precipitado. Também serão consideradas chuvas erosivas aquelas com total precipitado inferior a 10 mm quando a quantidade precipitada em 15 minutos for igual ou superior a 6 mm.

Identificadas as chuvas erosivas, será calculada a energia cinética (EC) da chuva, de minuto a minuto, utilizando a Equação 1 de Wischmeier e Smith (1958) reajustada ao Sistema Internacional de Unidades (Foster et al., 1981).

¹⁰ Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (1)$$

em que

EC = energia cinética ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).

I = intensidade da chuva (mm h^{-1}).

Quando a intensidade das chuvas da série for superior a 76 mm h^{-1} , a energia cinética adotada corresponde a $0,283 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Foster et al., 1981). A energia cinética associada à chuva de cada dia é calculada pelo somatório das energias cinéticas de cada minuto até totalizar a duração da chuva.

Para representar a erosividade da chuva, foi calculado o índice de erosividade EI_{30} , obtido a partir da Equação 2 de Wischmeier e Smith (1958). O EI_{30} é calculado pelo produto da energia cinética de cada chuva pela intensidade máxima de precipitação ocorrida em 30 minutos (I_{30}).

$$EI_{30} = EC \cdot I_{30} \quad (2)$$

em que

I_{30} = intensidade máxima média da chuva em 30 minutos consecutivos (mm h^{-1}).

O índice EI_{30} na escala mensal é determinado pelo somatório dos valores diários de erosividade, a partir das chuvas erosivas ocorridas em cada mês, divididos pelo número de anos da série (100 anos). Da somatória dos índices de erosividade EI_{30} médios de cada mês, são obtidos os valores da erosividade média anual (RE_{Anual}) para cada estação pluviométrica, como apresenta a Equação 3.

$$RE_{\text{Anual}} = \sum_{i=1}^{12} (EI_{30})_i \quad (3)$$

A RE anual média para o Cerrado foi aproximadamente igual a $6.859 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 14.1). Os valores de RE variaram de 685 a $18.622 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com coeficiente de variação (CV) de 44,2%, expressando considerável variabilidade da RE no Cerrado (Figuras 14.1 e 14.2). Os valores de RE observados no Cerrado foram semelhantes aos encontrados no estudo de Castagna et al. (2022).

Conforme ilustrado na Figura 14.1A, os maiores valores anuais de RE predominam nas áreas de Cerrado localizadas nas regiões Norte e Centro-Oeste. Por outro lado, os menores valores ficam na região Nordeste e seu entorno. De acordo com a classificação proposta por Carvalho (2008), a maior parte das estações (36,3%) possui RE anual classificada como “Moderada-Forte” (Figura 14.1B).

A erosividade média mensal variou de 68 a $1.128 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ para agosto e janeiro, respectivamente (Tabela 14.1). Os meses com maiores RE em cada estação foram abril, março e dezembro, com magnitudes superiores a $3.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$. De maio a agosto observam-se as maiores variabilidades na RE mensal para as estações do Cerrado (coeficiente de variação maior que 100%). Conforme ilustrado na Figura 14.3, este fato deve-se aos baixos valores de erosividade na maior parte da região, contrastados com os valores mais altos na porção norte do Cerrado, em especial no litoral maranhense.

Valores nulos de erosividade foram determinados entre os meses de junho e setembro (Tabela 14.1), em especial no sul do Piauí, oeste da Bahia e norte de Minas Gerais, nas quais há influência do clima semiárido.

Com respeito à dinâmica dos máximos RE mensais, a porção norte do Maranhão e Piauí apresentam altos valores de janeiro a maio. Nessas áreas, a chuva é fortemente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical, a qual é responsável por maiores totais precipitados, especialmente em março e abril (Silva et al., 2017; Oliva, 2019). Outro sistema atmosférico de relevância é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a qual é responsável pelos maiores valores de RE mensal nos estados do Sudeste e Centro-Oeste nos meses de verão (Alvarenga, 2012; Nielsen et al., 2016).

Tabela 14.1. Estatística descritiva da erosividade mensal e anual para o Cerrado, expressas em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (mês ou ano)⁻¹.

Estatística	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Média	1.128	1.002	1.028	603	296	108	70	68	182	497	834	1.042	6.859
DP	538	494	584	518	329	148	127	126	164	306	467	532	3.034
Mínimo	99	48	24	21	1	0	0	0	0	2	5	26	685
Máximo	2.984	2.656	3.126	3.802	2.361	1.339	1.484	1.541	1.793	1.830	2.464	3.008	18.622
Amplitude	2.885	2.608	3.102	3.780	2.360	1.339	1.484	1.541	1.793	1.828	2.459	2.982	17.936
Mediana	1.199	1.028	981	470	200	52	30	39	156	502	875	1.085	7.176
CV (%)	48	49	57	86	111	138	182	185	90	62	56	51	44

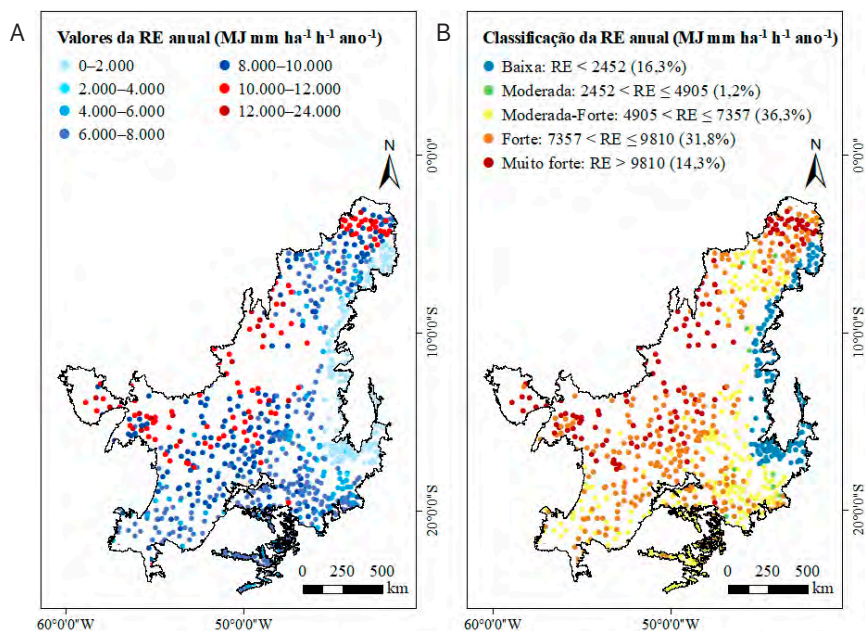


Figura 14.1. Erosividade de chuva (RE) no Cerrado: valores pontuais (A) e classificação de acordo com faixas de magnitude (B).

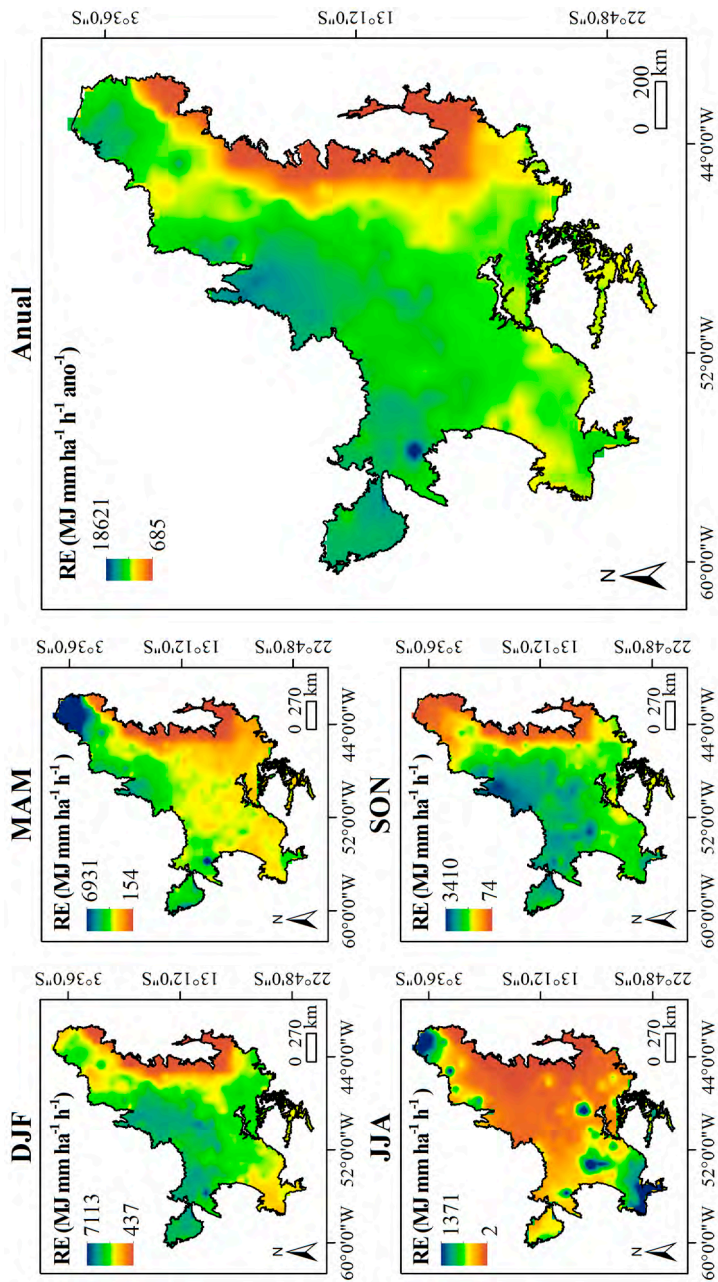


Figura 14.2. Erosividade da chuva (RE) média sazonal e anual para a região do Cerrado. DJF corresponde aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro; MAM corresponde aos meses de março, abril e maio; JJA corresponde aos meses de junho, julho e agosto; e SON corresponde aos meses de setembro, outubro, novembro.

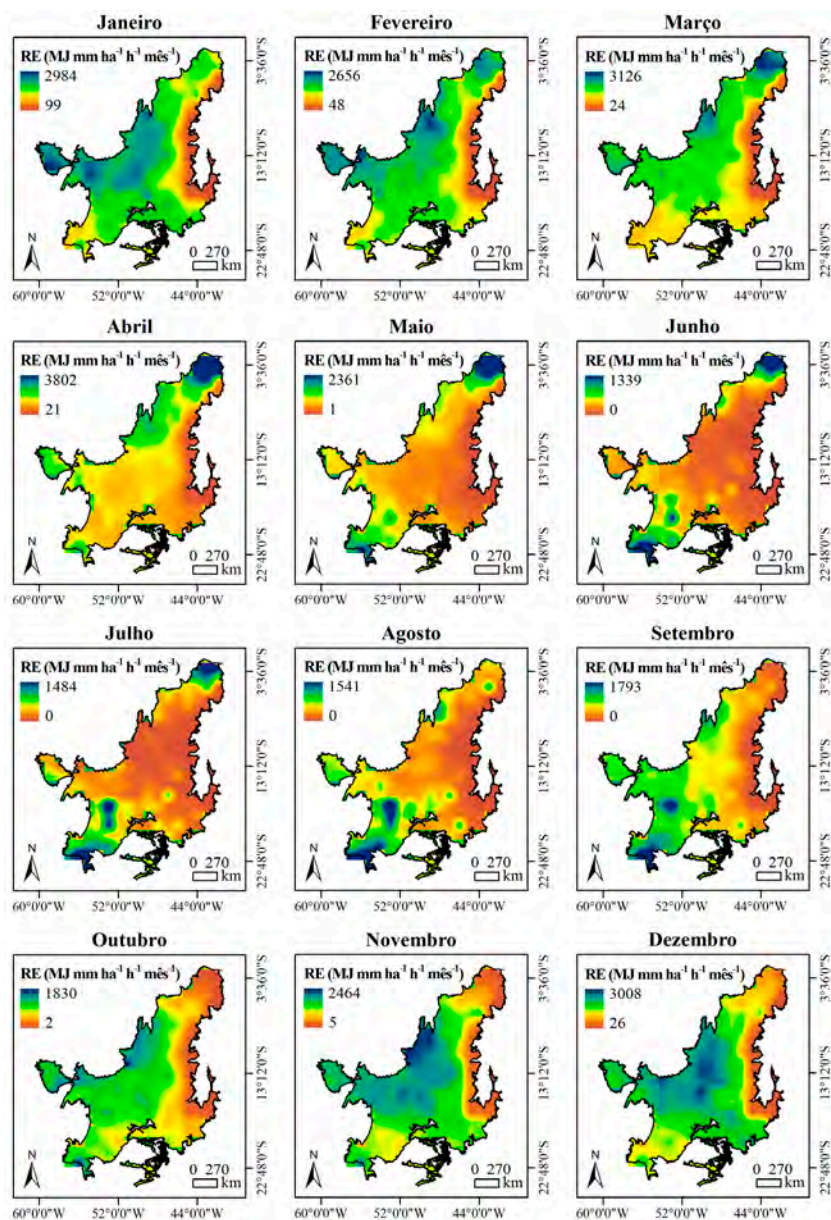


Figura 14.3. Erosividade da chuva (RE) média mensal para a região do Cerrado.

14.2.2. Regiões homogêneas e equações para estimativa da erosividade da chuva a partir de totais pluviométricos

Com o objetivo de estabelecer equações empíricas destinadas à estimativa da erosividade da chuva na região do Cerrado, foram utilizadas as regiões homogêneas (RH) com relação à erosividade estabelecidas por Teixeira et al. (2023) para o Brasil (Figura 14.4). Os autores empregaram estatísticas multivariadas, incluindo análise de componentes principais (ACP) e análise de agrupamento hierárquico (AAH), para definir essas regiões.

O Cerrado abrange parte das 11 regiões homogêneas definidas por Teixeira et al. (2023). Das 887 estações deste estudo, 70 (7,9%) estão na região A, 226 (25,5%) na região B, 140 (15,8%) na região C, e 451 (50,8%) na região D.

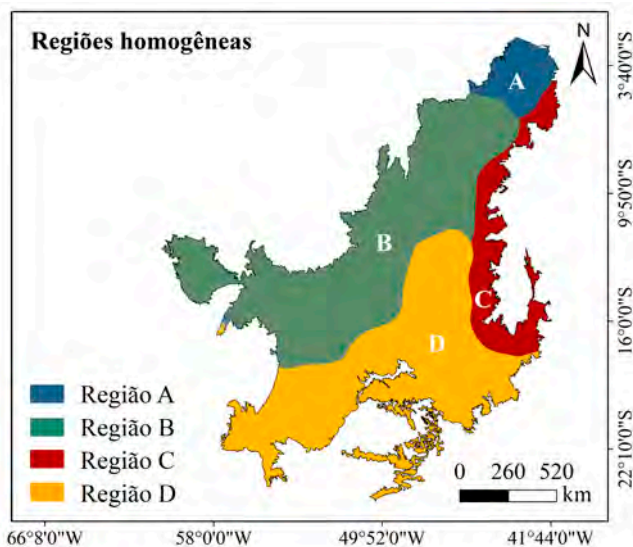


Figura 14.4. Regiões homogêneas com relação à erosividade da chuva.

Fonte: Teixeira et al. (2023).

Para cada região homogênea definida, foram estabelecidas equações de regressão para representar a relação entre os valores médios mensais de RE e o total precipitado médio mensal (R_i), bem como entre o RE e o índice de Fournier modificado (MFI). O MFI, obtido a partir da Equação 4, relaciona o total precipitado médio mensal com o médio anual.

$$MFI_i = \frac{(R_i)^2}{R_a} \quad (4)$$

em que

MFI_i = índice de Fournier modificado do mês i .

R_i = precipitação pluviométrica média mensal no mês i (mm).

R_a = precipitação pluviométrica média anual (mm).

Dois modelos gerais de equações de regressão foram ajustados: linear e potencial, conforme equações 5 e 6.

$$RE_m = \alpha + \beta (R_m) \text{ ou } RE_m = \alpha + \beta (MFI_m) \quad (5)$$

$$RE_m = \alpha (R_m)^\beta \text{ ou } RE_m = \alpha (MFI_m)^\beta \quad (6)$$

em que

RE_m = erosividade mensal da chuva para o mês m (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹).

R_m = total precipitado no mês m (mm).

MFI_m = índice de Fournier modificado para o mês (m).

α e β = coeficientes de regressão que descrevem a relação entre RE_m e R_m ou MFI_m .

As equações para estimativa do RE de melhor desempenho para cada região homogênea estão apresentadas na Tabela 14.2. O de-

sempenho das equações foi calculado a partir das estatísticas das Equações 7 a 11, separando-se 20% das estações de cada RH para teste.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|O_i - E_i|)}{n} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|O_i - E_i|}{O_i} \right)}{n} 100 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \quad (10)$$

$$PE = \left(\frac{O_i - E_i}{O_i} \right) 100 \quad (11)$$

em que

MAE = erro médio absoluto ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

$MAPE$ = erro médio percentual (%).

$RMSE$ = raiz do erro quadrático médio ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

d = índice de concordância de Willmott (adimensional).

PE = erro percentual (%).

O_i = valor de RE observado ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

\bar{O}_i = média dos valores observados de RE ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

E_i = valor de RE estimado usando a equação estabelecida ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

n = número de observações.

É observado que os melhores ajustes para as equações de regressão ocorreram nas situações em que o total precipitado médio mensal (R_m) é a variável independente. Considerando tanto as amostras de treinamento quanto de validação, os valores de R^2 das equações estabelecidas foram superiores a 0,90. Isso significa que, para a maior parte do Cerrado, os totais precipitados mensais explicam mais de 90% da variância da erosividade. Além disso, os valores do índice d foram superiores a 0,80, indicando ótima concordância entre os valores de RE observados e estimados.

Conforme ilustrado na Figura 14.5, os valores de RE estimados pelas equações da Tabela 14.2 apresentam erros percentuais inferiores a 10% para a maior parte do Cerrado. Maiores superestimativas ocorrem no extremo norte do Cerrado, na Região A, bem como na faixa central e no sudoeste da região D.

As equações estabelecidas para estimativa da RE a partir dos totais mensais precipitados representam um avanço significativo em termos de disponibilidade de modelos para essa estimativa. A histórica desigualdade na quantidade de estudos relacionados à erosividade da chuva nos estados brasileiros resultou em áreas com poucas informações e na ausência de equações para a estimativa da RE nessas regiões. Consequentemente, de acordo com (Teixeira et al., 2022b), a falta de equações para o cálculo da RE tem levado ao uso inadequado de equações empíricas em localidades diferentes daquelas para as quais essas equações foram estabelecidas. Por outro lado, em áreas com grande disponibilidade de equações empíricas, pode haver dificuldades na escolha das equações mais adequadas a serem utilizadas. Portanto, as equações regionalizadas apresentadas neste estudo podem contribuir para resolver esses problemas na área de abrangência do Cerrado.

Tabela 14.2. Equações para estimativa da erosividade da chuva estabelecidas para cada região homogênea (RH), e suas respectivas métricas estatísticas de desempenho. Os valores de *MAE* e *RMSE* são apresentados em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. *RE_i* e *R_v* e *MFI_i* são erosividade mensal e total precipitado mensal para o mês *i*, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e mm, respectivamente.

