

ROZIANE SOBREIRA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO SECA/PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA
CONSIDERANDO CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

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

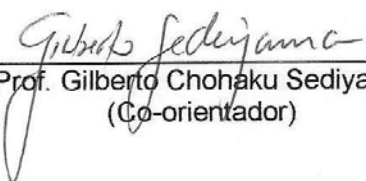
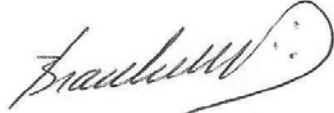
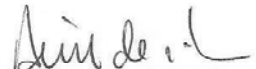
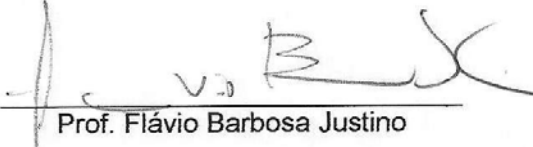

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

ROZIANE SOBREIRA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO SECA/PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA
CONSIDERANDO CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

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

APROVADA: 21 de julho de 2008.

 Prof. Gilberto Chohaku Sedyama (Co-orientador)	 Dr. Bráulio Gonçalves Leal (Co-orientador)
 Prof. Aristides Ribeiro	 Prof. Flávio Barbosa Justino
 Prof. Luiz Cláudio Costa (Orientador)	

*A Deus
A minha mãe (in memoriam)
Ao Robson
A Regina
Aos meus sobrinhos*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus que me protege todos os instantes de minha vida e me ilumina.

Ao meu amado marido Robson, por todo amor e carinho, pelo apoio nos momentos mais difíceis, por toda a dedicação e estímulo e por sua infinita paciência mesmo nas horas mais tensas.

Aos meus queridos sogros Regina e Sinézio por todo carinho, amizade e auxílio.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização desse curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa durante todo o curso.

Ao professor Luiz Cláudio Costa pela orientação e amizade.

Ao professor Gilberto Chohaku Sedyama pelos valiosos ensinamentos e amizade.

Ao Dr. Brauliro Gonçalves Leal pelas valiosas sugestões e amizade.

Ao professor Aristides Ribeiro pela amizade e ensinamentos.

Ao professor Flávio Barbosa Justino pela atenção e sugestões.

Aos demais professores do programa pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelos ensinamentos.

A Francisca Zenaide Lima pelas contribuições e amizade.

Ao Gabriel Constantino Blain do IAC pelas informações e disponibilidade.

A Simone do IBGE pelos dados e atenção.

A Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimentos de Minas Gerais pelos dados de produtividade fornecidos e pela atenção.

Aos colegas da pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio e incentivo durante todo o curso, em especial a aqueles que contribuíram diretamente para a desse trabalho.

A todos os colegas de Viçosa que torceram muito por mim.

Aos meus irmãos, cunhadas, primas e amigos que mesmo longe sempre estão me apoiando e incentivando.

A Graça, secretária da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, sempre disposta a nos ajudar.

Aos meus vizinhos Aparecida e Ademar pela amizade, carinho e dedicação.

A todos os funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola pela presteza.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Roziane Sobreira dos Santos, filha de Rosevelte Sobreira dos Santos e Luzia de Abreu, nasceu no dia 16 de setembro de 1981, em Alegre, estado do Espírito Santo.

Em setembro de 2005, graduou-se em Estatística pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Vitória, Espírito Santo.

Em outubro de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em 21 de julho de 2008.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE QUADROS.....	XVI
LISTA DE TABELAS.....	XVII
RESUMO.....	XIX
ABSTRACT.....	XXI
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1 – AVALIAÇÃO DA SECA NA PRODUTIVIDADE DO MILHO EM MINAS GERAIS.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. OBJETIVO.....	5
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1. O Fenômeno Seca.....	6
3.2. Variabilidade da Agricultura.....	9
3.3. A Cultura do Milho.....	10
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1. Área de Estudo e Base de Dados.....	12
4.2. Índice de Severidade de Seca de Palmer (Pdsi).....	14
4.3. Avaliação da Produtividade da Cultura do Milho nas Diferentes Mesorregiões do Estado.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6. CONCLUSÃO.....	38
CAPÍTULO 2 – IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO MILHO NO ESTADO DE MINAS GERAIS.....	39
1. INTRODUÇÃO.....	39
2. OBJETIVOS.....	40

2.1. Objetivo Geral.....	40
2.2. Objetivos Específicos.....	40
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	41
3.1. As Mudanças Climáticas.....	41
3.2 Cenários do IPCC e Modelos de Circulação Geral.....	41
3.3 Simulações de Produtividade das Culturas	43
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
4.1 Área de Estudo e Base de Dados.....	45
4.2. Metodologia da Zona Agroecológica (AEZ)	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6. CONCLUSÃO	64
CONCLUSÕES GERAIS	65
APÊNDICES	71
APÊNDICE A	72
APÊNDICE B	74
APÊNDICE C	75
APÊNDICE D	76
APÊNDICE E	77
APÊNDICE F	85
APÊNDICE G.....	93

LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

AEZ	Zona agroecológica
CGM	Modelo de circulação geral
CNA	Confederação Nacional da Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
PDSI	Índice de severidade de seca de Palmer
SEAPA	Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
Z	Índice de anomalia de umidade
Ss	Camada superior do solo
Su	Camada sub-superficial do solo
Ls	Perda de água da camada superior
Lu	Perda de água da camada superior
PR	Recarga potencial de água no solo
PL	Perda potencial de água no solo
PRO	Escoamento superficial potencial
CAD	Capacidade de água disponível em ambas as camadas do solo
ET _o	Evapotranspiração de referência
S'	Água armazenada no início do mês em ambas as camadas do
PL _s	Perda potencial na camada superficial
PL _u	Perda potencial na camada sub-superficial
Ss'	Água armazenada no início do mês na camada superficial
Su'	Água armazenada no início do mês na camada sub-superficial
R	Recarga de água no solo
L	Perda de água no solo
RO	Escoamento superficial
CAFEC	Climaticamente apropriado às condições existentes
α	Coeficiente de evapotranspiração
β	Coeficiente de recarga
γ	Coeficiente de escoamento
δ	Coeficiente de perda
$\overline{ET_o}$	Evapotranspiração de referência média mensal

\overline{ETr}	Evapotranspiração média mensal
\overline{PR}	Recarga potencial média mensal
\overline{R}	Recarga média mensal
\overline{PRO}	Escoamento superficial potencial médio mensal
\overline{RO}	Escoamento superficial médio mensal
\overline{PL}	Perda potencial média mensal
\overline{L}	Perda média mensal
\hat{ET}	Evapotranspiração climaticamente apropriada às condições
\hat{R}	Recarga climaticamente apropriada às condições
\hat{RO}	Escoamento climaticamente apropriado às condições
\hat{L}	Perda climaticamente apropriada às condições
\hat{P}	Precipitação climaticamente apropriada às condições
P	Precipitação
d'	Anomalia hídrica
\overline{D}	Média mensal dos valores absolutos de d'
K	Fator de ponderação
X	Índice de severidade de seca de Palmer (PDSI)
TT	Tendência Tecnológica
P1	Produtividade esperada devido aos fatores tecnológicos
P2	Produtividade observada
P1–P2	Resíduo da produtividade
r ²	Coeficiente de determinação
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
MAE	Erro absoluto médio
MBE	Viés médio
d	Índice de concordância de Willmott
IAF	Índice de área foliar
cH	Índice de colheita
cL	Correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar
cN	Correção para a produção líquida de matéria seca
Ymp	Produtividade potencial
G	Duração do ciclo de crescimento
F	Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens
Rso	Radiação solar na superfície para dias claros
Rs	Radiação global à superfície

y_{on}	Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão em dia completamente nublado
y_c	Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão em dia sem nuvens
y_m	Taxa de produção bruta de matéria seca
ET_m	Evapotranspiração máxima da cultura
k_c	Coefficiente da cultura
ET_r^c	Evapotranspiração real da cultura
W	Balanço hídrico diário
S_a	Capacidade de água disponível no solo
z	Profundidade efetiva das raízes
f	Fração de depleção da água do solo abaixo
ρ_j	Fator de proporcionalidade de evapotranspiração real
Y_a	Produtividade limitada por água
k_y	Coefficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1 – Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das estações meteorológicas e mesorregiões estudadas. 12
- Figura 2 – Representação do modelo baseado nas diferenças entre a produtividade observada e a curva de tendência tecnológica. 21
- Figura 3 – Representação do modelo conceitual do resíduo da produtividade versus índice de seca baseado nas diferenças entre a produtividade observada e os pontos da curva de tendência tecnológica. 22
- Figura 4 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Zona da Mata, de 1973 a 2007 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala). 25
- Figura 5 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Sul e Sudoeste, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala). 25
- Figura 6 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala). 26
- Figura 7 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).
..... 26
- Figura 8 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Zona da Mata, no período de 1973 a 2006. 31
- Figura 9 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Sul e Sudoeste, no período de 1973 a 2004. 32
- Figura 10 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, no período de 1973 a 2004. 32
- Figura 11 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de novembro) para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, no período de 1973 a 2004. 33

Figura 12 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de novembro) para a mesorregião Campo das Vertentes, no período de 1973 a 2004.....	33
Figura 13 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice PDSI (mês de dezembro) para a mesorregião Central Mineira, no período de 1973 a 2004.	34
Figura 14 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Jequitinhonha, no período de 1973 a 2004.....	34
Figura 15 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Vale do Rio Doce, no período de 1973 a 2002.....	35
Figura 16 – Distribuição do índice de concordância de Willmott, obtidos com o modelo do índice Z para as diferentes mesorregiões analisadas no período de 1973 a 2004.	37

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Descrição dos estádios de crescimento.....	50
Figura 2 – Representação do modelo conceitual da produtividade estimada e índice de seca.....	52
Figura 3 (a) – Variação das estimativas da produtividade potencial (Y_{mp}); (b) Variação das estimativas de produtividade limitada por água (Y_a) do milho simuladas a partir de dados diários para o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM para as mesorregiões, para o período de 2008 a 2020. 55	55
Figura 4 – Estimativas de perdas por limitação hídrica na produtividade do milho simulada a partir de dados diários para o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM para as mesorregiões, para o período de 2008 a 2020. 56	56
Figura 5 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Y_a) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Zona da Mata, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM. 57	57
Figura 6 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Y_a) e pelo índice Z do ciclo para a mesorregião Sul e Sudoeste, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.	58
Figura 7 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Y_a) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	59