Região homogênea	Equação de regressão	Treina- mento	Teste		Todos os dados		
		R ² (¹)	R ²	MAE(²)	MAPE (%) ⁽³⁾	RMSE(⁴)	d ⁽⁵⁾
Região A	$RE_i = 4,1374 (R_i)^{1,0755}$	0,973	0,977	1.546,38	13,39	1.955,4	0,884
Região B	$RE_i = 4,4688 (R_i)^{1,0778}$	0,981	0,986	524,41	5,43	708,84	0,981
Região C	$RE_i = 1,4015 (R_i) - 5,2407$	0,980	0,983	51,34	5,30	71,62	0,980
Região D	$RE_i = 5,7928 (R_i) - 89,449$	0,927	0,923	597,41	13,46	933,29	0,930

(¹) R² é o coeficiente de determinação.
(²) MAE é o erro médio absoluto.
(³) MAPE é erro médio percentual.
(⁴) RMSE é a raiz do erro quadrático médio.
(⁵) d é o índice de concordância de Willmott (adimensional).

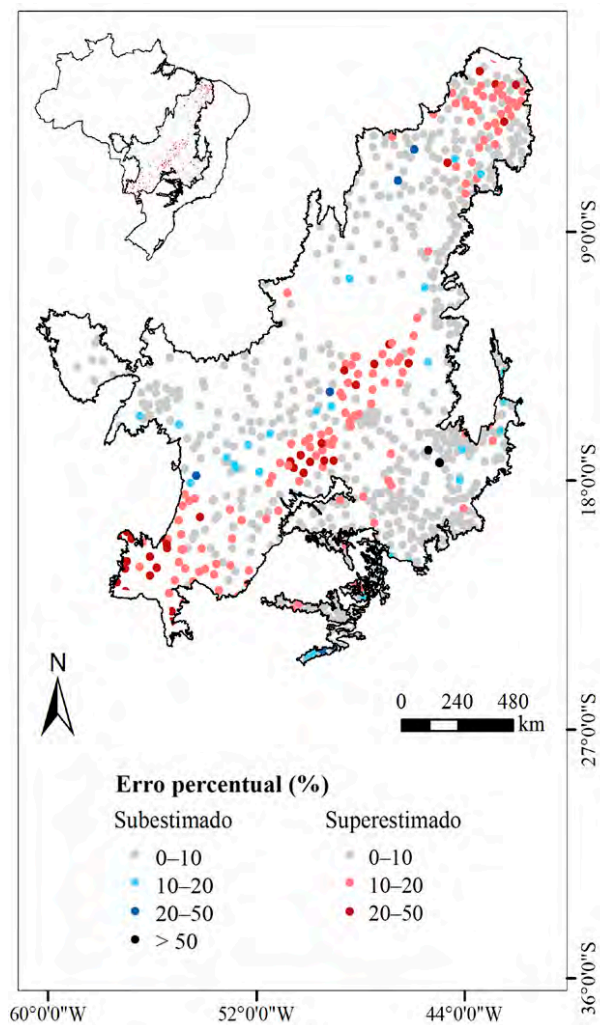


Figura 14.5. Erro percentual para estimativa da erosividade anual da chuva nas regiões homogêneas de abrangência no Cerrado.

14.3. Considerações finais

A RE anual no Cerrado varia de 685 a 18.622 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, com expressiva variabilidade espacial. As maiores magnitudes de RE são observadas na região oeste deste bioma, enquanto os menores valores se expressam na região leste, na faixa inserida no semiárido brasileiro. Em termos médios, a RE anual apresenta magnitude de 6.859 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Em relação à dinâmica mensal da RE no Cerrado, os meses de março e abril concentram os valores mais altos, enquanto os menores valores de RE são observados nos meses de junho e julho. Diante disso, os valores e mapas de RE apresentados neste estudo são relevantes para melhorar a precisão das estimativas de perda de solo no Cerrado brasileiro, uma vez que mostram um panorama do fenômeno da RE neste bioma.

A aplicação de técnicas estatísticas multivariadas resultou na divisão do Cerrado em quatro regiões homogêneas quanto aos padrões de RE. Para cada região definida, foi estabelecido um modelo de regressão regionalizado, e seu desempenho é considerado satisfatório para todas as regiões. Assim, os modelos aqui apresentados constituem um avanço quanto à possibilidade de estimar magnitudes de RE para todo o Cerrado, uma vez que podem ser utilizados para prever valores para um local ou período específico. Além disso, os modelos ajustados podem ser considerados de fácil utilização, uma vez que para a estimativa são necessários apenas valores mensais de precipitação.

Dessa forma, os resultados apresentados neste estudo constituem-se como ferramentas importantes para melhorar a disponibilidade dos valores de RE e para a melhoria dos programas de conservação do solo no Brasil, sobretudo em áreas com grandes produções agrícolas, como o bioma Cerrado.

14.4 Referências

- ADMASSU, Z.; LANGAN, S.; JOHNSTON, R.; MEKURIA, W.; AMEDE, T. Impacts of soil and water conservation practices on crop yield, run-off, soil loss and nutrient loss in Ethiopia: review and synthesis. **Environmental management**, v. 59, n. 1, p. 87-101, jan. 2017.
- ALMEIDA, A. Q. de; SOUZA, R. M. S.; LOUREIRO, D. C.; PEREIRA, D. DOS R.; CRUZ, M. A. S.; VIEIRA, J. S. Modelling the spatial dependence of the rainfall erosivity index in the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 371-379, jun. 2017.
- ALVARENGA, L. A. Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n. 2, p. 1-7, 2012.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: a meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29-39, maio 2017.
- AVANZI, J. C.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de.; GIONGO, M. V. Modeling of the rainfall and R-factor for Tocantins State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019.
- BODIRSKY, B. L.; ROLINSKI, S.; BIEWALD, A.; WEINDL, A.; POPP, A.; LOTZE-CAMPEN, H. Global food demand scenarios for the 21st century. **Plos One**, v. 10, n. 11, p. e0139201, nov. 2015.
- CABEDA, M. S. V. **Computation of storm EI value**. West Lafayette: Purdue University, 1976.
- CARVALHO, N. DE O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2008.
- CASTAGNA, D.; SOUZA, A. P. de; VENDRUSCULO, L. G.; ZOLIN, C. A. Rainfall erosivity in municipalities of the Brazilian Cerrado biome. **Nativa**, v. 10, n. 3, p. 373-386, 2022. DOI: 10.31413/nativa.v10i3.13913.
- CECÍLIO, R. A.; OLIVEIRA, J. P. B.; TEIXEIRA, D. B. de S.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S. Database of rainfall erosivity factor for 141 locations in Brazil. **Latin American Data in Science**, v. 1 , n. 3, p. 95-101, 2021.
- CHALISE, D.; KUMAR, L.; KRISTIANSEN, P. Land degradation by soil erosion in Nepal: a review. **Soil Systems**, v. 3, n. 1, p. 12, fev. 2019.

- DAVIS, K. F.; GEPHART, J. A.; EMERY, K. A.; LEACH, A. M.; GALLOWAY, J. N.; D'ODORICO, P. Meeting future food demand with current agricultural resources. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 125-132, jul. 2016.
- FELS, A. el A.; SAID, M el. M.; BOUIJI, A.; BENNHANEM, M. Rainfall regionalization and variability of extreme precipitation using artificial neural networks: a case study from western central Morocco. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 4, p. 1107-1122, jun. 2021.
- FALCÃO, C. J. L. M.; DUARTE, S. M. de A.; SILVA VELOSO, A. da. Estimating potential soil sheet erosion in a Brazilian semiarid county using USLE, GIS, and remote sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, p. 47, jan. 2020.
- FAZEL, N.; BERNDTSSON, R.; UVO, C. B.; MADANI, K.; K. B. Regionalization of precipitation characteristics in Iran's Lake Urmia basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 363-373, abr. 2018.
- FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.
- GOMES, L.; SIMOES, S. J. C.; NORA, F. L. D.; SOUSA-NETO, E. R. de; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v. 8, n. 1, p. 12, jan. 2019.
- LIU, B.; XIE, Y.; LI, Z.; LIANG, Y.; ZHANG, W.; FU, S.; YIN, S.; WEI, X.; ZHANG, K.; WANG, Z.; LIU, Y.; ZHAO, Y.; GUO, Q. The assessment of soil loss by water erosion in China. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 8, n. 4, p. 430-439, dez. 2020.
- NATALINI, D.; BRAVO, G.; JONES, A. W. Global food security and food riots – an agent-based modelling approach. **Food Security**, v. 11, n. 5, p. 1153-1173, out. 2019.
- NIELSEN, D. M.; CATALDI, M.; BELÉL, A. L.; ALBUQUERQUE, A. L. S. Local indices for the South American monsoon system and its impacts on Southeast Brazilian precipitation patterns. **Natural Hazards**, v. 83, n. 2, p. 909-928, set. 2016.
- OLIVA, F. G. Climatologia e variabilidade dos principais sistemas meteorológicos atuantes no Brasil, relação com chuvas intensas e impactos associados. **Revista da Pós-Graduação em Geografia da PUC-Rio**, v. 12, n. 23, p. 74-99, 2019.

OLIVEIRA, J. P. B. DE; CECILIO, B. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETE, S. S.; MOREIRA, M. C. Assessing the use of rainfall synthetic series to estimate rainfall erosivity in Brazil. **Catena**, v. 171, p. 327-336, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S. de; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2012.

PANAGOS, P.; STANDARLI, G.; BORRELI, P. LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; BOSELLO, F. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: from direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 3, p. 471-484, mar. 2018.

RAZIEI, T. A precipitation regionalization and regime for Iran based on multivariate analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 131, n. 3-4, p. 1429-1448, fev. 2018.

RENARD, K. G.; FORSTER, J. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. RUSLE: Revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 30-33, 1991.

SILVA NETO, V. L.; BATISTA, E. D.; LEAL JUNIOR, W. B.; FABRIS, V. B.; RODRIGUES, P. J. A. W. Distribuição espacial da erosividade das chuvas na bacia do Rio Manuel Alves da Natividade, Tocantins. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 141-160, 2020.

SILVA, A. M. da. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259, ago. 2004.

SILVA, D. S. dos S.; BLANCO, C. J. C.; SANTOS JUNIOR, C. S.; MARTINS, W. L. D. Modeling of the spatial and temporal dynamics of erosivity in the Amazon. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, n. 1, p. 513-523, mar. 2020.

SILVA, L. Monitoramento hidrometeorológico no Brasil: uma análise sob a ótica da coordenação de políticas públicas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 18, n. 1, p. 3- 0, mar. 2021.

SILVA, M. J.; GALVINCIO, J. D.; COSTA, V. S. O. Abordagem interdisciplinar sobre a influência da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT no nordeste brasileiro. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, v. 6, n. 1, p. 107-117, 2017.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de. Análise de perda do solo por erosão na bacia hidrográfica do Rio Coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, jul. 2019.

SPERA, S. Agricultural intensification can preserve the Brazilian Cerrado: applying lessons from Mato Grosso and Goiás to Brazil's last agricultural frontier. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 194008291772066, jan. 2017.

STEINMETZ, A. A.; ASSALHO, F.; CALDEIRA, T. L.; LIVEIRA, L. A. DE; BESKOW, S.; TIMM, L. C. Assessment of soil loss vulnerability in data-scarce watersheds in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 6, p. 575-587, dez. 2018.

TEIXEIRA, D. B. de S.; CECÍLIO, R. A.; OLIVEIRA, J. P. B. de; ALMEIDA, L. T. de; PIRES, G. F. Rainfall erosivity and erosivity density through rainfall synthetic series for São Paulo State, Brazil: assessment, regionalization and modeling. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 355-370, 2022a.

TEIXEIRA, D. B. de S.; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; PIRES, G. F.; FERNANDES FILHO, E. I. Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: A review. **Catena**, v. 219, p. 106572, 2022b.

TEIXEIRA, D. B. de S.; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; PIRES, G. F.; FERNANDES FILHO, E. I. Assessment, regionalization, and modeling rainfall erosivity over Brazil: findings from a large national database. **Science of The Total Environment**, v. 891, p. 164-557, set. 2023.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P.T. S. de; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2016.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equations. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 23, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 39, n. 2, p. 285, 1958.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning**. Washington, D.C. : USDA, 1978.

CAPÍTULO 15

Indicadores Ambientais para o Bioma Cerrado Analisados com Uso de Geotecnologias

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Janice Freitas Leivas

Celina Maki Takemura

Inajá Francisco de Sousa

André Quintão de Almeida



15.1 Introdução

Em várias partes do bioma Cerrado, as demandas hídricas e as populações estão crescendo sob condições insustentáveis de consumo dos recursos naturais. Os consequentes impactos têm sido geralmente medidos em escalas locais, entretanto, com o contínuo desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, estes podem ser atualmente analisados usando indicadores ambientais em largas escalas com precisões aceitáveis. Com os cenários de mudanças climáticas e de uso da terra, essas geotecnologias são poderosas ferramentas para o monitoramento dessas mudanças quando se almeja o desenvolvimento sustentável (Teixeira et al., 2020a, 2020b, 2021a, 2021b; Jardim et al., 2022).

As mudanças climáticas de uso da terra afetam os balanços de energia, água e carbono (Ceschia et al., 2010; Zhao; Running, 2010). A compreensão das respostas dos parâmetros hídricos e de vegetação, bem como das suas dinâmicas, é indispensável para o acesso a esses balanços (Yang et al., 2016; Zhang; Zhang, 2019). O bioma Cerrado tem uma larga diversidade de espécies naturais (Lewinsohn; Prado, 2005), mas sofre de vários impactos ambientais, tais como desflorestamento, queimadas, poluição do ar, da água e do solo, bem como a intensiva substituição das espécies naturais por culturas agrícolas (Giambelluca et al., 2009; Cabral et al., 2015; Arantes et al., 2015; Fernandes et al., 2018; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020; Santos et al., 2021). Esses impactos demandam estudos em larga escala para o consumo sustentável dos recursos naturais (Nuñez et al., 2017; Araujo et al., 2019; Santos et al., 2020; Teixeira et al., 2021a, 2021b; Jardim et al., 2022).

A quantificação dos componentes dos balanços de energia, de água e de carbono usando sensoriamento remoto e grades de dados climáticos nos agroecossistemas do bioma Cerrado é um meio viável para a elaboração de indicadores ambientais para suporte ao manejo racional dos seus recursos naturais. Dentre os indicadores, destaca-se a evapotranspiração (ET), pois representa o principal uso dos recursos

hídricos pela vegetação bem suprida de água e, em adição, está relacionada com a produção de biomassa (BIO) (Teixeira et al., 2020a, 2020b). Por um lado, embora com esta relação, o aumento da ET implica em menor disponibilidade hídrica para usos ecológicos e humanos. Por outro lado, a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas pode afetar a BIO (Ceschia et al., 2010). A quantificação desses efeitos e das dinâmicas ao longo dos anos é essencial para restaurações ecológicas e acesso à dimensão dos impactos ambientais (Yang et al., 2016; Zhang; Zhang, 2019).

Algumas medições dos componentes dos balanços de energia, água e carbono em campo já foram realizadas por diferentes métodos no bioma Cerrado (Giambelluca et al., 2009; Cabral et al., 2015; Fernandes et al., 2018). Entretanto, poucos esforços foram realizados para utilização de indicadores ambientais em larga escala nesse bioma. Em adição, medições pontuais não são viáveis para essa finalidade, devido às largas variações nas condições climáticas nos diferentes agroecossistemas do bioma. Devido a essas limitações, a extrapolação desses indicadores através de geotecnologias é uma alternativa viável para suporte às políticas públicas relacionadas ao uso dos recursos naturais.

Considerando a sua operacionalidade, o algoritmo Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (Safer) foi desenvolvido usando medições simultâneas em campo e por sensoriamento remoto em culturas agrícolas irrigadas e vegetação natural sob fortes contrastes termo-hídricos no Nordeste do Brasil, para a determinação de indicadores ambientais baseados em parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados climáticos (Teixeira et al., 2008; Teixeira, 2010). O Safer também vem sendo usado em conjunto com o modelo da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) (Monteith, 1977) para a estimativa da BIO (Teixeira et al., 2020a, 2020b, 2021b).

Objetivando a implementação de um sistema operacional no bioma Cerrado, com uso de dados históricos, testamos a última versão do algoritmo Safer em conjunto com o modelo EUR. Foi usado o produto

reflectância Modis MOD13Q1 na escala temporal de 16 dias e dados climáticos nessa escala no ano de 2016. Isto foi feito para demonstrar a viabilidade de aplicação do algoritmo para o monitoramento da dinâmica dos indicadores ambientais derivados dos componentes dos balanços de energia, água e carbono no bioma. Esse monitoramento é útil para subsidiar políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos naturais. As razões para uso de dados de 2016 foram duas: o bioma Cerrado estava recuperando os bons níveis de umidade dos na zona das raízes, após uma seca prolongada de 2012 a 2015 (Mariano et al., 2018; Rebello et al., 2020), e a disponibilidade de dados climáticos cobrindo todo o bioma ao longo desse ano. Embora a modelagem dos indicadores tenha sido realizada para apenas um ano, séries históricas de dados climáticos e imagens de satélites podem ser usadas na detecção de anomalias para períodos específicos de qualquer ano.

15.2 Área de estudo e métodos

na Figura 15.1, são apresentadas a localização do bioma Cerrado em cada região geográfica do Brasil, suas altitudes e as 133 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) utilizadas.

O bioma Cerrado enfrenta períodos de estiagens frequentes e suas espécies naturais desenvolvem resiliência com o aumento da aridez nessas condições mais secas (Almagro et al., 2017; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020). Os dados climáticos foram interpolados pelo método “movimento da média” e usados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀) pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). As grades dos dados climáticos foram usadas com as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto Modis MOD13Q1 na resolução espacial de 250 m e temporal de 16 dias (Teixeira et al., 2020b).

O algoritmo Simple Algorithm for Evapotranspiration (Safer) e o modelo Eficiência do Uso da Radiação (EUR), aplicados em conjunto na corrente pesquisa, são descritos com detalhes em Teixeira et al.

(2020a, 2020b). Para a determinação da evapotranspiração atual (ET) com o Safer, modela-se a razão dessa evapotranspiração para a de referência (ET₀), ou seja, a fração evapotranspirativa (ET_r), com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e climáticos. Para o EUR, a BIO é modelada em função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) e da ET_r.