Figura 8 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	59
Figura 9 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Campo das Vertentes, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	60
Figura 10 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Central Mineira, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	61
Figura 11 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Jequitinhonha, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	61
Figura 12 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de Novembro para a mesorregião Vale do Rio Doce, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.....	62

APÊNCICE A

Figura 1 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho nas mesorregiões Campo das Vertentes e Central Mineira Horizonte, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).	72
Figura 2 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho nas mesorregiões Jequitinhonha e Vale do Rio Doce, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).	73

APÊNDICE E

Figura 1 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Zona da Mata.....	77
Figura 2 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.	78

Figura 3 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.	79
Figura 4 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.	80
Figura 5 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Campo das Vertentes.	81
Figura 6 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Central Mineira.	82
Figura 7 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Jequitinhonha.	83
Figura 8 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Vale do Rio Doce.	84

APÊNCICE F

Figura 1 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2006 para a mesorregião Zona da Mata.	85
Figura 2 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.	86
Figura 3 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.	87
Figura 4 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.	88
Figura 5 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Campo das Vertentes.	89
Figura 6 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Central Mineira.	90

Figura 7 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Jequitinhonha..... 91

Figura 8 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Vale do Rio Doce. 92

APÊNDICE G

Figura 1 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Zona da Mata pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 93

Figura 2 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Sul e Sudoeste pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 93

Figura 3 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 94

Figura 4 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020. 94

Figura 5 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Campo das Vertentes pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 95

Figura 6 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Central Mineira pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 95

Figura 7 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Jequitinhonha pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 96

Figura 8 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Vale do Rio Doce pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020..... 96

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

Quadro 1 – Participação relativa dos estados na produção brasileira em 2008..... 11

Quadro 2 – Distribuição espacial do milho em 2008 no estado de Minas Gerais. 11

APÊNDICE B

Quadro 1 – Porcentagens de falhas preenchidas com reanálise em cada mesorregião..... 74

Quadro 2 – Período com maior número de falhas em cada mesorregião.... 74

APÊNDICE C

Quadro 1 – Valores dos coeficientes a' e b' da equação 21 e equação final do PDSI para cada uma das mesorregiões estudadas..... 75

APÊNDICE D

Quadro 1 – Data das simulações do plantio. 76

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Identificação das estações meteorológicas utilizadas.....	13
Tabela 2 – Valores arbitrários de t , X_i , X_{i-1} e ΔX	18
Tabela 3 – Categorias do Índice de Severidade de Seca de Palmer.....	19
Tabela 4 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Zona da Mata.....	27
Tabela 5 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.....	27
Tabela 6 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.....	28
Tabela 7 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.....	28
Tabela 8 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Campo das Vertentes.....	29
Tabela 9 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Central Mineira.....	29
Tabela 10 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Jequitinhonha.....	30
Tabela 11 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Vale do Rio Doce.....	30

CAPÍTULO 2

Tabela 1– Valores da correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL), em função da área foliar da cultura (IAF).....	48
Tabela 2 - Valores do índice de colheita (cH), índice de área foliar (IAF) máximo e duração do ciclo (G) para a cultura do milho.....	48
Tabela 3 – Valores de y_m ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) para a cultura do milho em função da temperatura média durante o ciclo da cultura.....	49
Tabela 4 – Duração dos estádios e coeficientes de cultura para o milho. ...	50
Tabela 5 – Valores da fração de depleção da água do solo e profundidade efetiva das raízes para a cultura do milho.	51

Tabela 6 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Zona Mata.	57
Tabela 7 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Sul e Sudoeste..	58
Tabela 8 – Desempenho do índice Z para o Triângulo/Alto Paranaíba.	58
Tabela 9 – Desempenho do índice Z para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.	59
Tabela 10 – Desempenho do índice Z para Campo das Vertentes.	60
Tabela 11 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Central Mineira.	60
Tabela 12 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Jequitinhonha..	61
Tabela 13 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Vale do Rio Doce.	62

RESUMO

SANTOS, Roziane Sobreira dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2008. **Avaliação da relação seca/produktividade agrícola considerando os cenários de mudanças climáticas.** Orientador Luiz Cláudio Costa. Co-orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Brauliro Gonçalves Leal.

As mudanças climáticas trazem um alerta para um possível aumento de eventos meteorológicos extremos em todas as regiões do globo, sendo crescente a preocupação sobre como os elementos climáticos vão mudar o ambiente e afetar a produção das culturas agrícolas em todo o mundo. Com isso, este estudo investiga a relação entre a produtividade agrícola e a seca em algumas mesorregiões do estado de Minas Gerais, em cenários de mudanças climáticas. Foram utilizados os dados diários meteorológicos históricos do período de 1973 a 2004, e dados projetados pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para o período de 2008 a 2020 para o cenário A1B. No período de 1973 a 2004 foram utilizados os dados de produtividade do milho do IBGE e para estimativas da produtividade futuras utilizou a metodologia da zona agroecológica (AEZ). Os índices de severidade de seca de Palmer (PDSI) e o índice Z foram utilizados em um modelo de regressão, que considera a produtividade a variável dependente e esses índices as variáveis independentes. O desempenho desses modelos foi verificado por meio das estatísticas: coeficiente de determinação (r^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e índice de concordância de Willmott (d). Os resultados mostraram que as variações na produtividade observada (dados do IBGE) não foram bem explicadas pelos índices PDSI e o índice Z, com todos os modelos preditos para as diferentes mesorregiões apresentando menos de 0,5 de concordância com os valores observados e baixíssimos valores do coeficiente de determinação. Para o cenário A1B, os resultados do índice de concordância de Willmott variaram entre 0,48 a 0,90 e os valores de r^2 foram um pouco mais significativos. Contudo, a produtividade estimada pela AEZ apresentou perdas significativas devido a limitações por água para os anos agrícolas de 2008/2009, 2009/2010, 2014/2015, 2018/2019 para as mesorregiões

Triângulo/Alto Paranaíba, Central Mineira e Jequitinhonha. As predições do índice de seca indicam que quando empregados sozinhos, esses índices não se mostraram muito eficientes para avaliar a variabilidade da produtividade. Além disso, como a metodologia AEZ considera apenas limitações por água e uma das grandes incertezas nos modelos de clima futuro é a precipitação, esses resultados não dispensam a necessidade de estudos posteriores, com modelos de simulações de produtividade mais completos, avaliação com diferentes cenários de emissões e índices mais adequados para seca agrícola.

ABSTRACT

SANTOS, Roziane Sobreira dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2008. **Evaluation of the relation agricultural drought/productivity considering climate change scenarios.** Advisor: Luiz Cláudio Costa. Co-advisors: Gilberto Chohaku Sedyama and Bráulio Gonçalves Leal.

This study investigates the relationship between agricultural yield and drought in the state of Minas Gerais. Climate changes have warned to possible increases in meteorological extremes worldwide, as well as have uncertainties on how the climatic events might change the environment and affect world agricultural production in the future. Meteorological data from 1973 to 2004 and data projected by the ECHAM5/MPI-OM model for 2008 to 2020 based upon the scenario A1B. During the period from 1973 to 2004, corn productivity data obtained from the IBGE was used and future productivity estimates were performed using the Agro-ecological Zone (AEZ) methodology. The Palmer drought severity index (PDSI) and the Z index were used in a regression model which considered productivity as a dependant variable and the indices as independent variables. The performance of these models was verified by the following statistical coefficients: determination coefficient (r^2), root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the Willmott index of agreement (d). The results demonstrated variation in the observed productivity (IBGE data) were poorly explained by the PDSI and Z index, as all model predictions for the different regions presented agreement values less than 0.5 with the observed values as well as extremely low determination coefficient values. Scenario A1B illustrated Willmott agreement values ranging from 0.48 to 0.90 as well as slightly more significant r^2 values. However, productivity estimated by the AEZ presented significant loss for the harvests of 2008/2009, 2009/2010, 2014/2015 and 2018/2019 due to the lack of water in the Triângulo/Alto Paranaíba, Central Mineira and Jequitinhonha regions. The drought index predictions show that when working alone, these indices have not proven to be efficient to evaluate variations in productivity. Further, since the AEZ methodology only considers water limitations and one of the great

uncertainties in climate models is precipitation, these results do not spare the need for further studies with more complete productivity simulation models, evaluating with different emission scenarios and more adequate agricultural drought indices.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aumento crescente da população mundial e as projeções de que esse aumento se manterá expressivo durante mais algumas décadas exerce uma forte pressão na agricultura mundial para a produção de alimentos (FAO, 2003). Esse problema torna-se ainda mais complexo quando se adiciona as mudanças que estão ocorrendo no clima global.

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), divulgado em fevereiro de 2007, foi bastante similar aos anteriores ao confirmar a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera. As projeções do cenário mais pessimista apontam um provável aumento em torno de 4,0 °C para final do século XXI, podendo variar entre 2,4 °C e 6,4 °C (IPCC, 2007a). Embora exista uma discrepância em torno dos valores absolutos para esse aumento na temperatura, todos concordam que haverá um ligeiro aumento na temperatura média global.

Cada vez mais as mudanças climáticas são alvo de pesquisas entre os cientistas, devido seus possíveis impactos nos diversos setores. Dentre os quais se destaca o setor agrícola. Este, além de possuir uma relação direta com o clima, também está inteiramente ligado à demanda cada vez maior de alimentos no mundo.

A variabilidade climática tem sido a principal fonte de flutuações na produção mundial de alimentos em regiões áridas e semi-áridas dos países tropicais (SIVAKUMAR *et al.*, 2005). No Brasil, grande parte das perdas agrícolas ocorre em função do clima. Estudos feitos pela Confederação Nacional da Agricultura (CNA) indicam que o setor agrícola brasileiro perdeu 26,5 milhões de toneladas da produção por causa das condições climáticas, nos últimos dois anos (SEAPA, 2007).

As mudanças climáticas trazem um alerta para um possível aumento de eventos meteorológicos extremos como, secas, inundações, geadas e furacões em todas as regiões do globo. Devido à alta dependência da agricultura ao clima, em tal cenário, as culturas de todo o mundo, principalmente de regiões tropicais, como o Brasil, estarão sujeitas a estresses ambientais ainda não observados nas condições climáticas atuais.