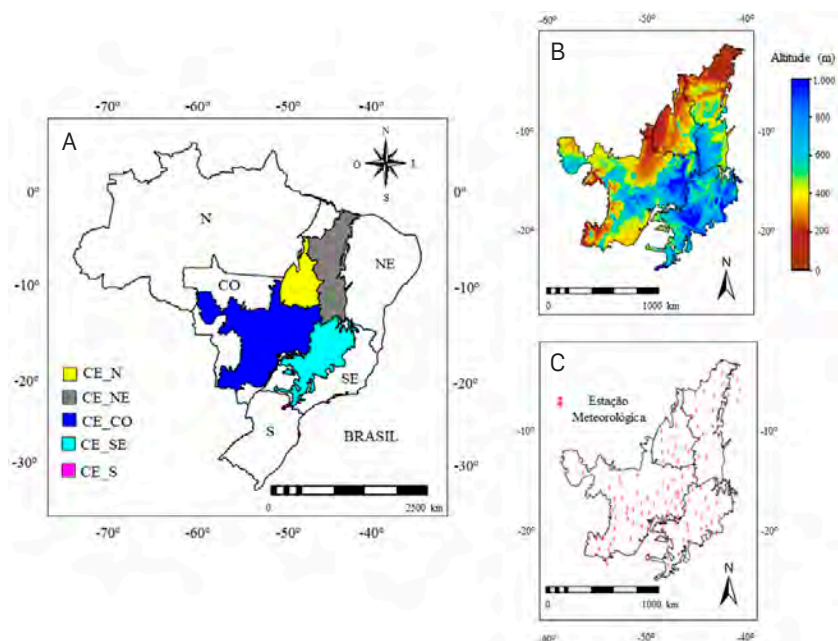
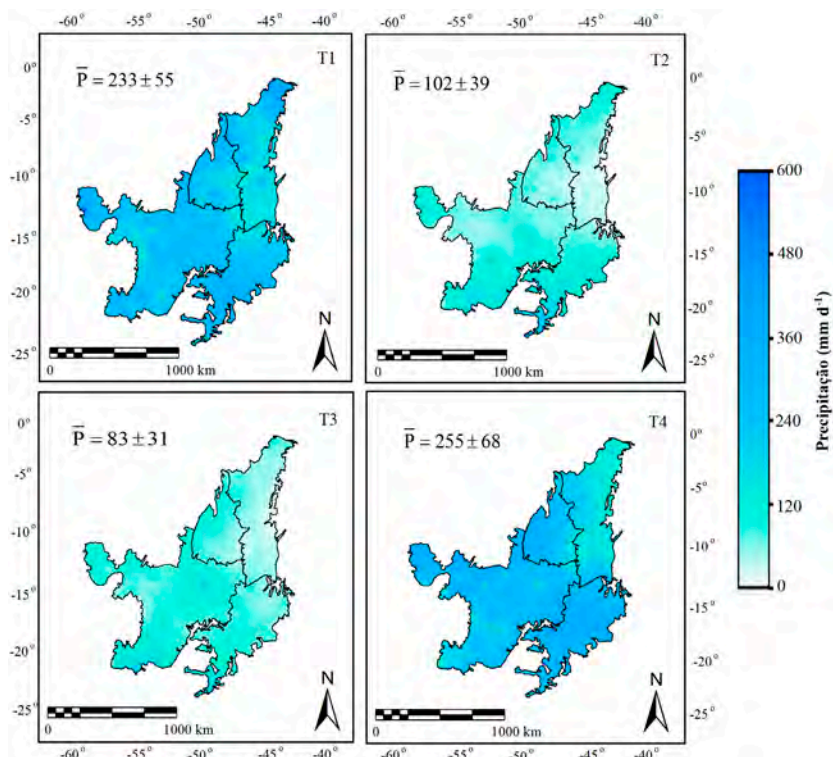


Figura 15.1. Localização do bioma Cerrado (CE) no Brasil. Limites nas regiões geográficas Norte (N), Nordeste (NE), Centro Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S) (A); distribuição espacial das altitudes (B); distribuição espacial das 133 estações meteorológicas utilizadas (C).

15.3 Dinâmica do balanço hídrico

Na Figura 15.2, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da precipitação (P) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.



Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.2. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da precipitação (P) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em P significam médias para todo o bioma.

Variações espaciais e temporais nos valores de P ao longo do ano são fortemente percebidas entre os trimestres e regiões. Os menores valores são detectados em T3 (julho a setembro), quando o total médio trimestral foi abaixo de 85 mm T⁻¹, enquanto os maiores acontecem em T4 (outubro a dezembro), quando esse total foi em torno de 255 mm T⁻¹. Na escala anual, o valor total médio de P foi de 672 ± 153 mm ano⁻¹. Essa média anual está dentro dos valores de 560 a 1.663 mm ano⁻¹ reportados por Fernandes et al. (2018), entre 2003 e 2014, para este bioma,

mas muito menor que o valor superior dessa faixa, o que evidencia que mesmo que os ecossistemas desse bioma estivessem se recuperando de um período de seca de 2012 a 2015 (Mariano et al., 2018; Rebello et al., 2020), as quantidades de chuvas foram baixas para 2016.

De acordo com os valores percentuais de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais em P ocorreram em T2 (abril a junho), quando DP representou 38% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 24% da média dos pixels nesse trimestre.

Na Tabela 15.1, são apresentados os valores trimestrais e anuais da precipitação (P) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Tabela 15.1. Valores trimestrais e anuais de precipitação (P) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (mm T ⁻¹)	T2 (mm T ⁻¹)	T3 (mm T ⁻¹)	T4 (mm T ⁻¹)	Ano (mm ano ⁻¹)
CE_N	209 ± 48	58 ± 21	74 ± 23	242 ± 57	583 ± 126
CE_NE	189 ± 64	53 ± 28	48 ± 17	152 ± 39	442 ± 104
CE_CO	228 ± 44	84 ± 29	91 ± 24	245 ± 48	648 ± 100
CE_SE	239 ± 52	108 ± 42	80 ± 26	287 ± 33	715 ± 118
CE_S	275 ± 5	225 ± 8	210 ± 13	264 ± 2	974 ± 19

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

No bioma Cerrado dentro da região Norte (CE_N), com o valor anual de 583 mm ano⁻¹, os maiores valores de P ocorreram em T4 (outubro a dezembro), com total médio acima de 240 mm T⁻¹. As menores taxas foram em T2 (abril a junho), quando o total médio foi abaixo de

60 mm T⁻¹. De acordo com os valores médios e desvios padrões percentuais (DP), as maiores variações espaciais ocorreram em T2, quando DP representou 37% da média, enquanto as menores ocorreram em T1, com esse percentual de 23%.

Dentro da região Nordeste, o bioma Cerrado (CE_NE), com valor anual de 442 mm ano⁻¹, apresentou as menores quantidades de chuvas. As maiores taxas foram em T1 (janeiro a março), com total médio acima de 185 mm T⁻¹, enquanto o menor valor trimestral de P, abaixo de 50 mm T⁻¹, aconteceu em T3 (julho a setembro). Entretanto, as maiores variações espaciais, com DP representando 52% da média, foram em T2 (abril a maio), e as menores em T4 (outubro a dezembro), sendo DP 26% da média.

A maior parte do Cerrado está na região Centro-Oeste (CE_CO), com um total médio anual de 648 mm ano⁻¹; as chuvas se concentraram de outubro a dezembro (T4), com total médio trimestral de 245 mm T⁻¹. Similarmente à CE_NE, os menores valores foram em T2 (abril a junho), com total médio abaixo de 85 mm T⁻¹. As maiores variações espaciais foram em T2, com DP representando 35% da média dos pixels, enquanto as menores foram em T1 (19%).

Para o Cerrado dentro da região Sudeste (CE_SE), com uma precipitação anual média de 715 mm ano⁻¹, as maiores quantidades de chuvas, com valor trimestral de P acima de 285 mm T⁻¹, ocorreram em T4 (outubro a dezembro), quando ocorreram as menores variações espaciais, com DP representando apenas 12% da média. Os menores valores de P, com total trimestral em torno de 80 mm T⁻¹, aconteceram em T3 (julho a setembro). As maiores variações espaciais, com DP sendo 39% da média, foram em T2 (abril a junho).

As maiores quantidades de chuvas no bioma Cerrado foram para as áreas do bioma dentro da região Sul (CE_S), com o total anual médio de 974 mm ano⁻¹, embora pelo tamanho reduzido represente muito pouco da área total (ver Figura 15.1). Esta área mostrou uma distribuição das chuvas mais regular ao longo do ano, quando comparada com as outras, mas os valores ligeiramente maiores de P (275 mm T⁻¹) foram em

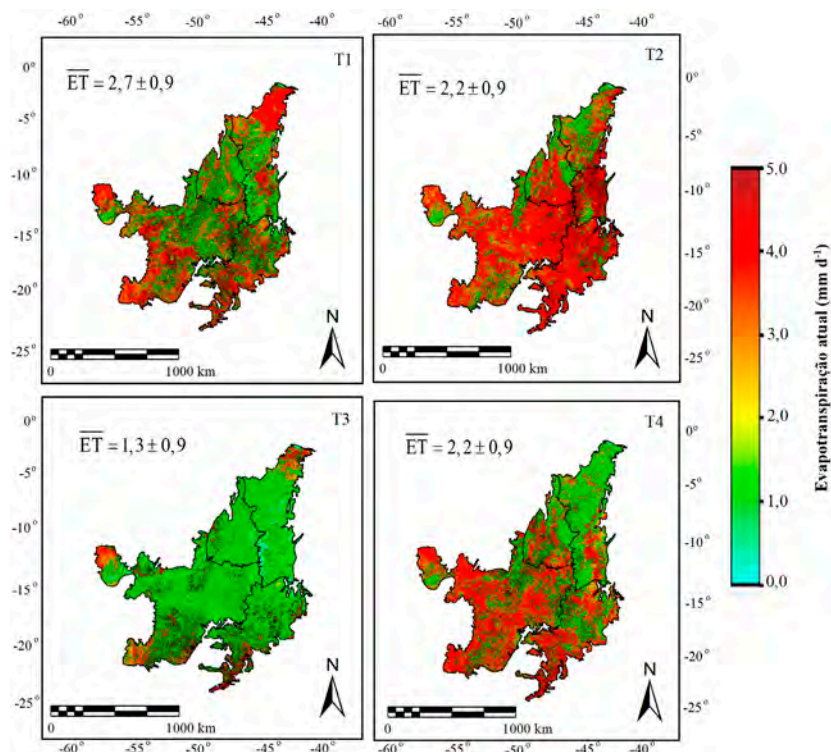
T1 (janeiro a março) e os menores em T3 (julho a setembro), em torno de 210 mm T^{-1} , uma diferença de apenas 24%. Com variações espaciais muito pequenas, DP representou apenas 1% a 6% do valor trimestral médio em T4 e T3, respectivamente.

Considerando todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, as maiores quantidades de chuvas ocorreram de outubro a dezembro (T4) para as regiões Norte (CE_N), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), e de janeiro a março (T1) nas regiões Nordeste (CE_NE) e Sul (CE_S). Com relação aos menores valores de P, estes aconteceram de abril a junho (T2) em CE_N e CE_CO e de julho a setembro (T3) em CE_NE, CE_SE e CE_S.

Na Figura 15.3, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado, com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

Como para P, variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da ET entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são fortemente detectadas. As menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de $1,5 \text{ mm d}^{-1}$, e as maiores em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de $2,5 \text{ mm d}^{-1}$. Na escala anual, o valor médio de ET foi de $2,1 \pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$. Com medições em campo de balanço de energia no Cerrado, Giambelluca et al. (2009) reportaram valores médios da ET de 1,9 a $2,3 \text{ mm d}^{-1}$, variando de acordo com a densidade das plantas, enquanto com medições por sensoriamento remoto com imagens Landsat também nesse bioma, Laipelt et al. (2020) encontraram valores médios entre 2,0 e $3,2 \text{ mm d}^{-1}$ em ecossistemas de grama e pastagem. Os resultados desses estudos prévios envolvem as taxas de ET apresentadas na Figura 15.3.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da ET ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 68% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março), quando DP foi 34% da média dos pixels nesse trimestre.



ET: Evapotranspiração atual; Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.3. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em ET significam médias para todo o bioma.

Na Tabela 15.2, são apresentados os valores trimestrais e anuais da evapotranspiração atual (ET) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Para a região do Cerrado dentro da região Norte (CE_N), os maiores valores da ET foram detectados em T1 (janeiro a março), com valor diário médio no trimestre acima de 2,0 mm d⁻¹, enquanto as menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual, a ET em CE_N apresentou um total médio de

695 mm ano⁻¹. De acordo com os valores médios e desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais ocorreram em T3, quando DP representou 63% da média, enquanto as menores ocorreram em T1, com esse percentual de 36%.

Tabela 15.2. Valores trimestrais e anuais a evapotranspiração atual (ET) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (mm d ⁻¹)	T2 (mm d ⁻¹)	T3 (mm d ⁻¹)	T4 (mm d ⁻¹)	Ano (mm ano ⁻¹)
CE_N	2,4 ± 0,9	1,9 ± 0,8	1,1 ± 0,7	2,0 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_NE	2,5 ± 1,1	2,1 ± 1,0	1,2 ± 0,8	1,7 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_CO	2,7 ± 0,8	2,2 ± 0,9	1,4 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,2 ± 0,7
CE_SE	3,0 ± 0,9	2,2 ± 0,9	1,5 ± 1,0	2,3 ± 0,8	2,3 ± 0,7
CE_S	3,0 ± 0,6	2,5 ± 0,8	3,3 ± 0,9	3,0 ± 0,9	2,9 ± 0,6

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

A região CE_NE se destaca pelos menores valores de ambos, P e ET. Similarmente a CE_N, os maiores valores da ET foram em T1 (janeiro a março), com valor diário no trimestre em torno de 2,5 mm d⁻¹, e as menores taxas em T3 (julho a setembro), também com média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual, a ET em CE_NE apresentou o mesmo total médio de 695 mm ano⁻¹ como para CE_N. As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 66% da média dos pixels, e as menores em T1 (43%).

No Cerrado dentro da região Centro-Oeste (CE_CO), os valores máximos também ocorreram em T1 (janeiro a março), mas com média acima de 2,5 mm d⁻¹, e mínimos em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Entretanto, para essa região, o total médio anual foi de 805 mm ano⁻¹. As maiores variações espaciais também foram

em T3, com DP representando 68% da média dos pixels, e as menores em T1 (30%).

A região CE_SE seguiu os padrões das anteriores com valores máximos da ET, em torno de $3,0 \text{ mm d}^{-1}$ de janeiro a março (T1) e mínimos, com valores em torno de $1,5 \text{ mm d}^{-1}$ de julho a setembro (T3), mas com um total anual médio de 842 mm ano^{-1} . As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 63% da média dos pixels, e as menores em T1 (30%).

As maiores taxas da ET no bioma Cerrado foram dentro da região Sul (CE_S), quando de julho a setembro (T3) o valor médio diário ultrapassou $3,0 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto as menores ocorreram em T2 (abril a junho), com a média diária ficando em torno de $2,5 \text{ mm d}^{-1}$. As elevadas taxas diárias produziram o maior total anual de $1.061 \text{ mm ano}^{-1}$. As maiores variações espaciais aconteceram em T2 (abril a junho), com DP representando 31% da média dos pixels, e as menores foram em T1 (janeiro a março) com esse percentual de 20%.

Considerando todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, as maiores taxas da ET ocorreram de janeiro a março (T1) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de julho a setembro (T3) na região Sul (CE_S). Com relação às menores taxas da ET, estas foram de julho a setembro (T3) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de abril a junho (T2) em CE_S.

Contabilizando as taxas trimestrais de P e ET, cruzando as tabelas 1 e 2 e extrapolando os valores diários da ET para trimestrais, os únicos valores positivos de balanço hídrico (BH) ocorreram de outubro a dezembro (T4) em CE_N (BH = 58 mm), CE_CO (BH = 24 mm) e CE_SE (BH = 75 mm) e de janeiro a junho em CE_S (BH = 3 mm, de janeiro a março – T1 e 1 mm de abril a junho – T2). Para o bioma Cerrado dentro da região Nordeste (CE_NE) não ocorreram valores trimestrais positivos de BH. Os valores mais negativos foram detectados de abril a junho (T2) para CE_N (BH = -116 mm), CE_NE (BH = -142 mm), CE_CO (BH = -120 mm) e CE_SE (BH = -95 mm), enquanto

para CE_S estes foram de julho a setembro (T3) com BH de -95 mm. Entretanto, na escala anual, os valores de BH foram todos negativos, variando de -87 mm para CE_S a -253 mm para CE_NE. Constatou-se, portanto, na escala anual, as melhores condições hídricas para CE_S e as piores para CE_NE.

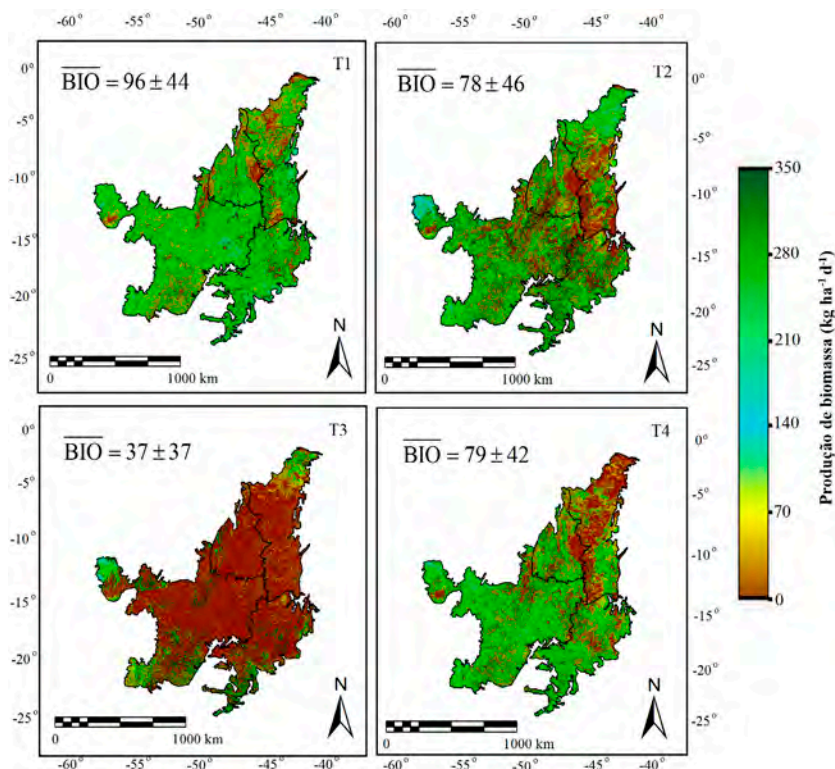
15.4 Dinâmica da produtividade da água

Na Figura 15.4, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da BIO no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

Como para P e ET, variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da BIO entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são também fortemente detectadas. Os menores valores foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, e os maiores em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Na escala anual, o valor médio da BIO foi de $72 \pm 34 \text{ mm d}^{-1}$.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 100% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 46% da média dos pixels nesse trimestre.

Os valores da BIO apresentados na Figura 15.4 estão de acordo com Arantes et al. (2015), que, usando o produto Modis MOD13Q1 Enhanced Vegetation Index, reportaram que o máximo de desenvolvimento da vegetação do bioma Cerrado ocorre de janeiro a março, caindo para a metade de agosto a setembro. O decréscimo da BIO em T3 (julho a setembro) no estudo corrente, também corrobora com Santos et al. (2021), que, também usando produtos Modis, constataram um declínio nos valores da BIO nas espécies desse bioma, após redução das chuvas.



BIO: produção de biomassa; Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.4. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da produção de biomassa (BIO) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em BIO significam médias para todo o bioma.

Na Tabela 15.3, são apresentados os valores trimestrais e anuais da BIO e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Pela Tabela 15.3, são percebidos os menores valores da BIO nos ecossistemas do Cerrado inseridos nas regiões Norte e Nordeste, enquanto os maiores aconteceram nas regiões Sul e Sudeste.

Tabela 15.3. Valores trimestrais e anuais a produção de biomassa (BIO) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T2 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T3 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T4 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Ano (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)
CE_N	74 ± 40	58 ± 37	25 ± 26	60 ± 36	54 ± 30
CE_NE	76 ± 49	63 ± 44	26 ± 28	47 ± 34	53 ± 27
CE_CO	86 ± 40	74 ± 46	35 ± 38	80 ± 42	69 ± 33
CE_SE	96 ± 46	71 ± 46	38 ± 42	74 ± 41	70 ± 37
CE_S	116 ± 37	105 ± 37	130 ± 59	111 ± 48	115 ± 40

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

Para consideração do efeito da umidade na zona das raízes e da radiação solar incidente na BIO ao longo do ano. Na Figura 15.5, é mostrada a dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_r) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado inscrito em cada região geográfica, durante o ano de 2016.

Os valores médios da ET_r ficaram entre 0,24 em CE_N e CE_NE de julho a setembro (T3) e 0,72 em CE_S também em T3. As respectivas médias anuais foram de 0,43 e 0,66. Os valores médios da RAF_{abs} estiveram entre 3,6 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_N de julho a setembro (T3) e 5,8 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_CO de janeiro a março (T1). Entretanto, as médias anuais foram entre 5,0 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_NE e 5,4 MJ m⁻² d⁻¹ tanto para CE_CO como para CE_SE.

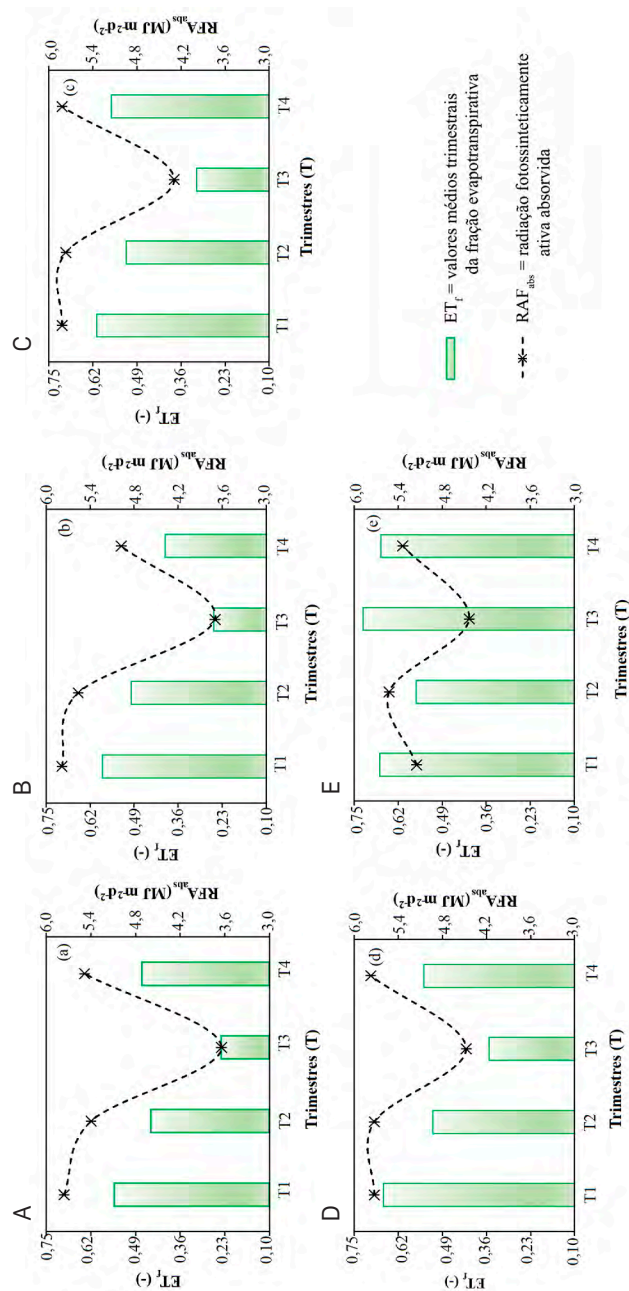


Figura 15.5. Dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_f) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado, durante o ano de 2016. Bioma Cerrado dentro das regiões geográficas brasileira: Norte - CE_N (A); Nordeste - CE_NE(B); Centro Oeste - CE_CO (C); Sudeste - SE (D); Sul - S (E).

De acordo com Zhou e Zhou (2009), as variáveis climáticas que mais afetam a ET_f são a temperatura do ar, a umidade do ar e a energia disponível. Entretanto, seus valores dependem também da abertura dos estômatos e da adaptação das espécies à escassez hídrica (Mata-González et al., 2005), o que é mais notável nos ecossistemas do bioma Cerrado (Almagro et al., 2017; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020).

Os resultados dos indicadores hídricos evidenciaram um atraso entre os valores de ET_f e BH ao longo do ano, o que deve estar relacionado ao tempo requerido para a umidade na zona das raízes recuperarem os bons níveis após as chuvas, mas também devido ao fato de que após estas, alguma quantidade de água é perdida por escoamento superficial e percolação, o que afeta a BIO e, então, a produtividade da água (PA).

De acordo com a Tabela 15.3, para CE_N, os valores máximos da BIO ocorreram em T1 (janeiro a março), quando a média trimestral foi acima de $70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, devido aos seus maiores valores de ET_f e RFA_{abs} (médias de $0,55$ e $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Figura 15.5A). As taxas mínimas da BIO foram em T3 (julho a setembro), quando a média trimestral foi em torno de $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, sob os menores valores de ET_f e RFA_{abs} (médias de $0,24$ e $3,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Figura 15.5A). Considerando a escala anual, a BIO foi de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Na região CE_NE, os valores médios trimestrais da BIO mais elevados (Tabela 15.3), acima de $75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, aconteceram durante o trimestre mais chuvoso de janeiro a março (T1), quando, de acordo com a Figura 15.5B, ocorreram os máximos valores de ET_f (média de $0,58$) e RFA_{abs} (em torno de $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Entretanto, fora desse período, caiu abaixo de $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ em T3 (julho a setembro) sob os menores valores de ET_f e RAF_{abs} , respectivamente $0,25$ e $3,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 15.5B). Na escala anual, a BIO em CE_NE foi ligeiramente inferior a CE_N, em torno de $19 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, a menor taxa das regiões onde o bioma Cerrado está inserido.

As maiores taxas da BIO em CE_CO foram detectadas também em T1 (janeiro a março), mas com média diária trimestral acima de

85 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), sob os mais elevados valores de 0,61 e 5,8 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RFA_{absf}, respectivamente (Figura 15.5C). Os limites inferiores (Tabela 15.3) ocorreram em T3 (julho a setembro), entretanto com valores médios de 0,31 e 4,3 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RFA_{absf}, respectivamente (Figura 15.5C). O valor anual para CE_CO de 25 t ha⁻¹ ano⁻¹ foi 30% mais elevado que para CE_N e CE_NE.

No bioma Cerrado, inserido na região Sudeste (CE_SE), as taxas mais elevadas da BIO, com média diária trimestral ultrapassando 95 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), foram, como nas regiões prévias, em T1 (janeiro a março), mas, de acordo com a Figura 15.5D, com valores de ET_f (média de 0,66) e RFA_{abs} em torno de 5,8 MJ m⁻² d⁻¹. As taxas inferiores da BIO, como nas regiões prévias, também ocorreram em T3 (Tabela 15.3), mas com maior taxa média trimestral, acima de 35 kg ha⁻¹ d⁻¹, sob os valores mais baixos de 0,35 e 4,5 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RFA_{absf}, respectivamente (Figura 15.5D). Com o valor anual de 26 t ha⁻¹ ano⁻¹, CE_SE se destaca com a segunda maior taxa da BIO, atrás da região CE_S.

Embora com uma área contendo o bioma Cerrado bem inferior às outras (ver Figura 15.1A), de acordo com a Tabela 15.3, CE_S se destaca com pelos valores da BIO acima de 100 kg ha⁻¹ d⁻¹ bem distribuídos ao longo do ano. Diferentemente das outras regiões em que o Cerrado está inserido, os trimestres em que ocorreram os valores máximos de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹ foi em T3 (julho a setembro), sob o maior valor médio de ET_f de 0,72, mas com o menor valor médio de RFA_{abs} de 4,4 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 15.5E). A menor média trimestral da BIO, de 105 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), ocorreu em T2 (abril a junho), sob o menor valor de ET_f de 0,57, mas o maior de RFA_{abs} de 5,5 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 15.5E), evidenciando o efeito mais forte ET_f com relação à RFA_{abs} na magnitude da BIO. A região CE_S apresentou a maior taxa anual da BIO de 115 t ha⁻¹ ano⁻¹, seis vezes àquela para CE_NE.

Considerando todas as regiões onde o bioma Cerrado está inserido, os trimestres com maiores taxas da BIO ocorreram de janeiro a março em CE_N, CE_NE, CE_CO e CE_SE, diferenciando apenas para CE_S em que estas aconteceram em T3 (julho a setembro). As taxas mais bai-

xas aconteceram em T3 (julho a setembro) em CE_N, CE_NE, CE_CO e CE_SE, com exceção apenas para CE_S, onde estas foram detectadas em T2 (abril a julho). De acordo com os valores das médias e de desvio padrão (DP) apresentados na Tabela 15.3, as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro) em CE_SE, quando DP foi 112% da média, enquanto as menores aconteceram em T1 (janeiro a março) para CE_S, quando o percentual correspondente foi de 32%.

Para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, a ET_f influenciou mais os valores da BIO do que a RAF_{abs} , sendo isso mais evidenciado em CE_S, quando as taxas máximas da BIO ocorreram sob os mais baixos valores de RAF_{abs} e mais elevados de ET_f (Tabela 15.3 e Figura 15.5E). Isto demonstra que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado (Seneviratne et al., 2010). Deve-se salientar que no estudo corrente, BIO é a produção de biomassa diária e não a biomassa atual, podendo acontecer de vegetação mais alta apresentar menor taxa que para vegetação mais baixa.

Cruzando os valores da ET e da BIO das Tabelas 15.2 e 15.3, a produtividade da água (PA), considerada aqui como a razão da BIO para a ET, apresentou maiores valores de janeiro a junho (T1-T2) para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, sendo em torno de 3,1 kg m⁻³ para CE_N; 3,0 kg m⁻³ para CE_NE; 3,3 kg m⁻³ para CE_CO; 3,2 kg m⁻³ para CE_SE e 4,3 kg m⁻³ para CE_S. Os valores inferiores de PA foram em T3 (julho a setembro), com exceção de CE_S que ocorreram em T4 (outubro a dezembro), sendo as médias de 2,3 kg m⁻³ para CE_N; 2,2 kg m⁻³ para CE_NE; 2,5 kg m⁻³ para ambos CE_CO e CE_SE; e 3,7 kg m⁻³ para CE_S. As mais fortes diferenças na PA foram detectadas entre as regiões CE_S e CE_NE com valor anual de 3,9 e 2,7 kg m⁻³, respectivamente.

Para integração das condições do crescimento vegetativo e das chuvas no Cerrado, na Figura 15.6, são mostradas as relações entre BIO e P, considerando os valores trimestrais durante o ano 2016, para cada região onde o bioma está inserido.

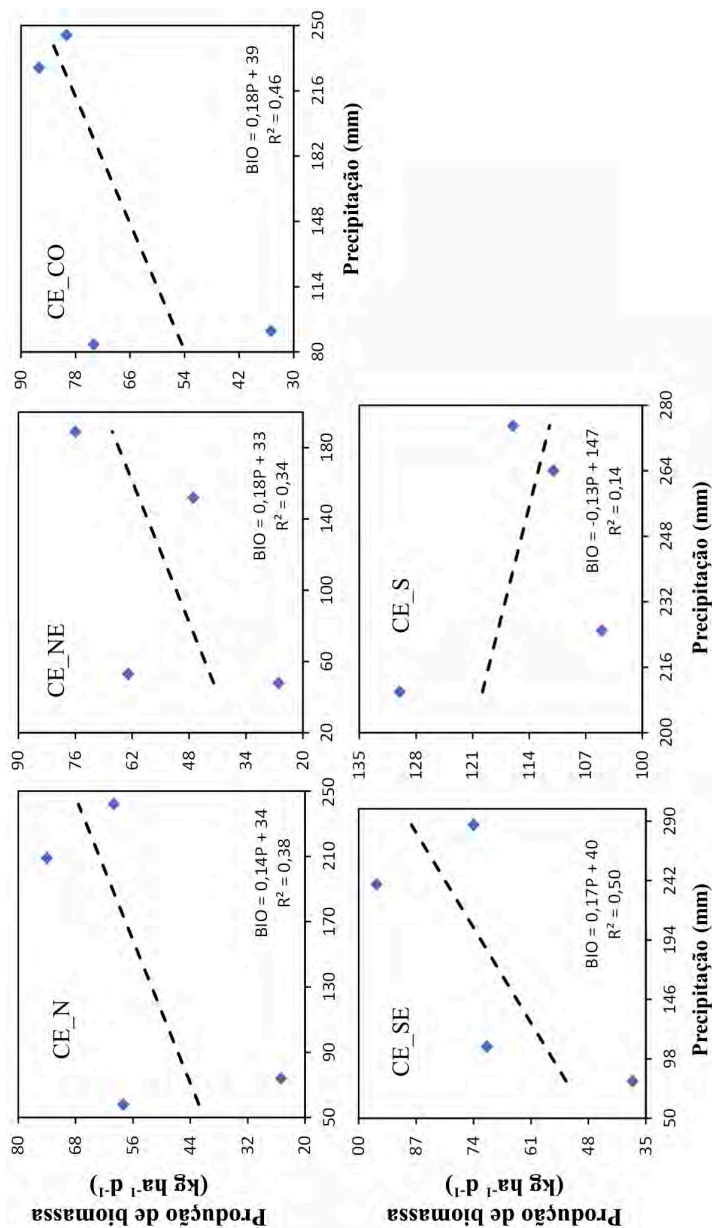


Figura 15.6. Relações entre os valores trimestrais durante o ano de 2016, da produção de biomassa (BIO) com aqueles para precipitação (P) no bioma Cerrado inserido nas regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO), Sudeste (CE_SE) e Sul (CE_S).

Pela Figura 15.6, por um lado, ocorreu correlação negativa entre BIO e P apenas para o bioma Cerrado inserido na região Sul (CE_S), com valor muito baixo de R^2 , o que significa situações da água sendo drenada e escoada para longe da zona das raízes e não sendo utilizada pelas plantas, evidenciando benefício de técnicas de armazenamento da água das chuvas. Por outro lado, as correlações positivas mais elevadas foram para o bioma inserido nas regiões Centro Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), indicando melhor aproveitamento da água das chuvas no crescimento vegetativo. Mesmo com as águas das chuvas sendo drenadas e escoadas em CE_S, os elevados valores de ET_f (média anual de 0,66), juntamente com altos valores de RFA_{abs} (média anual de $5,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) promoveram as taxas mais elevadas da BIO entre as regiões onde o Cerrado está inserido.

Para integração das condições do crescimento vegetativo e dos fluxos hídricos no Cerrado, na Figura 15.7, são mostradas as relações entre BIO e ET_f , considerando os valores trimestrais durante o ano de 2016, para cada região onde o bioma está inserido.

No caso das correlações da BIO com ET_f (Figura 15.7), elas foram positivas para o bioma Cerrado inserido em todas as regiões, com os valores maiores nas regiões Norte (CE_N) e Nordeste (CE_NE), apresentando R^2 de 0,99 em ambas, enquanto as menores foram para a região Sul que apresentou R^2 de 0,82. Nas duas primeiras regiões os valores de ET_f são os mais baixos (média anual de 0,43), mas sob elevados valores de RAF_{abs} (média anual de $5,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), explicando a forte correlação da ET_f com a BIO, pois mesmo com bons níveis de radiação solar nessas regiões, há necessidade de umidade na zona das raízes para que os fluxos hídricos ocorram. No caso de CE_S, a ET_f mais condicionada às variações da demanda atmosférica, a qual apresenta maior variação ao longo do ano devido à posição latitudinal.

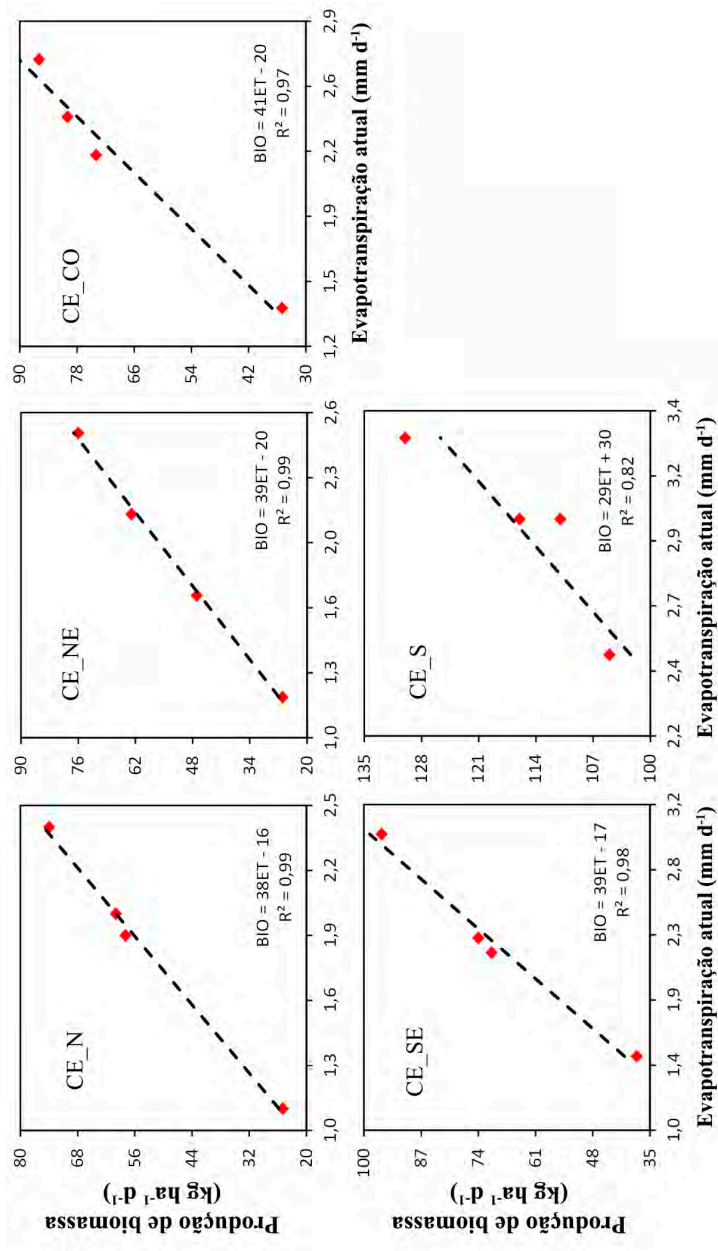


Figura 15.7. Relações entre os valores trimestrais durante o ano de 2016, da produção de biomassa (BIO) com aqueles para evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado inserido nas regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO), Sudeste (CE_SE) e Sul (CE_S).

15.5 Considerações finais

Neste capítulo, demonstrou-se a viabilidade da aplicação conjunta do algoritmo Safer e do modelo da eficiência do uso da radiação com o produto de reflectância Modis MOD13Q1 e grades de dados climáticos para o monitoramento da dinâmica de indicadores ambientais no bioma Cerrado. Diferenças espaciais e temporais nos valores de precipitação (P), evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO) produziram resultados distintos para o balanço hídrico (BH) e produtividade da água (PA). As maiores diferenças entre os valores de BH e PA nas regiões onde o bioma Cerrado está inserido foram detectadas entre a região mais úmida, Sul (CE_S e a mais seca, Nordeste (CE_NE).

A variabilidade das chuvas, afetando os níveis de umidade na zona das raízes, foi o principal parâmetro climático para as magnitudes da ET e da BIO, o que explica as largas diferenças entre os ecossistemas do Cerrado nas regiões Nordeste e Sul. Deve ser enfatizado que as variações na ET podem ser também causadas por áreas com diferentes demandas atmosféricas e graus de cobertura do solo pela vegetação do bioma, afetando as partições entre transpiração e evaporação do solo.