Alguns estudos têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas. Oliveira (2007) observou quedas na produtividade potencial das culturas de milho e feijão para as mesorregiões de Minas Gerais, para os anos de 2050 e 2080, quando comparada a produtividade potencial simulada para o ano base de 2000 usando o cenário A2 do modelo HadCM3, sem avaliar o efeito do CO₂. Essa queda foi devida, principalmente, às temperaturas mais altas que têm como consequência, menor assimilação de carbono, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento da taxa de respiração de manutenção. Silva Júnior (2007) simulando a produtividade do milho para os anos de 2020, 2050 e 2080 utilizando o modelo CERES-MAIZE para os cenários de mudanças climáticas A2 e B2, verificou uma diminuição da produtividade devido ao aumento de temperatura e uma redução no ciclo vegetativo, em ambos cenários, sendo mais significativo para o cenário A2. Entre os estudos realizados em outros países, cita-se CHALLINOR *et al.* (2007) que avaliou a importância das temperaturas médias e extremas na cultura do amendoim na Índia, encontrou em algumas simulações uma redução em torno de 70% para o clima futuro. LUO *et al.* (2005) destaca os possíveis impacto das mudanças climática na produtividade do trigo no sul da Austrália para o ano de 2080. No entanto, ainda existe uma série de incertezas sobre tais impactos, uma vez que a produtividade das culturas depende de uma série de fatores biofísicos e socioeconômicos, que são difíceis de quantificar (EWERT *et al.*, 2005).

No que se refere aos eventos extremos de seca, a previsão para a segunda metade do século XXI é de que serão ligeiramente mais frequentes e mais longos do que nos dias atuais (BURKE *et al.*, 2006).

A agricultura brasileira sempre foi afetada pelas adversidades meteorológicas como secas, inundações, granizo, geadas, entre outras, isso se deve, em parte, aos diferentes tipos climáticos e a longa extensão territorial do País. Dentre estes fenômenos, a seca é o que tem maior efeito duradouro, afetando todos os segmentos da sociedade, tanto no âmbito agrícola, quanto econômico e social. Considerando que no futuro as cultivares e práticas de manejo sejam as mesmas e que medidas de mitigação e, ou, adaptações não serão adotadas ou não serão eficientes, as

perdas agrícolas associadas à seca tendem a ser mais expressivas. Enfatizando assim, a vulnerabilidade do setor agrícola diante da seca e a necessidade de mais pesquisas.

Estudar a influência da seca na produtividade agrícola considerando as mudanças climáticas poderá possibilitar o monitoramento, auxiliando o planejamento e atenuação dos seus impactos. Em um país como o Brasil, em que a agricultura possui grande importância, é fundamental que se busque entender as respostas das culturas às condições climáticas.

Juntamente com aquecimento recente são crescentes as preocupações sobre como os elementos climáticos mudaram e vão continuar a mudar o ambiente e afetar as produções das culturas agrícolas.

Com isso, é de extrema importância os estudos que integrem as adaptações que deverão ser aplicadas as práticas agrícolas, visando à convivência com as mudanças climáticas futuras, bem como a busca de um manejo apropriado das culturas e do solo no sentido de reduzir os impactos da agricultura no ambiente. Tornando assim, evidente a necessidade de mais pesquisas para entender as implicações das mudanças climáticas no mundo, considerando as questões econômicas e sociais.

Contudo, os efeitos das mudanças climáticas nas culturas não serão iguais em todo o globo, pois estes dependerão das condições já existentes e da adaptação da espécie local cultivada.

Diante das questões apresentadas, objetivou-se com este estudo investigar a relação entre a produtividade agrícola e a seca no estado de Minas Gerais em cenários de mudanças climáticas.

CAPÍTULO 1 – AVALIAÇÃO DA SECA NA PRODUTIVIDADE DO MILHO EM MINAS GERAIS

1. INTRODUÇÃO

A seca é um dos mais importantes fenômenos naturais relacionados com a condição atmosférica, podendo afetar áreas extensas durante um longo período de tempo, além disso, possui um grande impacto sobre a produção de alimentos e no desenvolvimento econômico. A seca é uma anomalia que ocorre em todos os regimes climáticos com alta ou baixa precipitação pluvial e pode afetar milhões de pessoas ao mesmo tempo.

Esse fenômeno corresponde à característica temporária do clima de uma região, decorrente de precipitações pluviais abaixo da normal climatológica por certo período. O Brasil sofre constantemente com o problema de secas, o que prejudica as atividades econômicas e sociais desenvolvidas no país. Os impactos das secas têm influência direta nas atividades agrícolas.

Sob o ponto de vista agrícola, a seca está relacionada à baixa disponibilidade de umidade no solo que torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas. Todos os anos observa-se perdas na agricultura mundial relacionadas a eventos de seca (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

Devido aos graves impactos da seca, vários estudos vêm sendo realizados em diversas partes do mundo na tentativa de se encontrar soluções que minimizem os efeitos e prejuízos por ela causados (BLAIN; BRUNINE, 2006; 2007; NARASIMHAN; SRINIVASAN, 2005; PURCELL *et al.*, 2003; QUIRING; PAPAKRYIAKOU, 2003; SINGH, 2006; SÖNMESZ *et al.*, 2005; TRNKA *et al.*, 2007; WU; WILHITE, 2004).

Diversos indicadores têm sido utilizados na análise de eventos de seca. Em geral, a frequência e a duração da seca são expressas por meio dos índices de seca. Os índices de seca têm se apresentado, ao longo dos anos, como uma ferramenta na caracterização da seca agrícola, mas, os diferentes índices de seca podem fornecer diferentes respostas quanto aos

impactos e à severidade da seca para uma mesma região, por apresentar diferentes exigências quanto à entrada de dados (QUIRING; PAPAKRYIAKOU, 2003). Cada índice de seca exige algum elemento meteorológico para entrada, como temperatura, precipitação ou evapotranspiração.

Apesar de a seca ser um fenômeno natural que ao longo dos anos sempre trouxe muitos prejuízos a agricultura em Minas Gerais, existem poucos estudos sobre os seus efeitos na produtividade do Estado. Assim, pode-se verificar a importância do entendimento da seca na produtividade do milho no estado de Minas Gerais.

A partir disso, será feita uma tentativa de quantificar os impactos da seca sobre o período de cultivo do milho, através do resíduo da produtividade com os índices de seca desenvolvidos com base em variáveis climatológicas (precipitação e temperatura do ar) sendo utilizados para isso, o Índice de Severidade de Seca de Palmer – PDSI e o Índice Z de anomalia de umidade de Palmer (PALMER, 1965).

2. OBJETIVO

Analisar o impacto da seca na produtividade do milho no estado de Minas Gerais, considerando a produtividade observada nos últimos anos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. O Fenômeno Seca

A seca é um fenômeno meteorológico muito complexo já que: é difícil determinar seu início e seu fim, pode abranger uma área extensa, pode durar um longo período de tempo e é percebida de maneira diferente em cada setor afetado. Ela pode ocorrer em quase todos os regimes climáticos. Não há uma definição clara e completamente aceita para a seca, contudo, ela está relacionada a um déficit de precipitação por um determinado período de tempo (HEIM JUNIOR, 2002, MCKEE *et al.*, 1995).

Segundo Heim Junior (2002), devido ao grande número de setores afetados pela seca, sua amplitude geográfica, sua distribuição temporal e a demanda provocada pela ação humana, tornam difícil o desenvolvimento de uma definição universal para seca. De acordo com McKee *et al.* (1993), não existe nenhuma definição válida para qualquer região, em qualquer época e ainda adequada a toda e qualquer atividade.

A seca é percebida de maneira diferente em cada segmento da sociedade, sendo que, essa percepção depende de como as pessoas estão inseridas na sociedade, sejam elas pesquisadores, políticos, agricultores, cidadãos comuns, entre outros. Até mesmo dentro de cada um desses grupos, há diferenças significativas no entendimento dessa anomalia climática. No entanto, a maior parte dos trabalhos científicos reconhece quatro tipos de seca: seca meteorológica, seca hidrológica, seca agrícola e seca econômica (BYUN; WILHITE, 1999; EDWARDS; MCKEE, 1997; MCKEE *et al.*, 1993; MCKEE *et al.*, 1995; NARASIMHAN, 2004; PALMER, 1965; SINGH, 2006; SÖNMEZ *et al.*, 2005).

A seca meteorológica refere-se à precipitação abaixo das normais esperadas em um determinado local num dado período de tempo. Já a seca hidrológica é definida como sendo a insuficiência no abastecimento de água nos lagos, lençóis freáticos e reservatórios para atender a demanda de uma determinada região.

A seca agrícola está relacionada a baixa disponibilidade de umidade do solo para suprir a demanda de água das plantas. Nesse tipo de seca, a pouca umidade no solo torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas por evapotranspiração.

A seca econômica, por sua vez, ocorre quando o déficit de água induz a falta de bens ou serviços (energia elétrica, alimentos, etc.), devido ao volume inadequado, a má distribuição das chuvas, ao aumento no consumo, ou ainda ao mau gerenciamento dos recursos hídricos. Esta seca está relacionada aos prejuízos financeiros, sociais e ambientais causados pela ausência contínua de água em um determinado local, destacando-se os impactos e a vulnerabilidade desses locais.

Keyantash e Dracup (2002) afirmam que, a menos que a demanda por água da sociedade exceda significativamente o suprimento natural, a seca econômica é uma consequência dos demais tipos de seca, sendo caracterizada monetariamente.

Segundo Wilhite e Glantz (1987) citado por Blain (2005), comum a todos os tipos de seca é o fato delas se originarem de um déficit de precipitação que resulta em uma baixa disponibilidade hídrica, para a atividade que a requer.

Na tentativa de quantificar e caracterizar a seca, várias metodologias vem sendo adotadas por diversos pesquisadores, entre as quais se destacam os índices de seca, que se fundamentam nas variáveis climatológicas e métodos estatísticos visando determinar a intensidade, a duração e a frequência da sua ocorrência (BARRA, 2000). Esses métodos objetivam medir o quanto à precipitação, para um dado período de tempo, tem se desviado da normal climatológica. Devido à complexidade desse fenômeno natural, nenhum índice de seca em particular, tem sido capaz de representar de forma perfeita a intensidade, a severidade e os impactos da seca nos diferentes segmentos (HEIM JUNIOR, 2002). Não há um índice de seca completamente adequado a todas as circunstâncias, porém, alguns índices de seca são mais bem ajustáveis do que outros para determinados estudos.