Todos os balanços hídricos anuais nas diferentes regiões onde o bioma Cerrado está inserido foram negativos, com a região Nordeste apresentando a maior deficiência hídrica, evidenciando que os ecossistemas do bioma nessa região sofrem mais com a escassez hídrica, tomando o ano de 2016 como referência. A distribuição das chuvas e a demanda atmosférica ao longo do ano no bioma Cerrado contribuíram para a magnitude da fração evaporativa (ET_r). Entretanto, ocorreram atrasos entre ET_r e BH, o que pode ser explicado pelo tempo necessário para a recuperação dos bons níveis de umidade do solo após as chuvas, mas também porque alguma quantidade de água da chuva é perdida por escoamento superficial e percolação, afetando a BIO e então a PA.

As correlações positivas mais elevadas entre BIO e ET foram para o bioma inserido nas regiões Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), enquanto a única negativa da relação da BIO com P foi na região Sul (CE_S). Mesmo que com evidência de drenagem e escoamento das águas das chuvas nessa última região, os elevados valores de ET_f , juntamente com altos valores de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}), promoveram as mais elevadas taxas da BIO entre as regiões, com consequentes maiores valores de PA, embora esta região represente uma pequena parcela do bioma.

As taxas da BIO foram mais fortemente relacionadas com a ET_f do que com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) em todas as regiões onde o Cerrado está inserido, demonstrando que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado. No entanto, isto foi mais evidenciado para o bioma dentro da região Sul (CE_S), onde os maiores valores da BIO ocorreram com os valores mais baixos de RFA_{abs} e mais altos de ET_f .

Embora os métodos tenham sido aplicados para um ano específico, o sucesso do uso conjunto de imagens do sensor MODIS e grades de dados climáticos mostrou potencial para a implementação de um sistema operacional de monitoramento das condições hídricas e de vegetação com o uso de uma série histórica de dados com detalhes suficientes para uso de indicadores ambientais para o Cerrado, para dar suporte a políticas públicas relacionadas ao manejo e conservação dos recursos naturais do bioma, com a possibilidade de replicação dos métodos em outras condições ambientais. Pesquisas futuras podem focar na detecção de anomalias nos componentes do balanço hídrico e produtividade da água para anos específicos em comparação com as condições históricas.

15.6 Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, p. 8130, 2017.
- ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2015.
- ARAÚJO, L. M.; TEIXEIRA, A. H de C.; BASSOI, L. H. Evapotranspiration and biomass modelling in the Pontal Sul Irrigation Scheme. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, p. 2326-2338, 2019.
- AZEVEDO, G. B. de; REZENDE, A. V.; AZEVEDO, G. T. O. S.; MIGUEL, E. P.; AQUINO, F. G.; BRUZINGA, J. S. C.; OLIVEIRA, L. S. C. DE; PEREIRA, R. S.; TEODORO, P. E. Woody biomass accumulation in a Cerrado of Central Brazil monitored for 27 years after the implementation of silvicultural systems. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 117718, 2020.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; FREITAS, H. C.; LIGO, M. A. V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 4, p. 22-40, 2015.
- CESCHIA, E.; BEZIAT, P.; DEJOUX, J. F.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BODSON, B.; BUCHMANN, N.; CARRARA, A.; CELLIER, P.; DI TOMMASI, P.; ELBERS, J. A.; EUGSTER, W.; GRÜNWARD, T.; JACOBS, C. M. J.; JANS, W. W. P.; JONES, M.; KUTSCH, W.; LANIGAN, G.; MAGLIULO, E.; MARLOIE, O.; MOORS, E. J.; MOUREAUX, C.; OLIOSO, A.; OSBORNE, B.; SANZ, M. J.; SAUNDERS, M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 139, p. 363-383, 2010.
- FERNANDES, F. H. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; BAPTISTA, G. M. DE M.; VICTORIA, D. de C.; FASSONI-ANDRADE, A. L. Degradation trends on MODIS derived estimates of productivity and water use efficiency: a case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, p. 30-40, 2018.
- GIAMBELLUCA, T. W.; SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C.; BUCHERTA, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365-1376, 2009.
- JARDIM, A. M. R. F.; JÚNIOR, G. N. A.; da SILVA, M. V.; DOS SANTOS, A.; da SILVA, J. L. B.; PANDORFI, H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; TEIXEIRA, A. H. de C.; TEODORO, P. E.; de LIMA, J. L. P. M.; JUNIOR, C. A. S.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, E. A.; SILVA, T. G. F. S. Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, 1911, 2022.
- LAIPELT, L.; RUHOFF, A.L.; FLEISCHMANN, A.S., KAYSER, R.H.B., KICH, E. de M., ROCHA, H.R da, NEALE, C.M.U. Assessment of an automated calibration of

the SEBAL algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a Forest–Savanna transition in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, 1108, 2020.

LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. How many species are there in Brazil? **Conservation Biology**, v. 19, p. 619–624, 2005.

MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A. C. dos; WARDLOWA, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSEA, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129–143, 2018.

MATA-GONZÁLEZ, R.; MCLENDON, T.; MATIN, D. W. The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: A review. **Arid Land Research and Management**, v. 19, p. 285–295, 2005.

MONTEITH, J. L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 281, p. 277–294, 1977.

NUÑEZ, D. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de C.; FRANCO, R. A. M.; LEIVAS, J. F. L. Water productivity using SAFER – Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 524–529, 2017.

REBELLO, V. P. A.; GETIRANA, A.; FILHO, O. C. R.; LAKSHMI, V. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100294, 2020.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818–828, 2019.

SANTOS, G. L. dos; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MAGISTRALI, I. C.; SILVA, C. G. da; OLIVEIRA, C. M. M. de; LARANJEIRA, J. P. B.; SILVA, T. P. da. Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, 118875, 2021.

SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F.; FILGUEIRAS, R.; SILVA, G. H.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, F. C. S.; SEDIYAMA, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 1–8, 2020.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, p. 125–161, 2010.

- TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; GARÇON, E. A. M.; TAKEURA, C. M.; QUARTAROLI, C. F.; ALVAREZ, I. A. Modeling large-scale biometeorological indices to monitor agricultural-growing areas: applications in the fruit circuit region, São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 1, p. 1-14, 2020a.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; TAKEMURA, C. M.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; SILVA, G. B.; GARÇON, E. A. M. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 1-9, 2020b.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; STRUIVING, T. B.; REIS, J. B. R. S.; SIMÃO, F. R. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, v. 247, p. 1- 9, 2021a.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; GARÇON, E. A. M.; TAKEMURA, C. M. Biophysical characterization and monitoring large-Scale water and vegetation anomalies by remote sensing in the agricultural growing areas of the Brazilian semi-arid region. In: PANDEY, P. C.; SHARMA, L. K. (ed.). **Advances in remote sensing for natural resource monitoring** New Jersey: Wiley Library, 2021b. p. 94-109.
- YANG, Y.; GUAN H.; BATELAAN, O.; MCVICAR, T. R.; LONG, D.; PIAO, S.; LIANG, W.; LIU, B.; JIN, Z.; SIMMONS, C. T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-8, 2016.
- ZHANG, X.; ZHANG, B. The responses of natural vegetation dynamics to drought during the growing season across China. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 706-714, 2019.
- ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 through 2009. **Science**, v. 329, p. 940-943, 2010.
- ZHOU, L.; ZHOU, G. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 372, p. 41-47, 2009.

CAPÍTULO 16

Atlas da Agricultura Irrigada no Cerrado

Diego Bispo dos Santos Farias

Lineu Neiva Rodrigues

Edson Eyji Sano

Ivo Augusto Lopes Magalhães



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1 e 2); Cristiano Del Nero (da esquerda para a direita - 3); Fernando Tangerino (da esquerda para direita - 4); Paulo Lanzetta (primeiro plano).



16.1 Introdução

Ao longo do tempo, o uso da irrigação passou por vários processos de desenvolvimento e hoje é uma tecnologia indispensável em qualquer estratégia ou política de estado que vise a segurança alimentar e o combate à fome e à pobreza. Embora tenha se verificado, na última década, um aumento progressivo na produção de alimentos, esse crescimento deverá ainda ser maior para suprir o aumento de demanda previsto para uma população que, em 2050, será de aproximadamente 10 bilhões de habitantes (FAO, 2017; United Nations, 2017; Ramankutty et al., 2018).

O Brasil se sobressai como produtor e exportador de várias commodities agrícolas. É um dos maiores produtores mundiais de alimento, respondendo por 7,3% das exportações agrícolas mundiais (FAO, 2014; Allen; Valdes, 2016; Meade et al., 2016). O Cerrado, que ocupa cerca de 24% do território brasileiro, é responsável por cerca de 70% da produção nacional de grãos e carne bovina (Klink, 2014; Silva et al., 2015), podendo ajudar a suprir parte do aumento da demanda de alimentos projetada.

A produção de alimentos na região do Cerrado, entretanto, está cada vez mais dependente da irrigação, que se apresenta como o melhor seguro agrícola para o produtor. Por outro lado, a irrigação é a principal usuária de recursos hídricos e seu crescimento, se não for bem planejado, poderá contribuir para aumentar as disputas pelo uso de recursos hídricos em regiões onde a disponibilidade hídrica já se encontra comprometida.

A energia é outro aspecto a ser destacado quando se planeja o desenvolvimento da agricultura irrigada. Embora a irrigação não demande tanta energia como os setores industriais e urbanos, a disponibilidade de energia é crucial para o seu desenvolvimento. Além disso, em geral, o seu desenvolvimento demanda energia em áreas mais remotas, afastadas dos grandes centros (Rodrigues et al., 2017).

Os cenários indicativos das tendências de crescimento da irrigação devem fazer parte dos planos de segurança hídrica e energética do País. A sustentabilidade nas atividades da agricultura irrigada e, consequentemente, na produção de alimentos, depende de segurança hídrica, que, por sua vez, depende de uma gestão efetiva dos recursos hídricos para ser alcançada.

No ambiente rural, agricultura e desenvolvimento sustentável têm que ser vistos de forma integrada considerando o equilíbrio entre oferta e demanda de água e energia. Produzir alimento, considerando todas as incertezas, exigirá gestores cada vez mais atentos aos processos: legais/institucionais, hídricos e energéticos. Nesse contexto, informações qualificadas e sistematizadas são fundamentais para o planejamento, pois subsidiam a tomada de decisão, favorecendo um crescimento organizado e sustentado da irrigação.

16.2 Uso da água na agricultura irrigada

A água é fundamental para a produção de alimentos. Estima-se que cada caloria de alimento produzido pela planta requer, em média, cerca de um litro de água. Na Figura 16.1, apresentam-se os valores médios de uso de água no mundo, bem como nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (World Water Week Looks "Beyond the River", 2006). Analisando a Figura 16.1, nota-se que, da quantidade total de água que é retirada para algum uso, 70% é utilizado para fins agrícola. Nos países em desenvolvimento, o uso agrícola representa 59% do total e 82% nos países em desenvolvimento.

No Brasil, a porcentagem média de uso de água, em relação ao total de retiradas, é de aproximadamente 50% para irrigação, 16% para indústria e 26% para abastecimento humano (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). Entretanto, esses valores variam temporalmente e espacialmente, refletindo as diferenças nos padrões climáticos e socioeconômicos entre os estados (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2015).

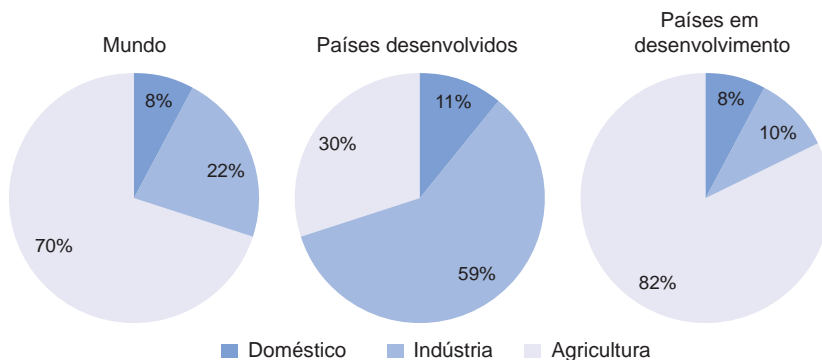


Figura 16.1. Uso da água por setor doméstico, industrial e agrícola no mundo, nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento.

Fonte: Adaptado de World Water Week Looks "Beyond the River" (2006).

O percentual de uso referente à agricultura irrigada é significativo, mas, em valor absoluto, comparado com a vazão média natural de longo período, é muito pequeno, representando apenas 0,47%. Isso indica que os recursos hídricos são pouco utilizados no Brasil. Para a gestão de recursos hídricos, entretanto, a retirada de água para fins de irrigação é um componente importante do balanço hídrico e, por isso, deve ser contabilizada e considerada nos planos de bacias hidrográficas (Rodrigues; Domingues, 2017).

Analisando o uso de água para irrigação no Brasil, observou-se, em 2019, uma vazão retirada de $965 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, equivalente a $30,4 \times 109 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A cultura do arroz irrigado, por exemplo, foi responsável por aproximadamente 38% das retiradas de água (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). Vale ressaltar que as técnicas de manejo adotadas pelos produtores influenciam na sazonalidade do uso da água, como é o caso, por exemplo, dos períodos em que não se pode cultivar soja devido ao vazio sanitário imposto pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) para controlar a ferrugem asiática.

16.3 Área irrigada e área com potencial para crescimento da irrigação

De acordo com FAO (2019), mais de 340 milhões de hectares foram equipados para irrigação em todo o mundo. Em 2019, os países com as maiores áreas irrigadas foram a China e a Índia, representando, respectivamente, 22,1 e 20,7% da área total irrigada no mundo (Figura 16.2). Em todo o mundo, estima-se que apenas 20% de todas as terras cultivadas sejam irrigadas e, ainda assim, produzem 40% de todos os alimentos.

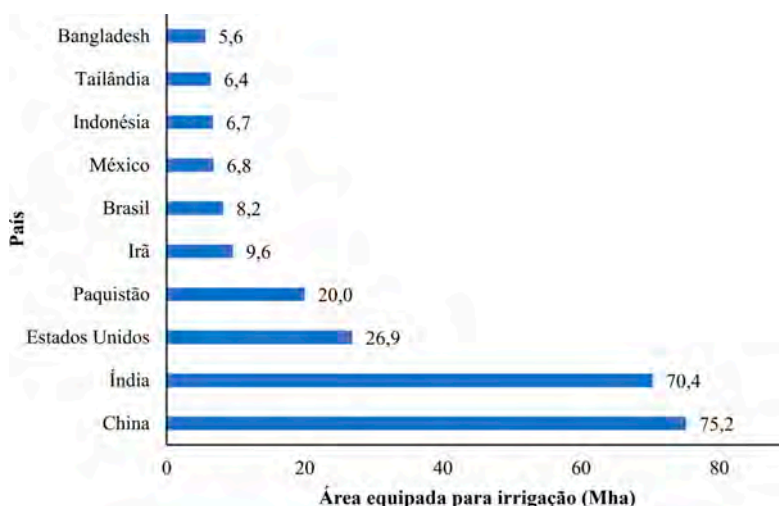


Figura 16.2. Dez países com as maiores áreas equipadas para irrigação no mundo.

Fonte: Adaptado de FAO (2019).

Segundo informação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em 2021, o Brasil possuía uma área irrigada de cerca de 8,2 milhões de hectares, correspondendo a 2,41% da área mundial equipada para irrigação (Figura 16.2). Com essa área, o Brasil ocupava,

naquele ano, a sexta posição entre os dez países de maior área equipada para irrigação. Fazendo um comparativo, o Paquistão, nesse mesmo ano, possuía 36,6 milhões de hectares plantados e 54,6% dessas áreas eram equipadas para irrigação, enquanto o Brasil possuía o equivalente a 45,8% a mais de área plantada e apenas 15,4% dessas áreas eram equipadas para irrigação (FAO, 2019; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021).

O levantamento realizado pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq), em 2020, indicou um crescimento de 249.225 ha na área irrigada, em relação a 2019. Com base nesse levantamento, o Brasil, em 2020, possuía uma área irrigada equivalente a 6,5 milhões de hectares, valor 20,7% menor que o valor obtido apresentado pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). No comparativo entre os anos de 2019 e 2020, o crescimento da área irrigada foi de 19,0%, segundo dados da Abimaq.

Na Figura 16.3, apresentam-se os valores de áreas irrigadas para cada estado da Federação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). O valor de 8,2 milhões de hectares irrigados correspondia a 9,8% da área plantada em 2020 (IBGE, 2020). São Paulo foi o estado com maior área irrigada, irrigando aproximadamente 27% da área plantada (2,4 milhões de hectares) (IBGE, 2020). Os estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul ocuparam a segunda e terceira posição, respectivamente, no ranking de maiores áreas irrigadas no Brasil, com 1,14 milhões de hectares e 1,13 milhões de hectares (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021), representando 19,5% e 11,8% das áreas plantadas nesses estados, respectivamente (IBGE, 2020).

Na Figura 16.4, apresenta-se a evolução da área irrigada no Brasil a partir de 1991. Observou-se um incremento de área equivalente a 5,5 milhões de hectares entre 1991 a 2019. O relatório da ANA indica um crescimento na área irrigada de aproximadamente 4,2 milhões de hectares até 2040, o que corresponde a um aumento de 79% (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). Considera-se esta estimativa de crescimento muito conservadora frente ao potencial do país.

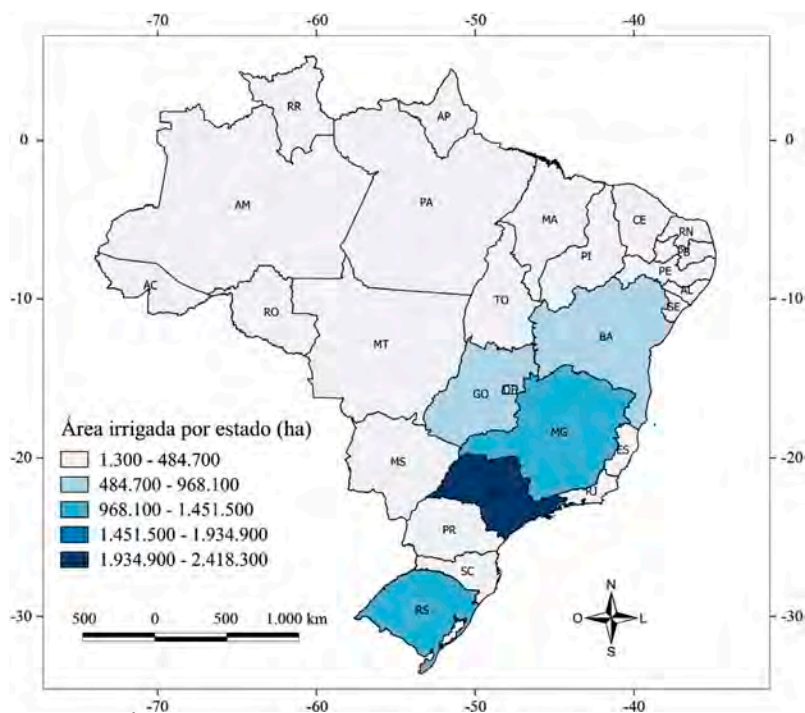


Figura 16.3. Área irrigada por estados brasileiros em 2021.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Água (2021).