Existe um grande número de índices de seca, cada um tendo uma grande variedade de dados de entrada e de requisitos, fornecendo diferentes

medidas da seca. Entre os mais utilizados estão: o Índice Severidade de Seca de Palmer (PDSI, sigla em inglês) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI, sigla em inglês) (McKee *et al.*, 1993, 1995).

O PDSI apresenta muitas limitações. Tradicionalmente, os coeficientes usados no cálculo do PDSI são baseados em períodos anômalos secos de determinadas séries históricas. Entretanto, a adoção de diferentes séries históricas pode causar grandes alterações na magnitude do índice de Palmer, para uma mesma região. Essa característica mostra-se bem menos significativa nas variações apresentadas pelo índice Z (KARL, 1986).

De acordo com Alley (1984), pode-se destacar as seguintes limitações do PDSI: a distribuição do índice em uma série histórica longa é bi-modal, o que limita a capacidade do índice em estimar a probabilidade de ocorrência de períodos anômalos, o modelo assume que a capacidade do solo em duas camadas são independentes das mudanças (sazonal e anual) na vegetação de cobertura e desenvolvimento das raízes, o balanço hídrico assume que a evapotranspiração real (ET_r) de um período é igual a evapotranspiração de referência (ET_o) se a precipitação for maior ou igual a ET_o.

Guttman (1998) destaca ainda que o PDSI é extremamente auto-regressivo, varia espacialmente e que a precipitação é o fator dominante.

O índice Z (índice de anomalia de umidade) representa um termo intermediário no cálculo do PDSI. Ele é uma medida das anomalias de umidade mensal e reflete o desvio das condições de umidade em um determinado mês das condições normais de umidade (HEIM JUNIOR, 2002; KEYANTASH; DRACUP, 2002).

Conforme Karl (1986), Quiring e Papakryiakou (2003), o índice Z reflete as condições hídricas do mês em questão, sem a influência de meses precedentes, podendo indicar um mês úmido em meio a uma seca prolongada. Sendo assim, é mais indicado aos interesses agrícolas do que o próprio PDSI. Valores negativos do índice Z denotam períodos secos, enquanto valores positivos períodos úmidos.

3.2. Variabilidade da Agricultura

A variabilidade climática tem sido, e continua a ser, a principal fonte de flutuações na produção mundial de alimentos, nas regiões áridas e semi-áridas de países em desenvolvimento. Ao longo da história, variações extremas de calor e de frio, secas e inundações e várias formas de violência das condições climáticas tem atingido os sistemas agrícolas dessas regiões. Em conjunto com outras características físicas, fatores sociais, políticos e econômicos, a variabilidade e a mudança climática contribuem para a vulnerabilidade da perda econômica, a fome e o deslocamento dos famintos (SIVAKUMAR *et al.*, 2005).

Grande parte das perdas na produtividade agrícola deve-se as variações das condições do clima durante a estação de cultivo.

O Brasil sofre constantemente com secas severas que atinge os estados das Regiões Nordeste, Sul e Sudeste, e que prejudica as atividades econômicas e sociais desenvolvidas nestas regiões. Nas Regiões Sul e Sudeste, os impactos das secas têm influência direta nas atividades agropecuárias. As secas no Nordeste, Sul e Sudeste do país ocorrem com frequência em quase todos os anos, normalmente durante o inverno, causando grandes prejuízos à agricultura e economia local dos municípios.

O que se observa em relação a seca e a produtividade agrícola é que não há muitos estudos associando estes dois temas no Brasil, enquanto em outros países há maior quantidade de pesquisas a respeito deste assunto (NARASIMHAN; SRINIVASAN, 2005; QUIRING; PAPA KRYIAKOU, 2003; TRNKA *et al.*, 2007). Em geral, a maioria dos estudos está relacionada somente a seca, não abrangendo a produtividade. Dentre as pesquisas no Brasil cita-se as de Berlato e Cordeiro (2005) realizada para o estado do Rio Grande do Sul, que relacionou a seca a produtividade das culturas de soja e milho e observaram que grande parte das variações nos rendimentos são explicadas pelas variações na precipitação e a de Gois (2005), que testou o método dos Decis na caracterização dos impactos da seca agrícola na produção do milho em Minas Gerais, obtendo baixos valores do índice de concordância de Willmott e coeficiente de determinação.

3.3. A Cultura do Milho

Em função de seu valor nutritivo e dos altos rendimentos alcançados, o milho (*Zea mays* L.) constitui um dos cereais mais cultivados no Brasil e no mundo, assumindo grande importância social e econômica. Seu consumo é extremamente amplo, vai desde a utilização direta do grão até a industrialização, se transformando em uma gama de produtos. Porém, a maior parte do consumo deste cereal é para alimentação animal, sendo em torno de 70% da produção mundial e de 70% a 80% do milho produzido no Brasil (EMBRAPA, 2007).

O mercado internacional de milho está passando por uma fase de grandes transformações, promovidas principalmente pela decisão dos Estados Unidos de produzirem etanol a partir do milho. O governo americano anunciou a intenção de aumentar a proporção de etanol na gasolina nos próximos dez anos para 20%, o que pode chegar a uma demanda de 132 milhões de litros em 2017 (EMATER-MG, 2007).

O estoque de milho no mundo vem sendo reduzido gradativamente. Outro fator importante é o crescimento econômico alcançado pela China, segundo maior produtor mundial de milho que, conseqüentemente, aumenta o consumo deste cereal internamente, o que vem acontecendo nos últimos anos (EMATER-MG, 2007).

Apesar de seu alto potencial produtivo, no Brasil a produtividade média do milho é de 3.000 kg/ha, mas nas lavouras comerciais este valor é maior devido ao alto nível tecnológico.

Os maiores produtores mundiais de milho são os Estados Unidos, China e Brasil que, em 2005, produziram: 280,2; 131,1; e 35,9 milhões de toneladas, respectivamente (EMBRAPA, 2007).

O milho é cultivado em quase todo território brasileiro, sendo que cerca de 90% da produção concentra-se nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. O Quadro 1 a seguir apresenta a participação dos estados brasileiros na produção de milho em 2008.

Quadro 1 – Participação relativa dos estados na produção brasileira em 2008.

Estados	Produção (t)	Participação
Paraná	15.193.488	26,49%
Mato Grosso	7.251.395	12,64%
Minas Gerais	6.620.504	11,54%
Rio Grande do Sul	5.324.252	9,28%
Goiás	4.794.149	8,36%
Outros Estados	18.174.612	31,69%
Brasil	57.358.400	100,00%

Fonte: IBGE - LSPA - Junho/2008

O Quadro 2 apresenta a distribuição espacial do milho em Minas Gerais em 2008.

Quadro 2 – Distribuição espacial do milho em 2008 no estado de Minas Gerais.

Região	Área Colhida		Produção		Produtividade	
	ha	%	t	%	Kg/ha	Média estadual = 100
Central	120.556	9	481.978	7	3.998	-20
Mata	76.988	6	242.550	4	3.150	-37
Sul de Minas	266.440	20	1.422.741	21	5.340	7
Triângulo	195.993	15	1.216.920	18	6.209	24
Alto Paranaíba	229.320	17	1.463.968	22	6.384	28
Centro-Oeste	104.602	8	492.627	7	4.710	-6
Noroeste	140.350	11	872.234	13	6.215	24
Norte de Minas	105.653	8	216.434	3	2.049	-59
Jequitinhonha/Mucuri	21.917	2	39.391	1	1.797	-64
Rio Doce	61.960	5	171.661	3	2.771	-45
Minas Gerais	1.323.779	100	6.620.504	100	5.001	0

Fonte: IBGE - LSPA - Junho/2008

O milho é uma cultura muito sensível ao estresse hídrico, cujos períodos críticos são: germinação, florescimento, formação de espiga e enchimento de grãos. No período vegetativo a ocorrência de estiagens prolongadas pode resultar em plantas de porte reduzido, com pequena área foliar. O enchimento de grãos é o subperíodo mais sensível a deficiência hídrica. Uma ocorrência de estiagem nesse subperíodo provoca uma redução na produtividade substancialmente maior do que em qualquer outro subperíodo do ciclo do milho (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo e Base de Dados

O estado de Minas Gerais está situado na Região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 14° 13' 57" e 22° 55' 22" S e os meridianos de 39° 51' 23" e 51° 02' 45" W, localizado, portanto, na zona intertropical e sujeito a uma grande diversidade climática.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) subdivide o Estado em 12 mesorregiões geográficas. As análises foram realizadas para as mesorregiões em que há dados meteorológicos disponíveis.

Foram utilizados dados meteorológicos diários das estações meteorológicas de Superfície Convencional do 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), considerando o período de 1973 a 2004. Na Figura 1 pode-se identificar as mesorregiões, bem como as estações meteorológicas utilizadas. A Tabela 1 apresenta a localização geográfica e a altitude das estações.

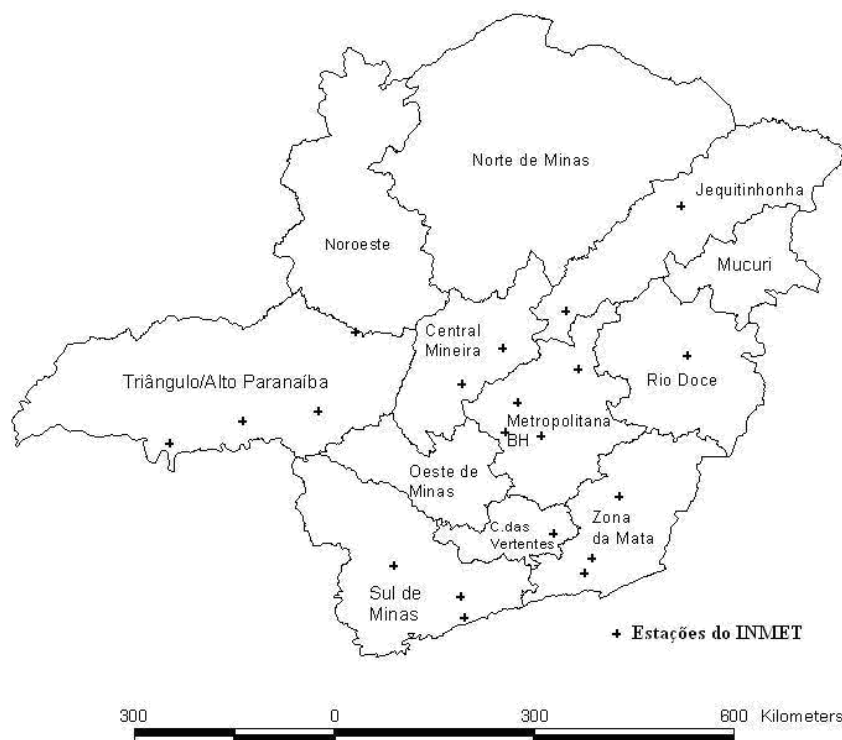


Figura 1 – Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das estações meteorológicas e mesorregiões estudadas.

Tabela 1 – Identificação das estações meteorológicas utilizadas.

Nº da Estação	Localidade	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
83037	Cel. Pacheco	-43.25	-21.58	435
83442	Araçuaí	-42.05	-16.83	289
83531	Patos de Minas	-46.43	-18.52	940.3
83536	Curvelo	-44.45	-18.75	672
83538	Diamantina	-43.60	-18.25	1296.1
83543	Gov. Valadares	-41.93	-18.85	148
83570	Pompeu	-45.00	-19.22	690.9
83574	Frutal	-48.93	-20.03	543.7
83577	Uberaba	-47.95	-19.73	737
83579	Araxá	-46.93	-19.60	1023.6
83581	Florestal	-44.42	-19.87	749
83586	Sete Lagoas	-44.25	-19.47	732
83587	Belo Horizonte	-43.93	-19.93	915
83589	C. do Mato Dentro	-43.43	-19.02	652
83642	Viçosa	-42.85	-20.75	689.7
83683	Machado	-45.92	-21.67	873.5
83689	Barbacena	-43.77	-21.25	1126
83692	Juiz de Fora	-43.35	-21.77	940
83736	São Lourenço	-45.02	-22.10	953.2
83737	Passa Quatro	-44.97	-22.38	920

Para realizar as análises por mesorregiões, foi calculada a média aritmética dos elementos climáticos das estações pertencentes à mesorregião em questão.

Em seguida, as falhas foram preenchidas com os dados de reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF/Reanalysis: ERA-40]. Os dados de reanálise são obtidos a partir de modelos numéricos gerados com base em séries de variáveis meteorológicas disponíveis a partir de vários tipos de observações.

A técnica de reanálise atmosférica processa, simultaneamente, uma grande variedade de observações, usando as leis físicas contidas nos modelos de previsão de tempo (PINTO, 2007).

O ERA-40 é uma reanálise global das condições da atmosfera e da superfície para 45 anos, cobrindo o período de setembro 1957 a agosto de 2002. Este produto é uma combinação entre diferentes fontes de observações meteorológicas (registros convencionais, satélites, aeronaves, radiosonda, etc.), que são interpoladas em uma grade gaussiana de 60 níveis verticais e tendo uma resolução de 2,5° x 2,5° (lat/long), que gera 4 campos de análise por dia (00, 06, 12 e 18 UTC) (ERA-40).

Os dados de produtividade do milho foram obtidos junto ao IBGE e a Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA).

4.2. Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O PDSI desenvolvido por Palmer (1965) considera que o total de precipitação exigida, para manter uma área sob condições econômicas estáveis, depende da média histórica dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses precedentes e do mês considerado.

O PDSI baseia-se nos princípios do balanço entre o suprimento e a demanda de água no solo (balanço hídrico). O solo é dividido em duas camadas, uma superior (S_s) com capacidade de armazenamento de 25,4 mm e outra sub-superficial (S_u). Assim, apenas quando toda água da camada S_s for removida (perda denominada L_s) a camada S_u começará a perder água (L_u). Palmer utilizou o balanço hídrico para calcular os valores potencias de recarga (PR), perda (PL) e o escoamento superficial (PRO) da seguinte forma:

$$PR = CAD - S' \quad (1)$$

$$PL = PL_s + PL_u \quad (2)$$

$$PL_s = \text{Mínimo}[S_s'; ETo] \quad (3)$$

$$PL_u = (ETo - PL_s) * \frac{S_u'}{CAD} \quad (4)$$

$$PRO = CAD - PR = S' \quad (5)$$

em que,

PR = recarga potencial (mm);

S' = água armazenada no início do mês em ambas as camadas (mm);

CAD = capacidade de água disponível em ambas as camadas (mm);

PL = perda potencial (mm);

ETo = evapotranspiração de referência (mm)

PL_s = perda potencial na camada superficial (mm);

PL_u = perda potencial na camada sub-superficial (mm);

S_s' = água armazenada no início do mês na camada superficial (mm);

Su' = água armazenada no início do mês na camada sub-superficial (mm);

PRO = escoamento superficial potencial (mm).

A recarga (R) no solo assume o valor do parâmetro alteração do armazenamento de água quando este for positivo, assumindo valor zero para os demais valores. Enquanto a perda (L) assume o valor desse mesmo parâmetro quando este for negativo.

O escoamento superficial (RO) só ocorre quando a capacidade de retenção de água do solo atingir seu ponto máximo (recarga potencial igual a zero), assumindo, portanto, o valor do excedente no balanço hídrico. Nenhum intervalo de tempo é incorporado no modelo para se considerar o atraso entre a ocorrência do excedente e seu escoamento. Tais fatos podem levar a um erro na estimativa desse parâmetro (ALLEY, 1984; HAYES *et al.*, 1999; KARL, 1986).

Para calcular os parâmetros “Climaticamente Apropriados às Condições Existentes” (CAFEC, sigla em inglês), foram calculados os seguintes coeficientes:

Coeficiente de evapotranspiração:

$$\alpha = \frac{\overline{ETr}}{\overline{ETo}} \quad (6)$$

Coeficiente de recarga:

$$\beta = \frac{\overline{R}}{\overline{PR}} \quad (7)$$

Coeficiente de escoamento:

$$\gamma = \frac{\overline{RO}}{\overline{PRO}} \quad (8)$$

Coeficiente de perda:

$$\delta = \frac{\overline{L}}{\overline{PL}} \quad (9)$$

A barra (—) representa o valor médio das variáveis ao longo da série histórica de dados.

Esses coeficientes são usados para calcular os valores CAFEC de evapotranspiração (\hat{ET}), de recarga (\hat{R}), de escoamento (\hat{RO}), de perda (\hat{L}) e de precipitação (\hat{P}), calculados como segue:

$$\hat{ET} = \alpha * ET_o \quad (10)$$

$$\hat{R} = \beta * PR \quad (11)$$

$$\hat{RO} = \gamma * PRO \quad (12)$$

$$\hat{L} = \delta * PL \quad (13)$$

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L} \quad (14)$$

Após calcular a precipitação CAFEC (\hat{P}) foi determinada a anomalia hídrica (d') que contabiliza o excesso ou deficiência com relação à precipitação observada (P).

$$d' = P - \hat{P} \quad (15)$$

Os valores de d' foram convertidos em polegadas para utilização da classificação de Palmer, apresentadas na Tabela 3.

$$d' = \frac{d'}{25.4} \quad (16)$$

Para que o índice fosse comparável em diferentes localidades e em qualquer período, Palmer (1965) propôs um fator de ponderação designado pela letra K. Este fator foi baseado em dados climáticos de nove regiões dos Estados Unidos da América e é dado por:

$$K = \frac{17.67}{\sum_1^{12} \bar{D}K'} * K' \quad (17)$$

em que,

$$K' = 1.5 * \log_{10} \left[\frac{\left(\frac{\overline{ET_o} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2.80 \right)}{\overline{D}} \right] + 0.50 \quad (18)$$

\bar{D} = Média mensal dos valores absolutos de d' .

O produto entre o fator K de caracterização climática e a anomalia hídrica resulta em um índice de anomalia de umidade (índice Z), padronizado temporalmente e espacialmente.

$$Z = d' * K \quad (19)$$

Valores negativos de Z denotam períodos secos, enquanto valores positivos períodos úmidos.

Após calcular o índice Z, Palmer escolheu treze períodos mais secos dessas séries históricas e realizou uma regressão linear simples entre o índice Z acumulado e o número de meses de ocorrência de tais períodos.

O parâmetro responsável pela especificação do grau de severidade de uma seca é o fator de duração (X). As equações de calibração que determinaram o valor de X_i para cada mês, em cada uma das mesorregiões estudadas, foram deduzidas a partir dos intervalos mais secos nessas mesorregiões. Foram identificados os intervalos, iguais ou maiores que um mês, que apresentaram valores do índice Z negativos (valores menores ou iguais a -1,5) para cada uma das localidades estudadas, em seguida, realizou-se uma regressão linear entre a soma dos valores acumulados de Z nestes intervalos, e seu respectivo período de duração. Em todas as mesorregiões obteve-se uma equação da seguinte forma:

$$\sum Z_i = a*t + b \quad (20)$$

em que,

t = número de meses no intervalo considerado e;

$\sum Z_i$ = índice Z acumulado no intervalo considerado.

Palmer adotou, também, um valor arbitrário de -4 como indicativo de seca extrema. Este valor foi igualmente adotado nesse estudo. Assim:

$$X_i = \frac{\sum Z(t)}{(a*t + b)} \quad (21)$$

em que,

$$a' = \frac{a}{-4} \quad e \quad b' = \frac{b}{-4}$$

As equações de X_i são apresentadas no Apêndice C para cada uma das mesorregiões.

Segundo Palmer, em meses sucessivos, uma certa deficiência hídrica será requerida meramente para manter uma mesma severidade de um período seco, pois uma seca extrema não persistirá nessa categoria se os meses subseqüentes forem normais ou próximos do normal.

Para estabelecer os intervalos mensais de severidade de seca e, desta forma, definir a contribuição de cada mês para o valor do fator de duração, fez-se $t = 1$ e $i = 1$ na equação 21:

$$X_1 = \frac{Z_1}{(a'+b')} \quad (22)$$

A taxa na qual Z deverá aumentar, para ter uma variação de X constante depende dos valores precedentes de X. Deste modo, sugere-se que para os meses posteriores ao mês do início de um período seco, deve-se adicionar um termo c à equação 22:

$$\Delta X = \frac{Z_i}{(a'+b')} + c * X_{i-1} \quad (23)$$

em que,

$$\Delta X = X_i - X_{i-1}$$

A determinação da constante c é feita com base na equação 21. Nesta expressão, pode-se calcular o valor necessário de Z_i para manter um dado valor de X em meses subseqüentes, isto é $\Delta X = 0$. A Tabela 2 abaixo apresenta dois valores arbitrários de $X_{i-1} = X_i$ ocorridos em dois determinados meses t. Essa mesma tabela de valores arbitrários também foi utilizada por Palmer.