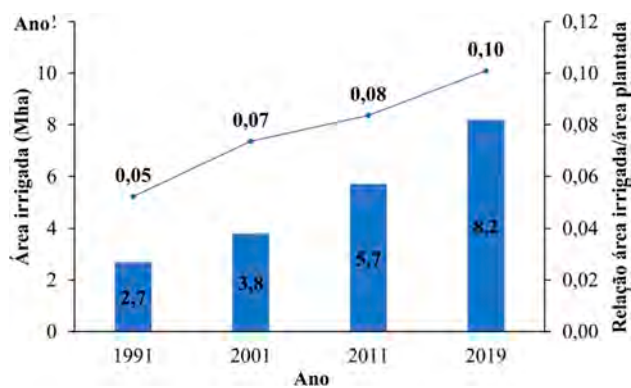


Figura 16.4. Evolução da área irrigada no Brasil no período 1991–2019.

Fonte: Adaptado de FAO (2019).

É notório o crescente desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil. Vale ressaltar que esse crescimento também é impulsionado pelo surgimento de novas fronteiras agrícolas, como, por exemplo, a região do Matopiba, que possui a maior parte da sua extensão localizada dentro do bioma Cerrado. O Cerrado é responsável por 2,3 milhões de hectares irrigados no Brasil (Figura 16.5).

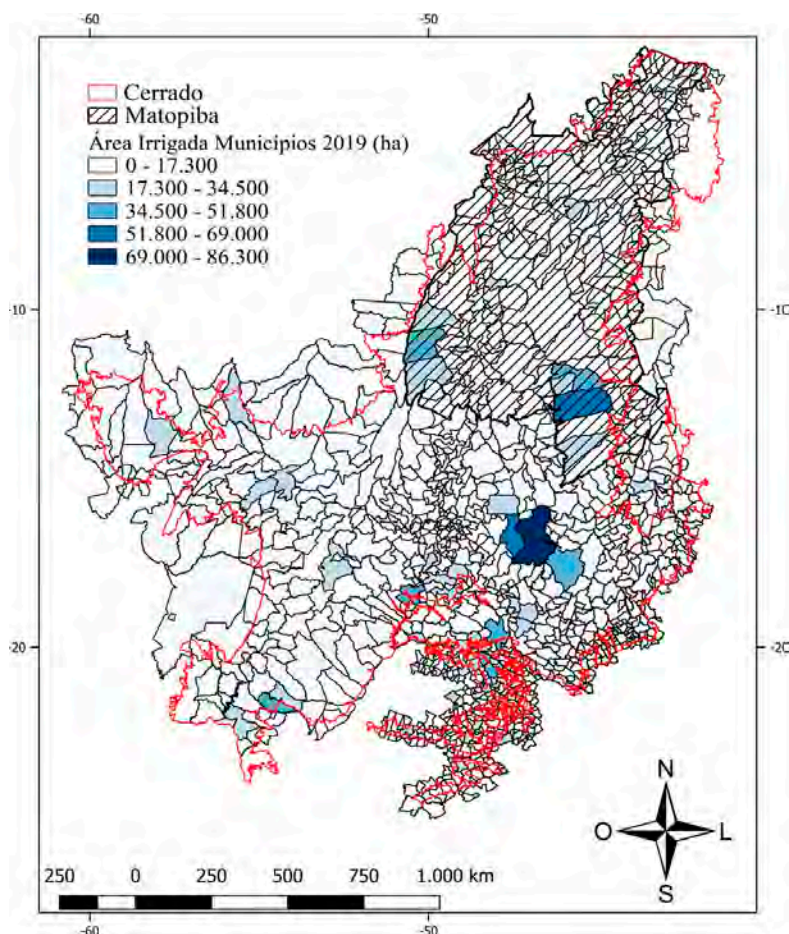


Figura 16.5. Área irrigada em municípios que se localizam totalmente ou parcialmente no bioma Cerrado, com destaque para a região do Matopiba.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2021) e Embrapa (2022).

A agricultura irrigada no Cerrado representa 64% da irrigação praticada no Brasil (Brasil, 2014), concentrando 80% dos pivôs centrais do país (Althoff; Rodrigues, 2019). Segundo esses autores, a região, de 2000 a 2017, apresentou um crescimento médio de área irrigada de 43 mil hectares por ano. Já no período de 2010 a 2017, a região apresentou um crescimento equivalente a 56 mil hectares por ano. Utilizando esse último valor como referência, observa-se que a área irrigada na região atingirá 3 milhões de hectares por volta de 2050.

Considerando as informações apresentadas no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021), observa-se que, dos 4,1 milhões de hectares irrigados no Cerrado, os métodos de irrigação predominantes foram aspersão – outros (14%), aspersão – pivôs centrais (29%), localizada (19%), superficial (4%) e outros sem predominância (34%) (Figura 16.6). O pivô central foi o sistema de irrigação que mais cresceu na região do Cerrado, sendo responsável por aproximadamente 40% do total do aumento anual dos sistemas de irrigação nas últimas duas décadas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021). Essa expansão deve-se principalmente ao seu grau de automação, uniformidade de aplicação de água e facilidade de operação, além das condições ambientais favoráveis do Cerrado.

O estudo apresentado no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021) mostrou que a área potencial de expansão da agricultura irrigada no Brasil é de aproximadamente 55,85 milhões de hectares. Cerca de 95,6% desse potencial de expansão deve ocorrer em áreas de sequeiro e em áreas de pastagens potencialmente irrigáveis. Esse mesmo estudo indicou que o Brasil possui potencial efetivo, isto é, áreas em condições mais favoráveis de desenvolvimento da agricultura irrigada, de 13,7 milhões de hectares, com 45% desse potencial localizado no Centro-Oeste, especialmente em Mato Grosso e Goiás e em maior parte no bioma Cerrado (Figura 16.7A).

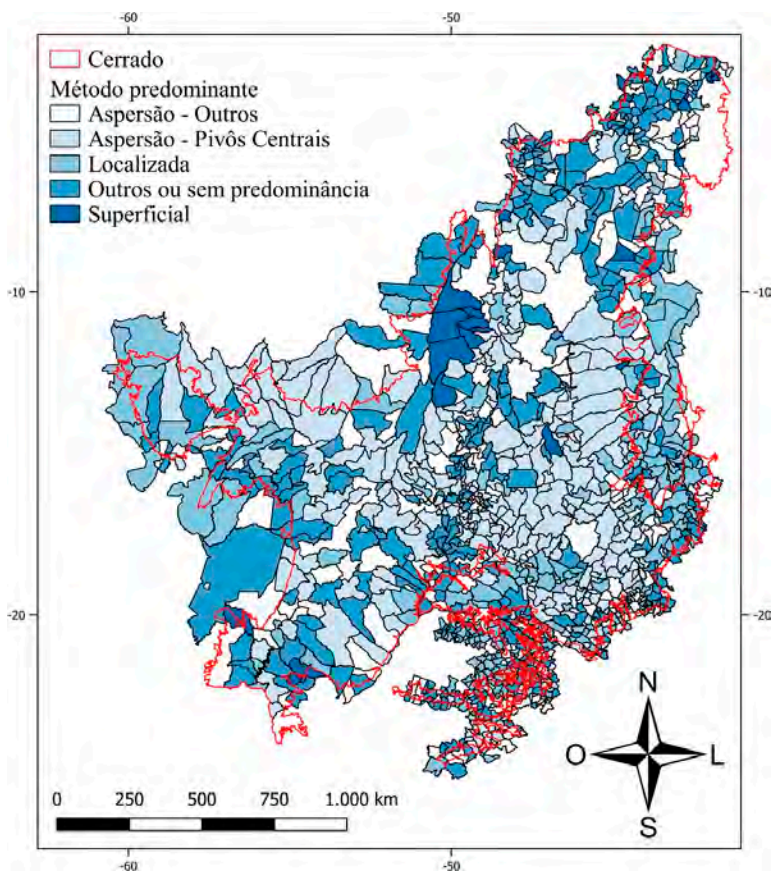


Figura 16.6. Métodos de irrigação predominantes na região do Cerrado brasileiro.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2021).

A área irrigada atual e o potencial efetivo de irrigação do Brasil são apresentados na Figura 16.7B. O potencial efetivo leva em consideração as características do solo-relevo e a infraestrutura (energia, transporte rodoviário e ferroviário e capacidade de armazenamento de produtos agrícolas). Esse indicador explicita, de forma mais precisa, as potencialidades de curto e médio prazo de crescimento da irrigação

no território brasileiro e correspondem às áreas de intensificação sobre agricultura de sequeiro e que apresentam aptidão de solo-relevo média ou alta.

O potencial de expansão de áreas irrigadas (total e efetivo) apresentado no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021) deve ser analisado com cautela para que o desenvolvimento da agricultura irrigada na região não seja limitado. Essa informação é útil para fins de planejamento geral, zoneamentos e monitoramento do setor. No entanto, particularidades locais, expansão da infraestrutura e obras de infraestrutura hídrica podem alterar a estimativa de área adicional irrigável, especialmente quando a oferta de água é aumentada devido a transferências de outras bacias ou diminuída com a instalação de outros usos ou com a revisão de bases de dados de oferta de água.

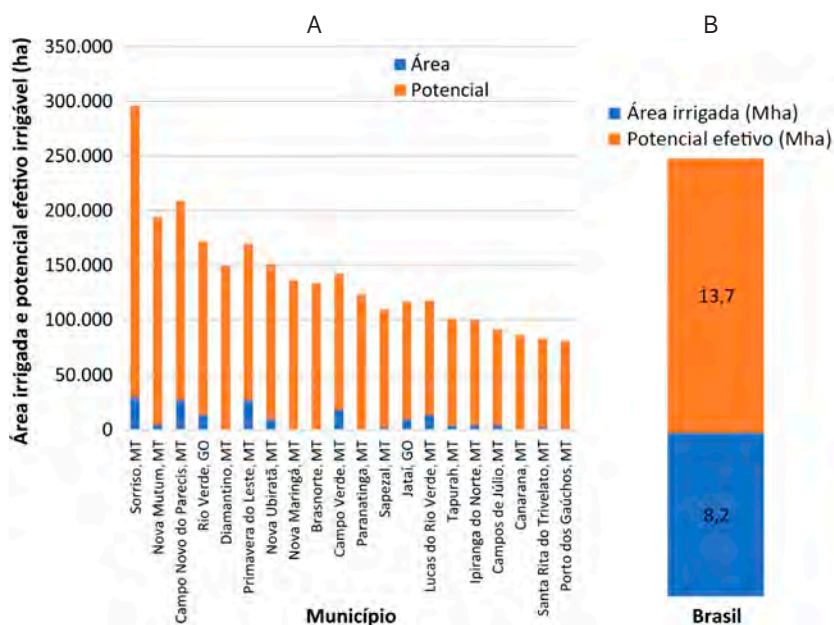


Figura 16.7. Área irrigada e potencial efetivo de irrigação dos vinte municípios brasileiros com maior potencial (A) e no Brasil (B).

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2021).

Analisando os dados apresentados no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021) para municípios que compõem ou estão inseridos em partes no Cerrado (Figura 16.8), observa-se um potencial efetivo de expansão da área irrigada de 7,3 milhões de hectares, o que equivale a 3,6% da área total do Cerrado (204,5 milhões de hectares).

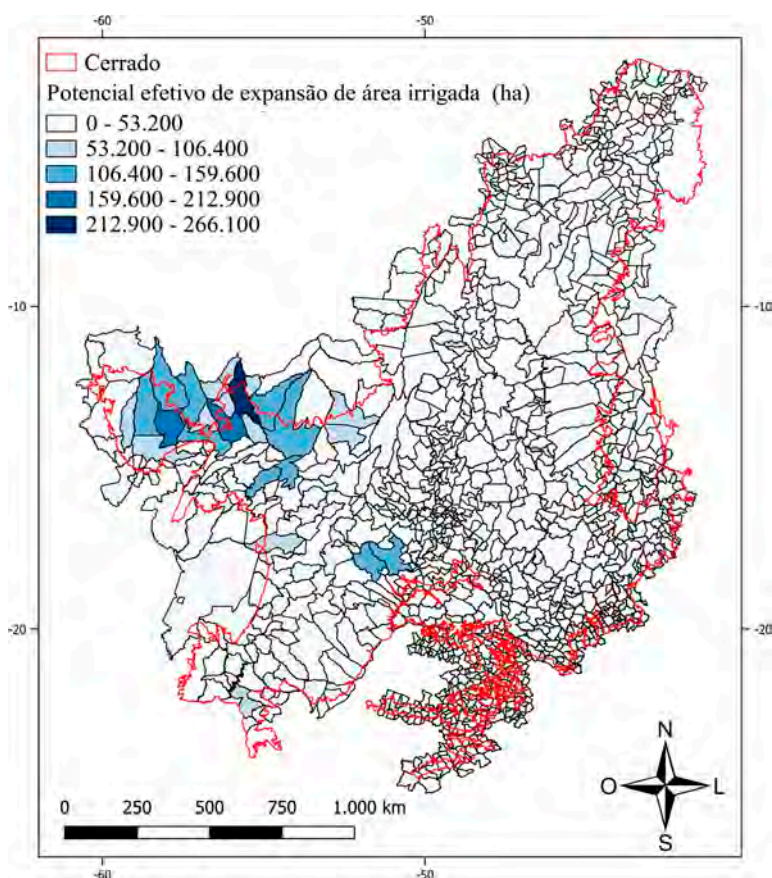


Figura 16.8. Potencial efetivo de expansão e área irrigada na região do Cerrado.
Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2021).

Na Figura 16.9, apresenta-se (porcentagem em relação a área irrigada total) a área irrigada atual e a área potencial efetiva de crescimento para cada unidade da federação. A porcentagem da área irrigada atual, por exemplo, foi calculada pela relação entre área irrigada atual e a irrigação total (irrigação atual + potencial efetivo).

Na Figura 16.9, observa-se que os estados do Acre, Amapá, Amazonas e Roraima, no cenário atual, não possuem potencial efetivo para aumento de área irrigada. O Mato Grosso, por sua vez, é o estado que possui maior potencial de incremento de área irrigada, podendo chegar a aproximadamente 4 milhões de hectares irrigados, cerca de 94,7% do total (área irrigada + área potencial). Nota-se, com base nessa informação, que o estado do Mato Grosso irriga pouco em relação ao seu potencial efetivo.

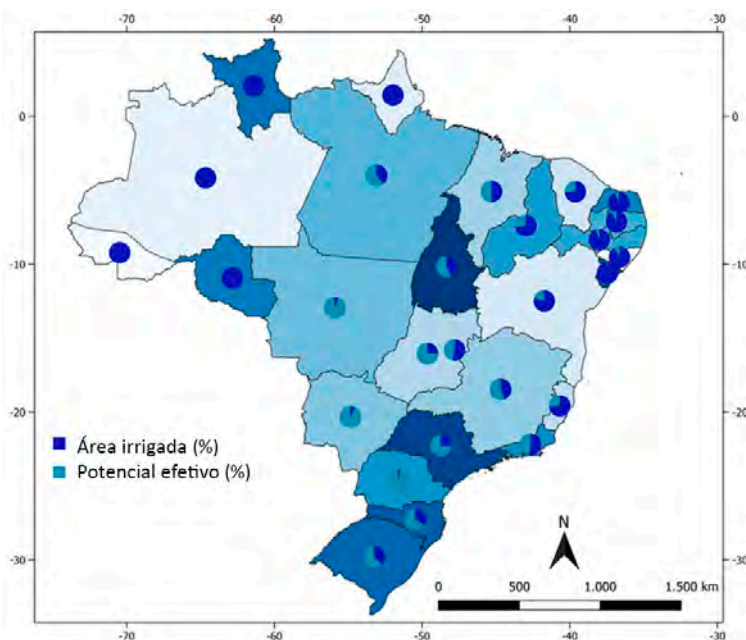


Figura 16.9. Área irrigada atual (%) e potencial efetivo de crescimento da área irrigada (%) nas unidades da federação.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021.

Os estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo e Minas Gerais, com potencial de crescimento da irrigação acima de 1 milhão de hectares, apresentam porcentagens de crescimento iguais a 96,8, 62,7, 76,1, 75 e 55% do total. Os estados de Sergipe, Bahia, Alagoas, Acre, Amapá, Amazonas, Roraima, Rondônia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraíba, Ceará, Espírito Santo e Piauí possuem potencial efetivo de incremento de área irrigada abaixo de 30%. Os demais estados possuem potencial que varia de 47 a 97%.

16.4 Áreas irrigadas por pivô central

Relatório da ANA projeta, para 2040, um crescimento de 133% em áreas cultivadas com culturas anuais sob pivô central, o que poderá acarretar um aumento de 7% na demanda hídrica nessas áreas. Por isso, é importante que o país mantenha um programa de monitoramento de expansão de áreas irrigadas nos seus diferentes biomas ou bacias hidrográficas.

Sistemas de irrigação por pivô central, no geral, podem ser bem identificados e quantificados por meio de imagens de satélite. Tem-se observado recentemente algumas iniciativas no sentido de identificar pivôs por meio de imagens de satélite de forma automática, utilizando técnicas de classificação supervisionada de imagens. Essa tarefa, no entanto, não é simples, uma vez que as técnicas tradicionais de classificação baseadas em assinaturas espectrais de diferentes classes de uso e cobertura de terras não funcionam a contento para mapear pivôs, pois pode haver mais de uma cultura em um único pivô. A base de dados mais completa do País e com série temporal consistente sobre mapeamento de pivôs-centrais utilizando técnicas de classificação supervisionada de imagens é o Projeto MapBiomass Irriga. As principais etapas da abordagem metodológica desse projeto podem ser encontradas em Rudorff (2023).

16.4.1 Dinâmica de pivôs no Cerrado

Na Figura 16.10, é mostrada a evolução temporal do número de pivôs-centrais e da correspondente área irrigada no período 1985–2020. A magnitude de aumento no número de pivôs nesse período foi de 17 vezes, passando de 1.085 unidades em 1985 para 18.308 unidades em 2020. Em termos de área irrigada por esse sistema de irrigação, a magnitude de aumento foi de 26 vezes, passando de 46.573 ha em 1985 para 1.191.882 ha em 2020. O crescimento ao longo desse período foi relativamente constante, com uma ligeira tendência de aceleração nos últimos 10 anos do período.

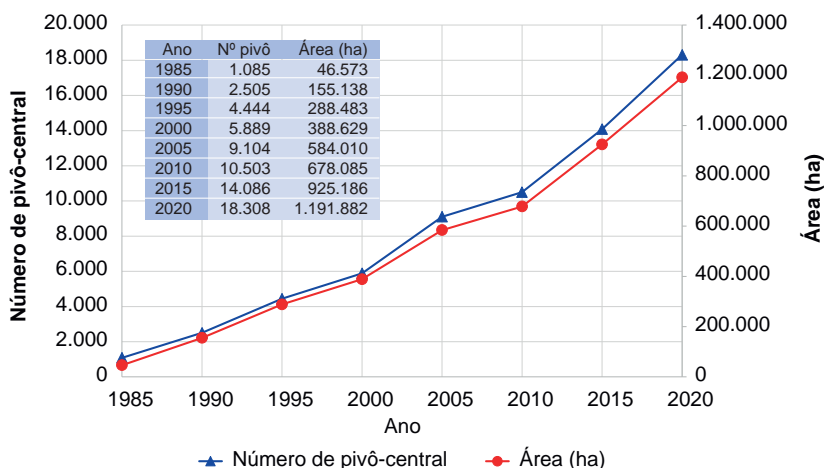


Figura 16.10. Número total de pivôs-centrais e a correspondente área total irrigada no bioma Cerrado para o período 1985–2020.

As estimativas de 2020 estão próximas dos levantamentos a nível nacional que vem sendo produzidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional e compilados por Farias e Rodrigues (2023), para o bioma Cerrado; total de pivôs: 18.820; e total de área irrigada: 1.253.792 ha. A referida agência adota a metodologia de interpretação

visual de imagens do satélite Landsat para mapear os pivôs-centrais do Brasil, o que deve explicar as diferenças encontradas nesses dois estudos. O menor tamanho médio de pivôs foi encontrado em 1985: 43 ha. Para o restante do período, o tamanho médio manteve-se em torno de 65 ha, menor que o valor encontrado pela metodologia da ANA, que foi 80 ha.

16.4.2 Dinâmica de pivôs em escala estadual

Em todo o período considerado neste estudo, verifica-se a contribuição destacada do estado de Minas Gerais, vindo a seguir, os estados de Goiás e São Paulo. Em 2020, Minas Gerais contribuiu com 43% sobre o total de pivôs no bioma Cerrado (Figura 16.11). Praticamente todos os estados, em maior ou menor magnitude, apresentaram um histórico de desenvolvimento crescente e consistente, com ligeira tendência de aceleração nos últimos 10 anos (2010–2020). Conforme ressaltado por Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021), essa tendência esteve, muitas vezes, na contramão de períodos econômicos instáveis, tanto a nível nacional como a nível internacional.

Analisando a Figura 16.12, observa-se que o estado de Minas Gerais continua se destacando em termos de área total irrigada por pivô central, seguido dos estados de Goiás e São Paulo. Em 2020, foi estimada uma área de aproximadamente 444 mil hectares de Minas Gerais, seguida de Goiás com cerca de 260 mil hectares e Bahia, com 194 mil hectares. Interessante notar que a Bahia apresentou uma área irrigada maior que São Paulo, apesar de possuir menos pivôs. Essa característica é decorrente dos tipos diferentes de culturas agrícolas que são irrigadas nesses dois estados. Enquanto na Bahia predomina o café irrigado, em São Paulo, predominam as hortifruticulturas.

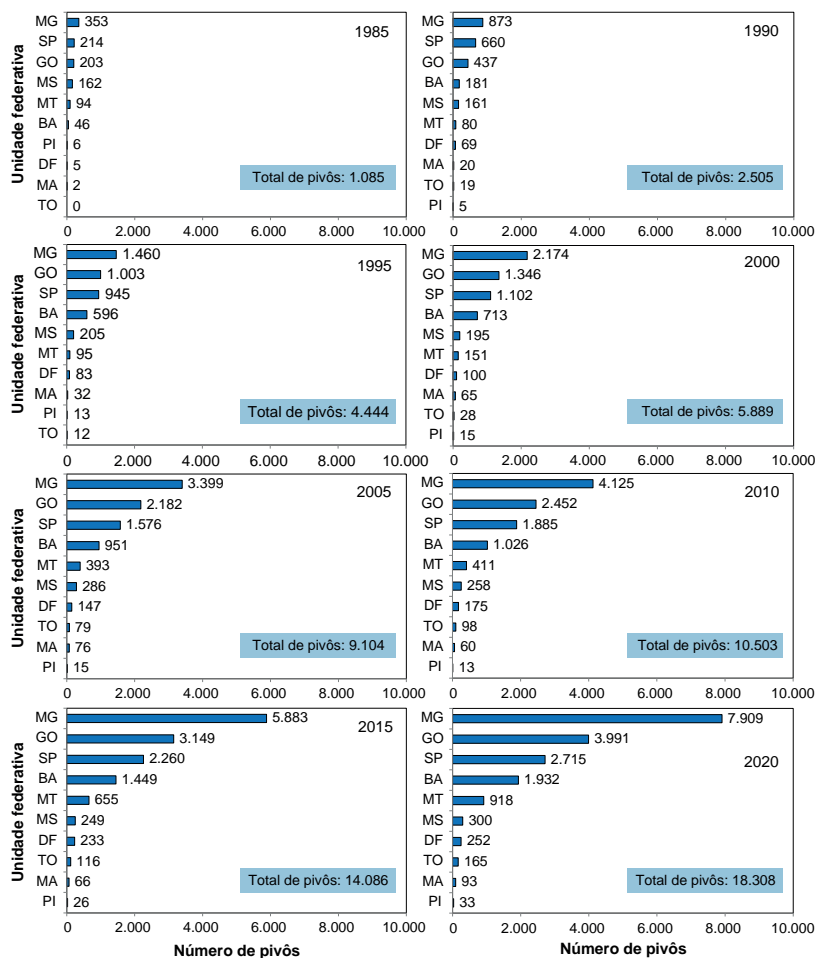


Figura 16.11. Número total de pivôts por unidade federativa do bioma Cerrado, período 1985–2020.

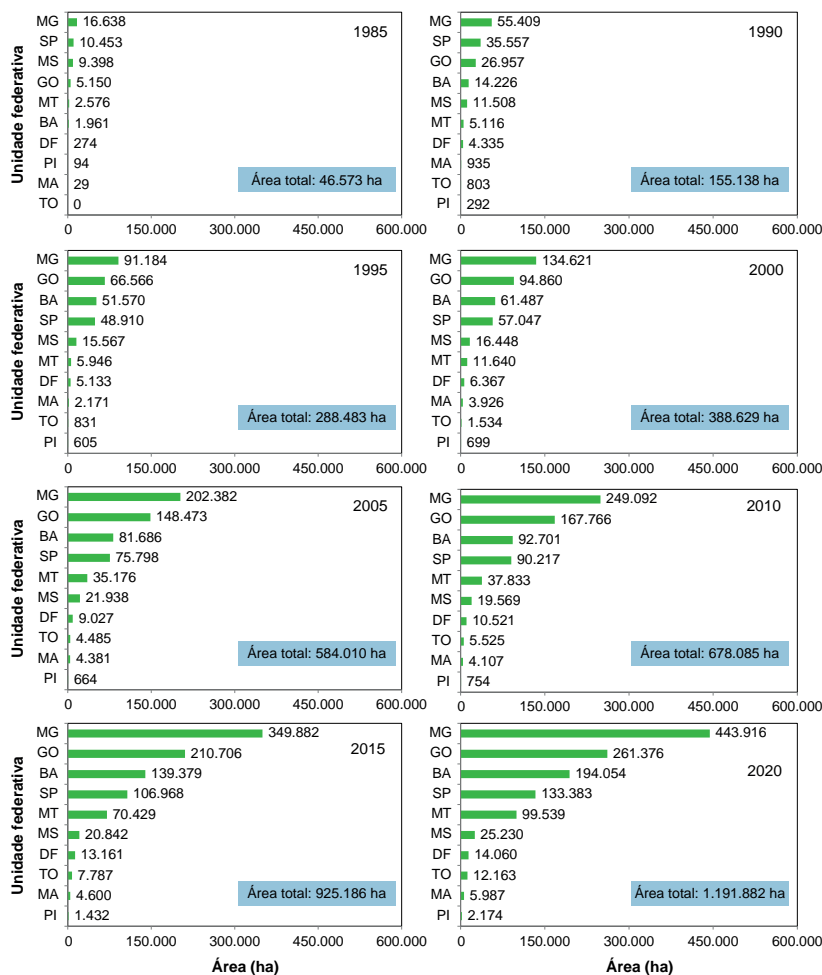


Figura 16.12. Área total irrigada com pivô central por unidade federativa do bioma Cerrado, período 1985–2020.

16.4.3 Dinâmica de pivôs em escala de microrregião

Na Tabela 16.1 são apresentados os grupos das cinco microrregiões com o maior número de pivôs para cada um dos anos analisados. As microrregiões de Paracatu e Unaí do estado de Minas Gerais destacam-se por aparecerem durante todo o período considerado. Em contraste, a microrregião do Sudoeste de Goiás apareceu somente em 1985, enquanto a microrregião de Araxá, estado de Minas Gerais, aparece somente depois de 2010. A porcentagem de participação dessas microrregiões no total de pivôs localizados no bioma Cerrado foi menor em 1985 (29%) e em 1990 (33%), estabilizando-se a partir de 1990 em torno de 36%.

Os estados de Goiás e Minas Gerais destacam-se por apresentarem pelo menos uma microrregião na lista das cinco microrregiões com os maiores números de pivôs no bioma Cerrado (Figura 16.13). Minas Gerais é o único estado que possui pelo menos duas microrregiões na referida lista para todo o período considerado. Os pivôs das microrregiões do Centro-Oeste caracterizam-se por apresentar plantio de culturas anuais como feijão, milho e café. A cafeicultura irrigada é encontrada principalmente nas microrregiões de Araxá, Minas Gerais, e Barreiras, Bahia, conforme destacados, por exemplo, por Ferreira et al. (2018) e Prudente et al. (2020).

Paracatu e Unaí destacam-se novamente por aparecerem em todos os anos do período considerado na lista de cinco microrregiões com as maiores áreas com pivôs (Tabela 16.2). Em 2020, as duas microrregiões com as maiores áreas com pivô foram o Paracatu, Minas Gerais (~ 128 mil hectares) e Barreiras, Bahia (~ 123 mil hectares). O estado de Minas Gerais destaca-se por apresentar quatro microrregiões com as maiores áreas irrigadas com pivô central (Paracatu, Unaí, Januária e Araxá (Figura 16.14).

Tabela 16.1. Grupo de cinco microrregiões com o maior número de pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Microrregião	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
São Joaquim da Barra, SP	89	328	363	378	431			
Dourados, MS	85	98						
Sudoeste de Goiás, GO	55							
Paracatu, MG	51	213	365	521	842	969	1.591	2.259
Unaí, MG	33	98	305	428	577	692	991	1.381
Entorno de Brasília, GO		96	192	341	679	817	1.043	1.289
Barreiras, BA			364	469	646	731	928	1.161
Araxá, MG						461	639	908
Total de pivôs	1.085	2.505	4.444	5.889	9.104	10.503	14.086	18.308
Porcentagem de participação (%)	29	33	36	36	35	35	37	38

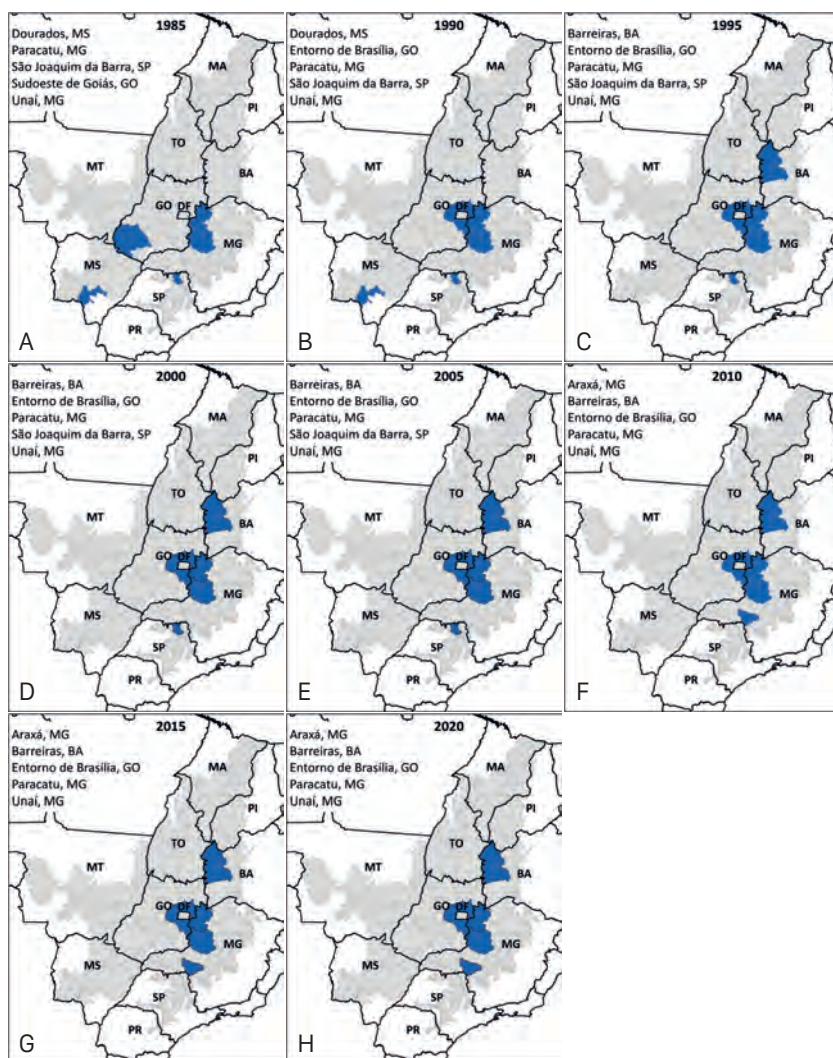


Figura 16.13. Localização das cinco microrregiões com os maiores números de pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Tabela 16.2. Grupo de cinco microrregiões com as maiores áreas com pivô central no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Microrregião	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Dourados, MS	7.581	9.488						
São Joaquim da Barra, SP	5.518	18.313	19.542	19.969	21.371			
Paracatu, MG	3.134	13.811	23.213	31.807	50.550	58.407	96.103	127.881
Unaí, MG	1.849	7.596	22.833	32.127	44.701	54.308	77.769	100.228
Januária, MG	1.591							
Barreiras, BA		6.153	34.833	44.289	59.667	67.543	93.702	123.220
Entorno de Brasília, GO			14.243	26.421	51.834	60.978	75.027	90.557
Araxá, MG						24.961		
Santa Maria da Vitória, BA							36.662	60.623
Área total (ha)	46.573	155.138	288.483	388.629	584.010	678.085	925.186	1.191.882
Porcentagem de participação (%)	42	36	40	40	39	39	41	42

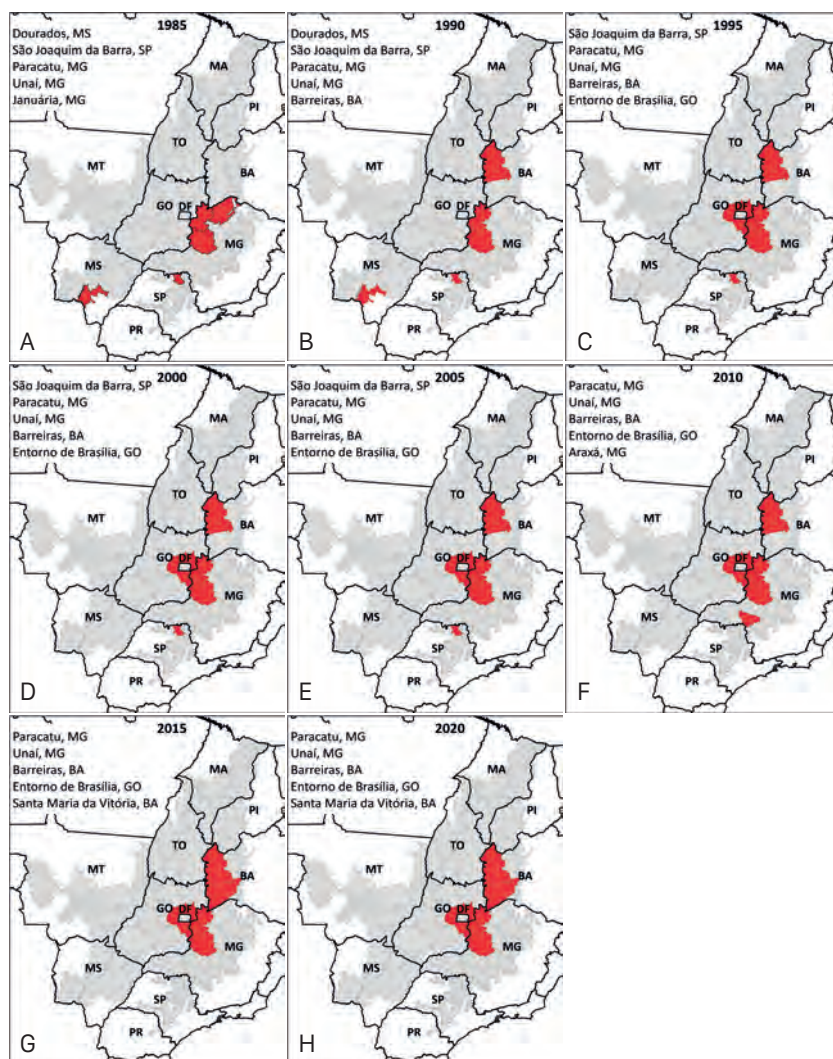


Figura 16.14. Localização das cinco microrregiões com as maiores áreas com pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

16.4.4 Dinâmica de pivôs em regiões hidrográficas

A lista dos grupos das cinco regiões hidrográficas (RH) com o maior número de pivôs para cada um dos anos analisados inclui Ivinhema; Pardo; Paracatu; Alto Araguaia; Sapucaí; Bois; Grande; São Marcos/Veríssimo; Araguaari e Alto Paranapanema (Tabela 16.3).

A RH de Paracatu é a única que aparece em todos os anos, passando de 72 pivôs em 1985 para 2.620 pivôs em 2020. Em 2010, aparece, pela primeira vez, a RH de Alto Paranapanema, permanecendo na lista até 2020. A porcentagem de participação dessas regiões no total de pivôs localizados no bioma Cerrado vai aumentando com o passar dos anos, passando de 33% em 1985 para 44% em 2020. A partir de 2010, não houve alteração na referida lista. As cinco RH localizaram-se nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Bahia (Figura 16.15).

Em termos de área total de pivôs, a RH de Paracatu destaca-se por aparecer em todos os anos do período considerado (Tabela 16.4). Em 2020, as duas RH com as maiores áreas com pivô foram o Paracatu, localizado na divisa entre Goiás e Minas Gerais (~ 153 mil hectares) e Grande, Bahia (~ 121 mil hectares). Conforme mostrada na Figura 16.16, a RH Grande, localizada no Oeste da Bahia, entrou na lista das cinco RH com as maiores áreas com pivô a partir de 1995 (Figura 16.16). A década de 1990 coincide com a grande expansão agrícola verificada nessa região da Bahia, onde foi instalado um grande número de pivôs para o cultivo de café irrigado, além de extensas plantações de soja, milho e algodão, conforme amplamente divulgado na literatura científica (Bendini et al., 2019).