Tabela 2 – Valores arbitrários de t, X_i , X_{i-1} e ΔX .

t	X_i	X_{i-1}	ΔX
2	-1	-1	0
10	-1	-1	0
2	-3	-3	0
10	-3	-3	0

Substituindo na equação 21 para os seguintes casos:

a) $X_{i-1} = X_i = -1; t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$ tem-se:

$$\sum Z_1 = -1*(a'+b') \text{ e } \sum Z_2 = -1*(a*2 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

b) $X_{i-1} = X_i = -1; t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$ tem-se:

$$\sum Z_1 = -1*(a*9 + b') \text{ e } \sum Z_2 = -1*(a*10 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

c) $X_{i-1} = X_i = -3; t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$ tem-se:

$$\sum Z_1 = -3*(a'+b') \text{ e } \sum Z_2 = -3*(a*2 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

d) $X_{i-1} = X_i = -3; t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$ tem-se:

$$\sum Z_1 = -3*(a*9 + b') \text{ e } \sum Z_2 = -3*(a*10 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

em que,

ΔZ é o valor necessário para manter uma dada severidade de seca em meses subseqüentes, ou seja, o decréscimo que o índice Z deve apresentar para que uma dada severidade ($X_{i-1} = X_i$) seja mantida.

Por fim, os valores de ΔZ foram aplicados na equação 23 para determinar o valor de c. Assim, a equação 23 resulta no Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).

A Tabela 3 apresenta as categorias de classificação do índice de Palmer.

Tabela 3 – Categorias do Índice de Severidade de Seca de Palmer.

PDSI	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Umidade Alta
2,00 a 2,99	Umidade Moderada
1,00 a 1,99	Umidade Baixa
0,50 a 0,99	Umidade Inicial
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

Pode-se assumir que, apesar de um solo arenoso possuir menor capacidade de retenção de água por unidade de volume do que o solo argiloso, nos solos arenosos há um maior aprofundamento do sistema radicular das plantas, resultando em uma capacidade de água disponível semelhante nos dois tipos de solo (BLAIN; 2005). Baseado nessa afirmação

e no fato desse estudo considerar o desvio (anomalia) que os parâmetros do balanço hídrico climático de um determinado período apresentam em relação aos valores climatologicamente esperados dos mesmos, para o intervalo de tempo em questão, adotou-se o limite de 100 mm como a capacidade de água disponível no solo, para todas as mesorregiões, independente do tipo de solo.

4.3. Avaliação da produtividade da cultura do milho nas diferentes mesorregiões do Estado.

Inicialmente, foi removida a tendência tecnológica (TT), tendência positiva de crescimento da produtividade devido em parte as inovações tecnológicas, o uso de fertilizantes, o aperfeiçoamento das práticas de manejo, as políticas governamentais, o uso de maquinário e melhoramentos das cultivares. A tendência tecnológica é definida como sendo uma função linear do ano (HILL *et al.*, 1980; citado por HUBBARD; WU, 2005).

O estabelecimento de uma tendência tecnológica é um recurso matemático usado para explicar o aumento da produtividade em função do tempo devido às inovações tecnológicas. A Figura 2 apresenta o esquema conceitual da curva de tendência tecnológica que permite explicar a influência das variáveis tecnológicas. A tendência tecnológica representa a produtividade esperada em razão da tecnologia. Admite-se que a diferença entre os pontos da curva e os dados de produtividade para cada ano são resultados de variações climáticas ocorridas nestes anos, ou seja, os resíduos da produtividade observada e esperada refletem os efeitos das variações do clima na produtividade.

A remoção da tendência remove também alguns efeitos do clima, mas os principais efeitos do clima permanecem nos resíduos da produtividade. Portanto, o efeito do clima encontrado a partir desse método irá descrever o desempenho climático na mudança da produtividade (FENG; HU, 2004).

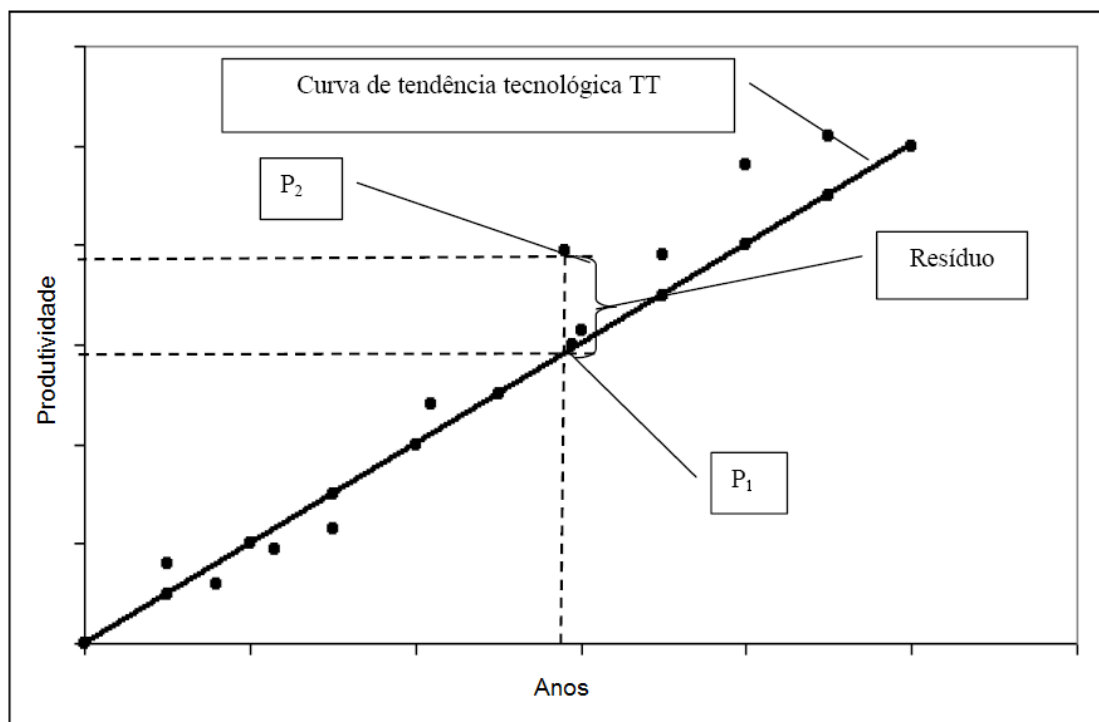


Figura 2 – Representação do modelo baseado nas diferenças entre a produtividade observada e a curva de tendência tecnológica.

A reta representada por TT na Figura 2 é a tendência tecnológica. As diferenças entre os pontos da reta e as observações de produtividade para cada ano (resíduo) são atribuídas às oscilações climáticas ocorridas, em que, P_1 = produtividade esperada devido aos fatores tecnológicos, P_2 = produtividade observada e $P_1 - P_2$ = resíduo que se atribui às variações climáticas.

Os resíduos obtidos entre a diferença dos valores de produtividade observada e a curva de tendência tecnológica, foram ajustados em um modelo de regressão que considera os índices de seca como variáveis independentes e os resíduos como variáveis dependentes (Figura 3). As análises foram feitas considerando o índice acumulado durante o ciclo (Outubro a Janeiro) e o índice de cada mês do ciclo.

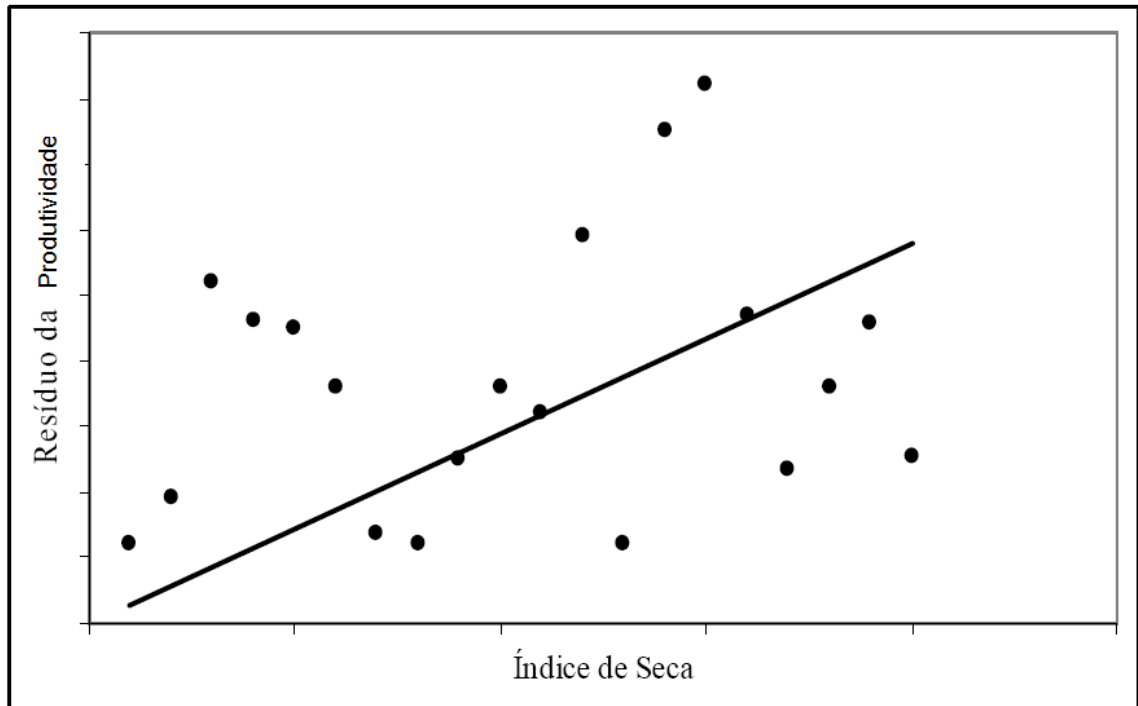


Figura 3 – Representação do modelo conceitual do resíduo da produtividade versus índice de seca baseado nas diferenças entre a produtividade observada e os pontos da curva de tendência tecnológica.

A partir desse modelo calculou-se os resíduos preditos pelos índices de seca dado pela seguinte equação conceitual:

$$\text{Resíduo}_{\text{Predito}} = a * X + b \quad (24)$$

em que, a e b são os coeficientes de regressão da reta do modelo conceitual e X o índice de seca (Figura 3).

O desempenho dos modelos foi verificado por meio das seguintes medidas estatísticas: coeficiente de determinação (r^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE, sigla em inglês), o erro absoluto médio (MAE, sigla em inglês), o viés médio (MBE, sigla em inglês) e o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1982).

O coeficiente de determinação (r^2) descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de r^2 variam de zero a um, quanto mais próximo de um melhor o ajuste. Porém, essa estatística não é muito adequada para medir desempenho de modelos, pois ela é altamente sensível a valores espúrios (outliers). O coeficiente de determinação é calculado por:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (25)$$

O RMSE, MAE e MBE são medidas de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos do modelo (P) e os valores observados (O). O RMSE fornece uma informação em relação à dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores preditos e observados. O MAE é menos sensível a valores extremos. O MBE informa o quanto os valores preditos superestimam ou subestimam os valores observados.

O RMSE, o MAE e o MBE são calculados, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (26)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (27)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (28)$$

O índice de concordância de Willmott (d) mede o grau em que os dados preditos (P) se aproximam dos dados observados (O). Este índice varia de zero a um, sendo, zero nenhuma concordância e um, concordância perfeita. O índice de concordância de Willmott é dado por:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (29)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em quase todas as mesorregiões estudadas observou-se uma tendência de crescimento significativo da produtividade do milho no período de 1973 a 2006, exceto nas mesorregiões Jequitinhonha, Vale do Rio Doce e Central Mineira, em que a produtividade apresenta um comportamento muito irregular ao longo dos anos (Figuras 4 a 7 e Figuras 1 e 2 do Apêndice A). Essa tendência de crescimento era esperada devido aos investimentos tecnológicos e incentivos ao cultivo do milho na região. Observa-se que os valores de produtividade obtida variam muito de uma mesorregião para outra (Figuras 4 a 7 e Figuras 1 e 2 do Apêndice A). As mesorregiões Sul e Sudoeste e Triângulo/Alto Paranaíba apresentam as maiores produtividade e um elevado crescimento nos últimos anos, isso se deve ao fato das lavouras dessas mesorregiões serem destinadas em sua maioria a comercialização (incluindo exportação), empregando assim alta tecnologia e recebendo incentivos governamentais. Já em mesorregiões como Jequitinhonha e Vale do Rio Doce onde não há o emprego de muita tecnologia e a produção é destinada principalmente para o abastecimento local, observa-se baixos valores na produtividade e uma grande variação ao longo dos anos, sendo as lavouras fortemente influenciadas pelo clima (Figura 2 – Apêndice A).

As mesorregiões Metropolitana de Belo Horizonte e Zona da Mata, que apesar de não apresentarem os maiores valores de produtividade, a variação da produtividade em torno da reta de tendência tecnológica é pouco expressiva (Figuras 4 e 7), indicando pouca influência do clima na produtividade dessas mesorregiões.

Os elevados valores dos coeficientes de determinação (r^2) em quase todas as localidades estudadas, destacam a influência positiva da tendência tecnológica na região.

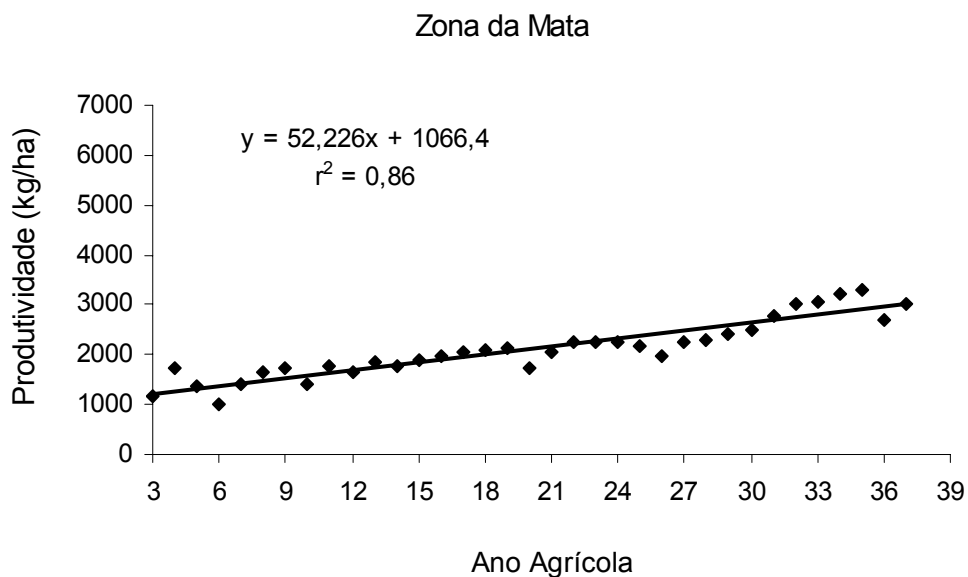


Figura 4 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Zona da Mata, de 1973 a 2007 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

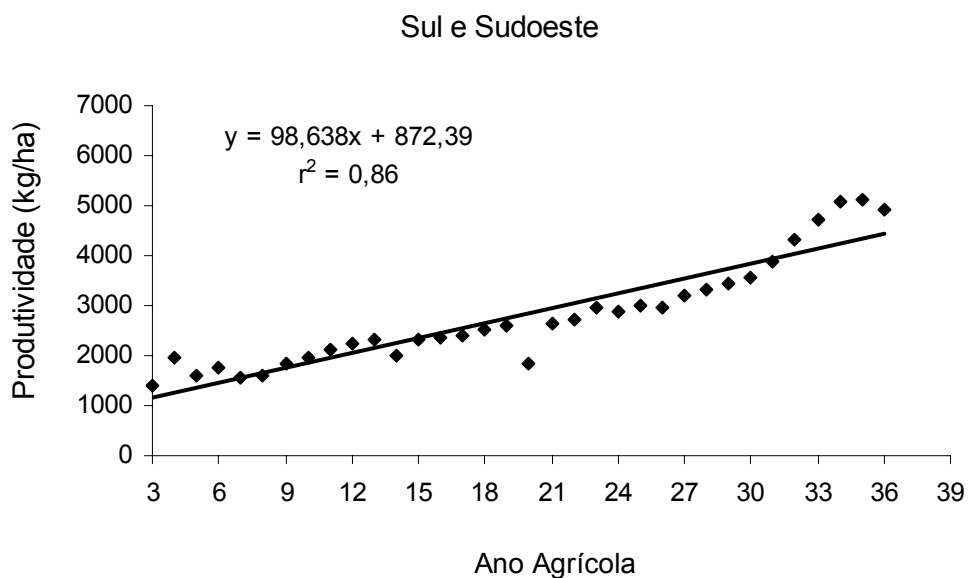


Figura 5 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Sul e Sudoeste, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

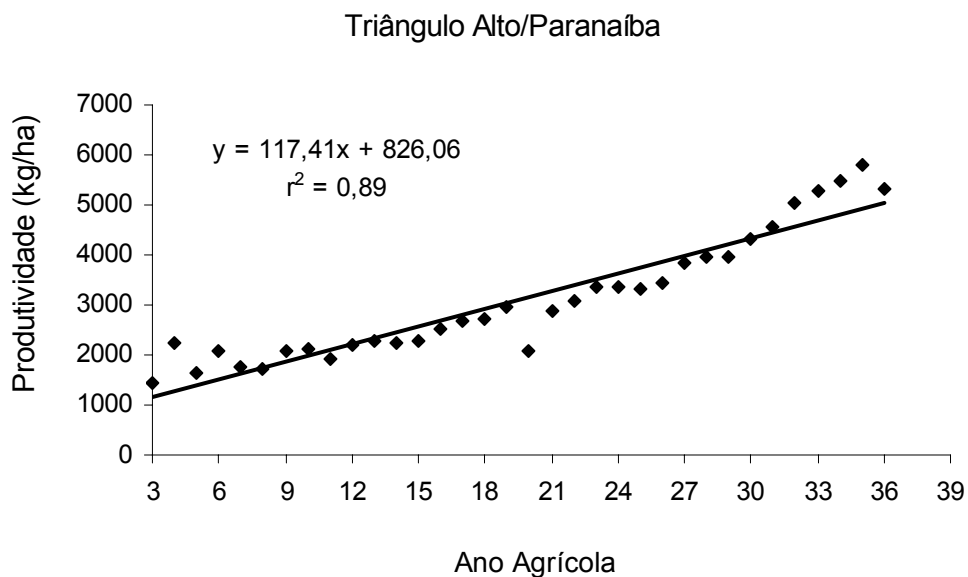


Figura 6 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

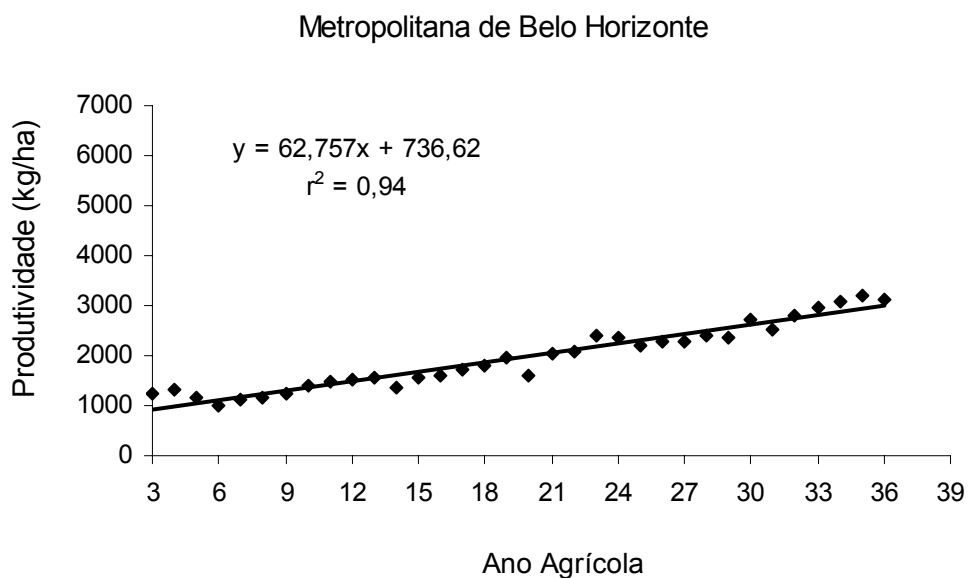


Figura 7 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

O desempenho dos índices Z e PDSI na identificação da variabilidade dos desvios da produtividade do milho em Minas Gerais estão resumidos nas Tabelas 4 a 11.