Tabela 16.3. Grupo de cinco regiões hidrográficas com o maior número de pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Região Hidrográfica	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Ivinhema	87	104						
Pardo	78	248	312	331				
Paracatu	72	291	451	614	959	1.134	1.839	2.620
Alto Araguaia	64							
Sapucaí	56	204						
Bois		103	292	336	487			
Grande			380	486	673	754	944	1.159
São Marcos/Veríssimo			288	439	814	997	1.272	1.519
Araguari					563	763	1.062	1.471
Alto Paranapanema						711	944	1.274
Total de pivôs	1.085	2.505	4.444	5.889	9.104	10.503	14.086	18.308
Porcentagem de participação (%)	33	38	39	37	38	42	43	44

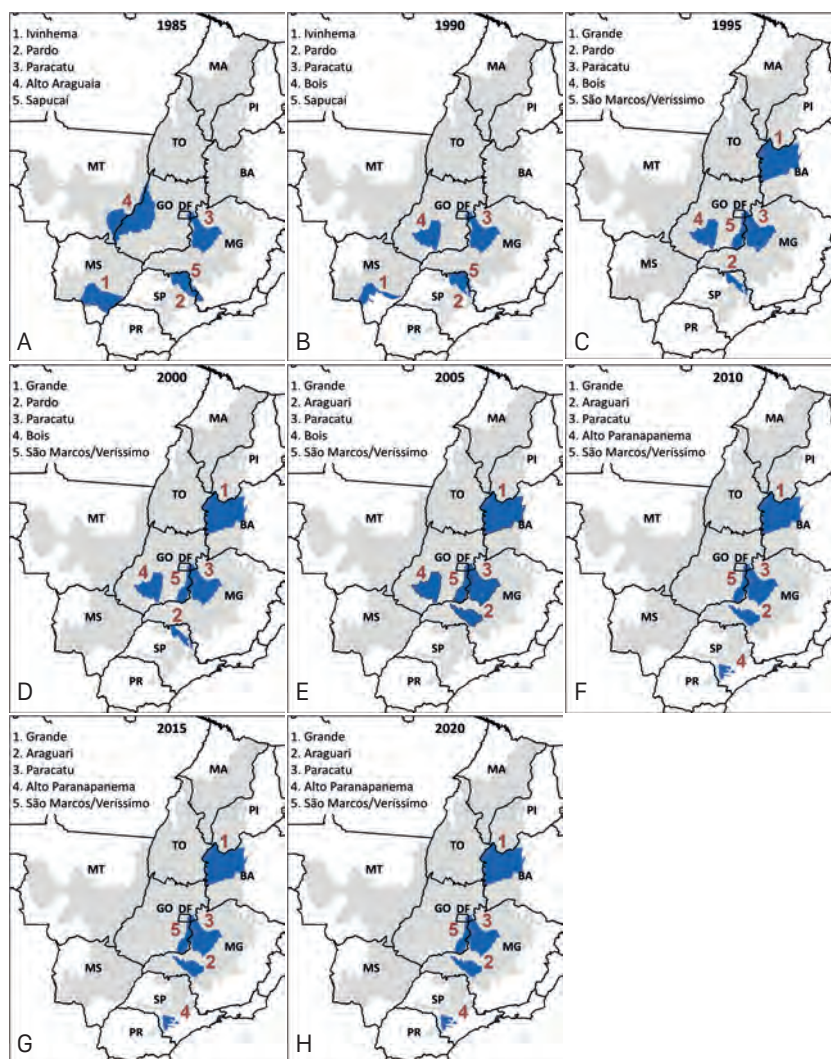


Figura 16.15. Localização das cinco regiões hidrográficas com os maiores números de pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Tabela 16.4. Bacias hidrográficas com as maiores áreas com pivô central no bioma Cerrado, período 1985–2020.

Região Hidrográfica	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Ivinhema	7.587	9.824						
Paracatu	4.623	20.097	30.850	41.030	62.574	72.738	116.180	152.619
Pardo (SP)	4.375	15.324	18.056					
Sapuçaí (SP)	3.121	10.524						
Baixo Grande	2.315							
São Marcos/Veríssimo		6.825	19.931	32.183	62.519	76.460	96.762	110.913
Grande			35.209	44.750	60.507	68.085	93.914	120.927
Bois			19.124	22.632	32.038			
Urucuia				19.207				
Araguari					29.994	39.783	55.705	73.103
Alto Paranapanema						37.967	50.056	65.389
Área total (ha)	46.573	155.138	288.483	388.629	584.010	678.085	925.186	1.191.882
Porcentagem de participação (%)	47	40	43	41	42	44	45	44

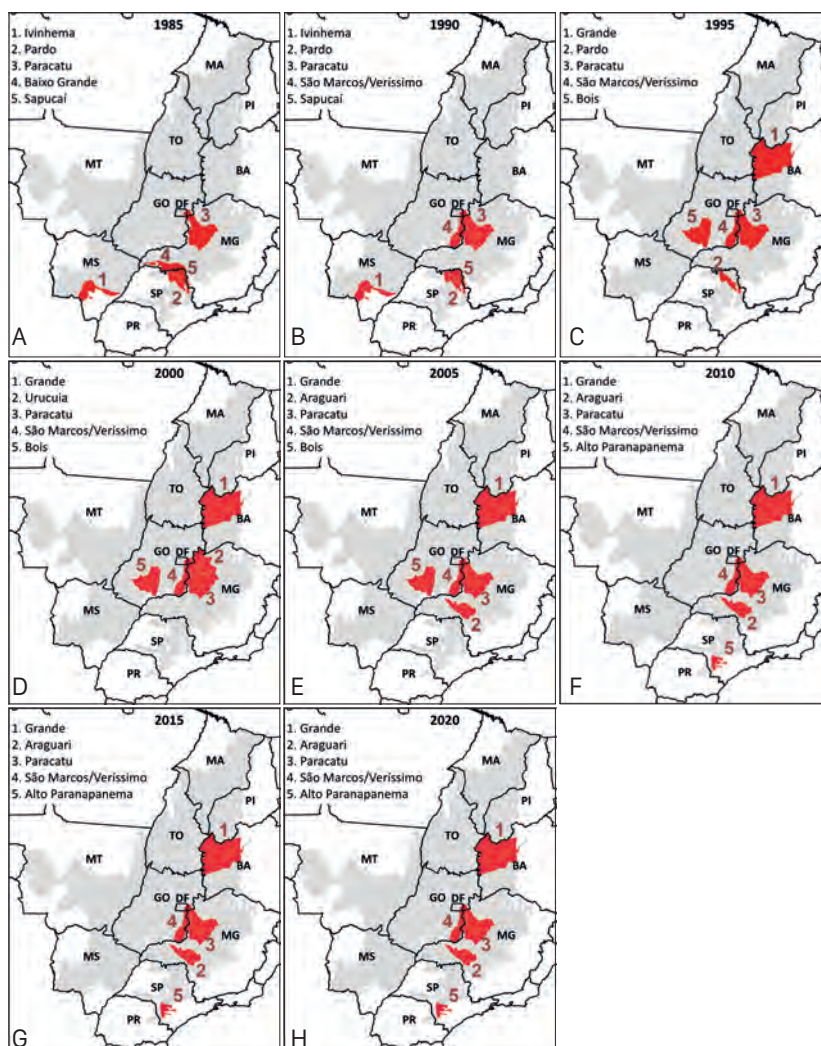


Figura 16.16. Localização das cinco regiões hidrográficas com as maiores áreas com pivôs no bioma Cerrado, período 1985–2020.

16.5 Principais culturas irrigadas

Em 2013, a agricultura anual no Cerrado ocupava 17,4 milhões de hectares, representando 9% da área total, enquanto a agricultura perene ocupava 6,4 milhões de hectares, correspondendo 3% da área total. As principais culturas encontradas foram: culturas anuais de sequeiro, como soja, milho e algodão, principalmente plantados em terrenos planos e com solos profundos, ácidos, de baixa fertilidade e elevada concentração de sílica e alumínio; culturas perenes, como café irrigado e citros; e cana-de-açúcar, considerada como cultura semiperene (Embrapa, 2022).

Segundo estudo realizado pela Agrosatélite, no período de 2000 a 2014, a agricultura anual do Cerrado era composta principalmente por soja, algodão e milho. De acordo com este mesmo estudo, a área de soja era concentrada principalmente nos estados de Mato Grosso (35%) e Goiás (22%). Os estados da Bahia e de Mato Grosso representavam 82% da produção total de algodão no Cerrado. A região do Matopiba apresentava 22% da área cultivada de soja na região. A produção de milho em primeira safra nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais representavam 78% da produção total na região.

Os dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019) indicam que as áreas do Cerrado ocupadas com culturas agrícolas anuais, culturas agrícolas perenes, pastagens cultivadas em boas condições e pastagens cultivadas degradadas totalizavam aproximadamente 67,9 milhões de hectares, o que equivale a um aumento de 11,2% quando comparado ao mesmo Censo realizado no ano de 2006 (IBGE, 2009). Essa diferença foi devido ao aumento das áreas de culturas anuais no Cerrado, principalmente nos estados de Tocantins e Piauí, que apresentaram aumento de 132% e 149%, respectivamente. Em todos os estados, exceto Bahia, observou-se uma redução nas áreas de pastagens nativas, que pode ser explicado pela substituição por gramíneas, como o capim braquiária, ou até por outras culturas agrícolas (Sano et al., 2020).

Analisando a produção agrícola de 2019 dos municípios que compõem o Cerrado (IBGE, 2019) (Figura 16.17), observa-se que a área total plantada com culturas anuais e perenes foi de 42,9 milhões de hectares, o que corresponde a aproximadamente 21% da área total do Cerrado (204,5 milhões de hectares).

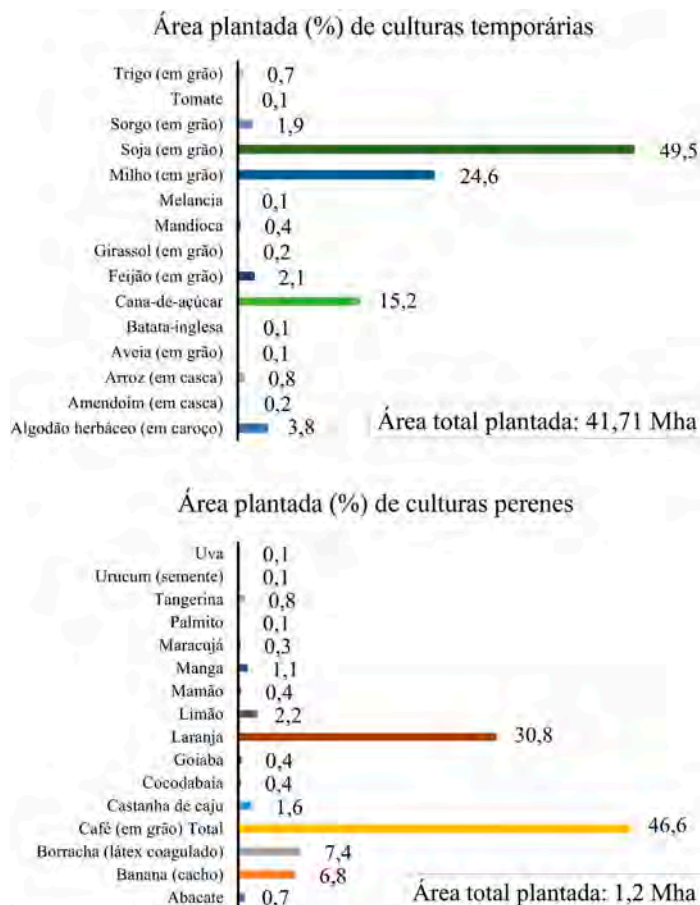


Figura 16.17. Principais culturas e porcentagem de área plantada ($\geq 0,1\%$) de culturas temporárias e perenes cultivadas em municípios presentes no Cerrado em 2019.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Entre as culturas temporárias que têm representação igual ou superior a 0,1% de área plantada, a soja, o milho e a cana-de-açúcar foram as culturas mais cultivadas neste ano de análise, com áreas plantadas de 20,7 milhões, 10,3 milhões e 6,3 milhões de hectares, respectivamente, representando 89,3% da área plantada com culturas temporárias no Cerrado. Já entre as culturas perenes, as com as maiores áreas plantadas foram laranja (30,8%) e café (46,6%). A soja, milho, cana-de-açúcar, café e laranja foram responsáveis por 38,2 milhões de hectares (89% do total) plantados em 2019, o que corresponde a 18,7% da área do Cerrado.

Dados sobre área plantada, área cultivada com irrigação, produção de culturas permanentes (por exemplo, frutas e café), temporárias (por exemplo, soja e milho), horticultura e floricultura são apresentadas na Figura 16.18. Nas culturas permanentes e na horticultura e floricultura, o gotejamento é o sistema de irrigação mais utilizado, representando, respectivamente, 65% e 75% da área irrigada. Já nas lavouras temporárias, o pivô central se sobressai com um percentual de área irrigada de 75%. De modo geral, a área cultivada com irrigação correspondeu a 73% das lavouras temporárias em 2019.

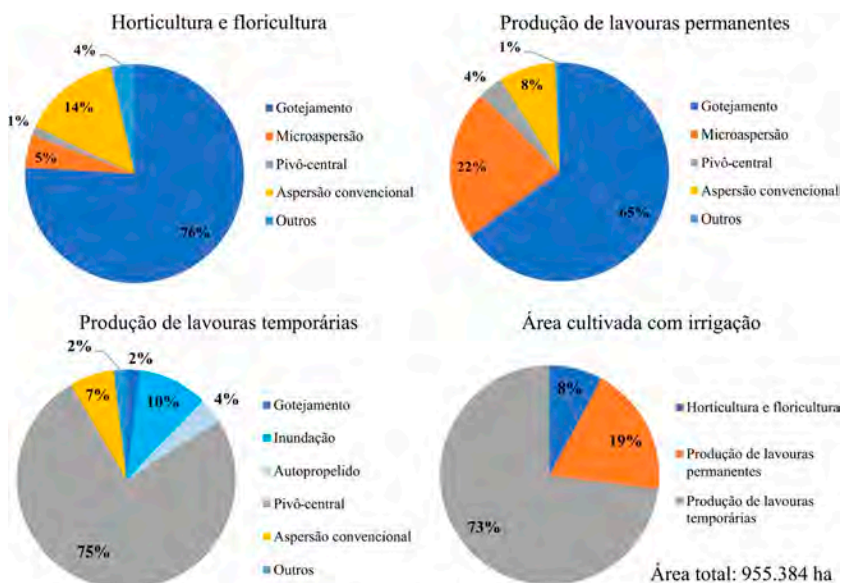


Figura 16.18. Área ocupada com diferentes sistemas de irrigação em 2019 no Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

16.6 Considerações finais

O Cerrado se destaca como uma região estratégica na produção agrícola do país, onde a agricultura irrigada desempenha um papel essencial, principalmente em um mundo em que o clima é cada vez mais variável.

A energia e a água surgem como fatores limitantes para o crescimento da agricultura irrigada. Em comparação com outros usos, o percentual de consumo de água na agricultura irrigada é significativo. Entretanto, em termos absolutos, quando comparado com a vazão média natural em longo prazo, esse consumo é ínfimo, representando menos de 1%. Isso sugere que os recursos hídricos não devem ser considerados como um fator limitante para o desenvolvimento da agricultura irrigada.

De modo geral, o Brasil ainda possui uma baixa taxa de irrigação, ocupando a sexta posição entre os dez países com maior área equipada para esse fim. Essa realidade representa uma oportunidade perdida para impulsionar o desenvolvimento em diversas regiões do país e elevar a qualidade de vida da população.

O crescimento da agricultura irrigada no Cerrado requer uma abordagem ordenada para garantir sua sustentabilidade. Para isso, é crucial compreender a dinâmica desse crescimento na região. Essa compreensão permitirá o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, que possibilitem a implementação de programas e projetos com uma visão sistêmica do ambiente.

16.7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF, 2021. 130 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. Brazil's corn industry and the effect on the seasonal pattern of US corn exports. **USDA. AES: Economic Research Service/USDA**, v. 93, June 2016.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

BENDINI, H. N.; FONSECA, L. M. G.; SCHWIEDER, M.; KORTING, T. S.; RUFIN, P.; SANCHES, I. D.; LEITÃO, P. J.; HOSTERT, P. Detailed agricultural land classification in the Brazilian Cerrado based on phenological information from dense satellite image time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 82, 101872, 2019.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília, DF, 2014. 217 p.

EMBRAPA. TerraClass mostra a cobertura e o uso da terra no bioma Cerrado. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/77150778/terraclass-mostra-a-cobertura-e-o-uso-da-terra-no-bioma-cerrado>. Acesso em: 5 ago. 2022.

FAO. **Aquastat Fao's global information system on water and agriculture**. Disponível em: <http://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>. Acesso em: 17 out. 2022.

FAO. **FAOSTAT Statistical Database**. Rome, 2019.

FAO. Food and Agriculture Policy Decision Analysis. **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. Rome, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3759e/i3759e.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

FAO. **The future of food and agriculture: trends and challenges**. Rome, 2017. 180 p.

FARIAS, D. B. S.; RODRIGUES, L. N. Agricultura irrigada no Cerrado. In: RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; FARIAS, D. B. S.; SANO, E. E.; BETTIOL, G. M.; CAMPOS, J. E. G.; SANTANA, N. C.; AUGUSTO, V. A. (ed.). **Agricultura irrigada no cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2023. Cap. 7, p. 176-200.

FERREIRA, D. S.; RIBEIRO, W. R.; GONÇALVES, M. S.; PINHEIRO, A. A.; SALES, R. A.; REIS, E. F. Cenário da área irrigada por pivô central no Triângulo Mineiro, no estado de Minas Gerais, Brasil. **Nativa**, v. 6, n. 6, p. 613-618, 2018.

HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. L.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd ed. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 2007.

IBGE. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro_2006.pdf. Acesso em: 5 ago. 2022.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 5 ago. 2022.

IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfbr/brasil>. Acesso em: 5 ago. 2022.

KLINK, C. A. Policy intervention in the Cerrado savannas of Brazil: changes in the land use and effects on conservation. In: CONSORTE-MCCREA, A. G.; FERRAZ SANTOS, E. (ed.). **Ecology and conservation of the maned wolf: multidisciplinary perspectives**. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 293-308.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. Denver: USDA, 2016. (USDA. Economic Information Bulletin, 154).

MIRANDA, E. E. de; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Campinas: Embrapa, 2014. 18 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139202/1/NT1-DelimitacaoMatopiba.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO.

Governança dos recursos hídricos no Brasil. Paris, 2015. 307 p.

PRUDENTE, V. H. R.; MARTINS, V. S.; VIEIRA, D. C.; SILVA, N. R. D. F.; ADAMI, M.; SANCHES, I. D. Limitations of cloud cover for optical remote sensing of agricultural areas across South America. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 100414, 2020.

RAMANKUTTY, N.; MEHRABI, Z.; WAHA, K.; JARVIS, L.; KREMEN, C.; HERRERO, M.; RIESEBERG, H. L. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 789-815, 2018.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, DF: INOVAGRI, 2017. 327 p.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, F. D.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. In: RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (Ed.). **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, DF: Inovagri, 2017. p. 21-108.

ROUX, G. **Ancient Iraq.** 3. ed. East Rutherford, NJ: Penguin Books, 1993. 576 p.

RUDORFF, B. (coord.). **MapBiomass Irrigation** – Appendix – Collection 8. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/Irrigation-Appendix-C8.docx.pdf> . Acesso em: 11 dez. 2023.

SANO, E. E.; BETTIOL, G. M.; MARTINS, E. de S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. de C. Características gerais da paisagem do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções.** Brasília, DF: Embrapa, 2020.

SILVA, A. J.; MONTEIRO, M. S. L.; SILVA, M. V. Contrapontos da consolidação do agronegócio no Cerrado brasileiro. **Sociedade e Território**, v. 27, n. 3, 95114, 2015.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. **Dimensionamento lateral de irrigação do pivô-central.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 1988, 54 p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 71).

TANG, J.; ARVOR, D.; CORPETTI, T.; TANG, P. Mapping center pivot irrigation systems in the Southern Amazon from Sentinel-2 images. **Water**, v. 13, n. 3, 2021.

UNITED NATIONS. **World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables.** New York, 2017. Disponível em: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf. Acesso em: 5 ago. 2022.

WORLD WATER WEEK LOOKS "BEYOND THE RIVER", 2006, Stockholm. Proceedings... Stockholm: International Institute for Sustainable Development, 2006. Disponível em: <https://sdg.iisd.org/news/world-water-week-looks-%E2%80%9Cbeyond-the-river%E2%80%9D/>. Acesso em: 27 jun. 2024.



Foto: Anderson Ferreira

Patrocínio

 **LINDSAY™**

VALLEY 

Senninger®

 **BAUER**
POR UM MUNDO VERDE

 **BERMAD**

Embrapa

ISBN 978-85-5467-049-4



CGPE 18619