Tabela 4 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Zona da Mata.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	209,51	164,96	0,31	0,00	0,05	215,66	168,58	0,03	0,00	0,00
Outubro	215,23	165,15	0,08	0,00	0,01	214,49	163,90	0,11	3,15	0,01
Novembro	215,72	167,17	0,03	0,00	0,00	215,19	162,90	0,07	0,00	0,01
Dezembro	210,09	158,16	0,32	0,00	0,06	215,49	166,92	0,01	-1,00	0,02
Janeiro	213,39	169,77	0,18	0,00	0,02	210,92	169,64	0,26	0,00	0,04

Para a Zona da Mata o índice de anomalia de umidade (Z) para o mês de dezembro apresentou os menores valores dos erros RMSE e MAE, da ordem de 210,09 e 158,16 kg/ha, respectivamente. Uma concordância de 0,32 entre os valores dos resíduos preditos e dos resíduos observados. Sendo que esses valores de erros são os segundos menores comparados as demais mesorregiões.

Tabela 5 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	362,66	277,13	0,15	0,00	0,00	362,81	278,89	0,12	0,00	0,02
Outubro	362,91	277,12	0,00	-0,01	0,00	363,52	277,22	0,15	0,00	0,01
Novembro	362,22	273,77	0,08	0,00	0,00	361,69	279,11	0,10	0,00	0,01
Dezembro	360,30	271,77	0,27	0,00	0,03	362,08	275,29	0,08	0,00	0,00
Janeiro	360,46	274,13	0,15	0,00	0,01	362,05	276,22	0,09	0,00	0,00

Na mesorregião Sul e Sudoeste de Minas o modelo do índice Z no mês de dezembro mostrou-se pouco superior ao demais, proporcionando os menores valores dos erros RMSE e MAE e o maior valor do índice de concordância de Willmott.

Tabela 6 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	380,66	286,25	0,22	0,00	0,03	380,96	289,99	0,12	0,00	0,01
Outubro	379,03	282,37	0,18	0,00	0,02	383,04	284,96	0,04	0,00	0,00
Novembro	383,32	285,97	0,09	0,00	0,00	381,95	279,21	0,10	0,00	0,01
Dezembro	378,09	283,67	0,22	0,00	0,03	379,42	285,67	0,17	0,00	0,02
Janeiro	382,45	284,62	0,16	0,00	0,02	382,45	283,53	0,09	0,00	0,00

Novamente o índice Z no mês de dezembro se mostrou melhor que os demais na avaliação dos resíduos da produtividade do milho na mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.

Tabela 7 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	151,98	120,12	0,18	0,00	0,02	151,89	119,98	0,18	0,00	0,02
Outubro	152,58	118,54	0,17	0,00	0,01	152,55	118,56	0,18	0,00	0,01
Novembro	145,99	111,66	0,38	0,00	0,10	146,22	111,92	0,35	0,00	0,09
Dezembro	152,82	121,77	0,11	0,00	0,01	152,50	122,22	0,13	0,00	0,01
Janeiro	149,97	118,72	0,28	0,00	0,05	150,20	118,93	0,26	0,00	0,04

Para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, os menores valores de RMSE e MAE foram obtidos no mês de novembro para o modelo dos resíduos gerados pelo índice Z. Porém, os resultados encontrados para o PDSI foram muito similares ao do índice Z, isso se deve ao fato de que para essa mesorregião a dependência do PDSI das condições de umidade dos meses precedentes foi muito baixa (Apêndice C). Comparada as demais localidades estudadas, essa mesorregião apresentou os menores valores dos erros RMSE e MAE sendo estes 145,99 e 111,66 kg/ha, respectivamente.

Tabela 8 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Campo das Vertentes.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	325,89	262,11	0,38	0,00	0,08	333,61	261,44	0,25	0,00	0,04
Outubro	339,49	264,10	0,04	0,00	0,00	337,91	257,30	0,12	0,00	0,01
Novembro	317,63	245,52	0,44	0,00	0,13	330,70	249,54	0,31	0,00	0,05
Dezembro	324,62	254,47	0,39	0,00	0,09	319,01	252,50	0,40	0,00	0,12
Janeiro	336,84	253,48	0,18	0,00	0,02	333,22	263,92	0,26	0,00	0,04

O modelo de resíduos gerados com o índice Z do mês de novembro para a mesorregião Campo das Vertentes alcançou o maior índice de concordância e os menores valores dos erros RMSE e MAE.

Tabela 9 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Central Mineira.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	437,40	345,71	0,14	0,00	0,01	434,82	342,48	0,19	0,00	0,02
Outubro	436,70	334,93	0,16	0,00	0,02	440,02	341,10	0,01	0,00	0,00
Novembro	424,06	344,55	0,35	0,00	0,07	433,28	346,77	0,21	0,00	0,03
Dezembro	432,11	333,55	0,22	0,00	0,04	420,86	341,52	0,37	0,00	0,09
Janeiro	431,94	338,07	0,25	0,00	0,04	438,53	341,70	0,10	0,00	0,01

Na mesorregião Central Mineira os índices estudados apresentaram um comportamento um pouco diferente em relação às demais, pois o índice que resultou nos menores valores dos erros calculados foi o PDSI no mês de dezembro. Contudo, em relação aos erros encontrados nas demais mesorregiões analisadas, os valores dessa região são os que possuem as maiores diferenças médias entre os resíduos observados e os resíduos preditos. Sendo o RMSE igual 420,86 kg/ha e o MAE igual a 341,52 kg/ha.

Tabela 10 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Jequitinhonha.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	328,74	264,92	0,03	0,00	0,00	328,68	264,61	0,04	0,00	0,00
Outubro	328,29	265,24	0,07	0,00	0,00	326,54	266,75	0,15	0,00	0,01
Novembro	326,73	261,67	0,14	0,00	0,01	325,48	258,99	0,18	0,00	0,02
Dezembro	289,42	223,30	0,59	0,00	0,23	291,26	220,81	0,58	0,00	0,22
Janeiro	294,37	224,76	0,56	0,00	0,20	308,30	238,88	0,45	0,00	0,12

O maior valor do índice de concordância de Willmott foi obtido na mesorregião Jequitinhonha, sendo igual a 0,59 para o mês de dezembro do modelo do índice Z. Esse valor foi bastante superior aos valores encontrados nas demais localidades. Essa mesorregião apresentou o maior valor de coeficiente de determinação ($r^2=0,23$) para o ajuste da curva de tendência tecnológica, apresentado assim uma grande variabilidade na produtividade do milho devido à seca. Apesar do valor de RMSE ser maior no mês de dezembro, tanto para Z como para o PDSI, o índice Z deste mês é mais adequado devido ao conjunto MAE, d e r^2 que apresentou os melhores resultados em relação aos demais. Essa mesorregião apresentou o melhor modelo de predição.

Tabela 11 – Desempenho dos índices Z e PDSI para a mesorregião Vale do Rio Doce.

Período	Índice Z					PDSI				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	300,29	234,91	0,21	0,00	0,01	330,25	253,40	0,19	-8,35	0,02
Outubro	299,83	211,55	0,20	0,00	0,01	316,37	240,45	0,26	-13,90	0,00
Novembro	290,94	226,45	0,37	0,00	0,07	301,26	232,60	0,21	-7,18	0,07
Dezembro	287,44	227,58	0,40	0,00	0,09	304,11	243,78	0,32	-11,01	0,02
Janeiro	288,71	234,10	0,41	0,00	0,08	317,61	246,80	0,14	-5,07	0,04

Similar a maioria das mesorregiões, o índice Z para mês de dezembro apresentou os melhores resultados para a mesorregião Vale do Rio Doce.

O índice Z apresentou um desempenho um pouco superior ao PDSI, com os menores valores de RMSE e MAE em quase todas as localidades estudadas. Esse resultado era esperado, pois o PDSI possui uma forte

dependência dos meses precedentes. Já o índice Z considera apenas as condições hídricas do mês em estudo, sendo mais recomendado para avaliar períodos curtos de deficiência hídrica. Na cultura do milho, dependendo da fase fenológica, poucos dias de déficit hídrico podem reduzir a produtividade em mais de 50%.

Quiring e Papakryiakou (2003), estudando o desempenho de quatro índices de seca no cultivo de trigo nas pradarias canadenses, também verificaram que o índice Z ajustou melhor os resíduos da produtividade do trigo.

Os melhores ajustes foram obtidos nos meses de dezembro e novembro, o que de certa forma coincide com as fases mais críticas do milho ao déficit hídrico.

As Figuras a seguir apresentam as variações dos resíduos observados e dos resíduos estimados pelos índices de seca no mês em que o ajuste foi melhor para cada uma das mesorregiões analisadas.

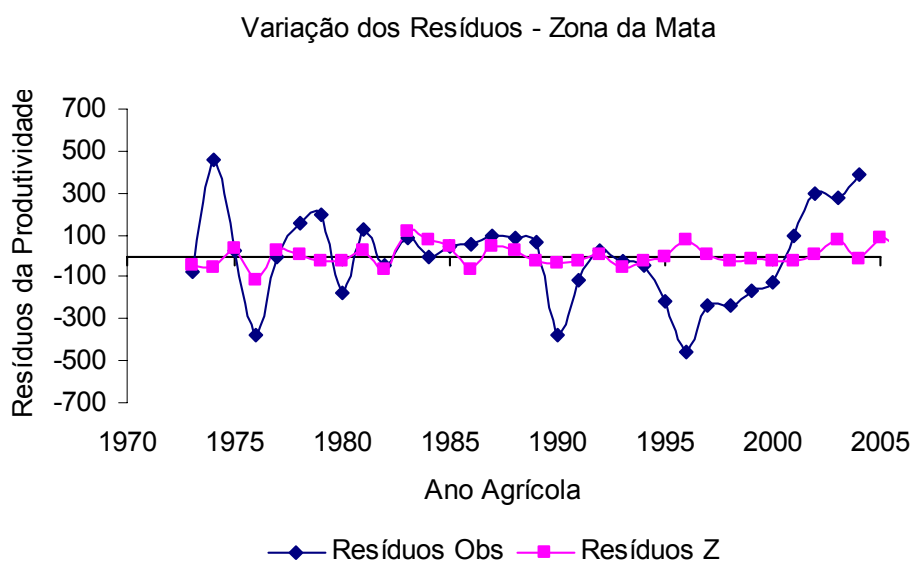


Figura 8 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Zona da Mata, no período de 1973 a 2006.

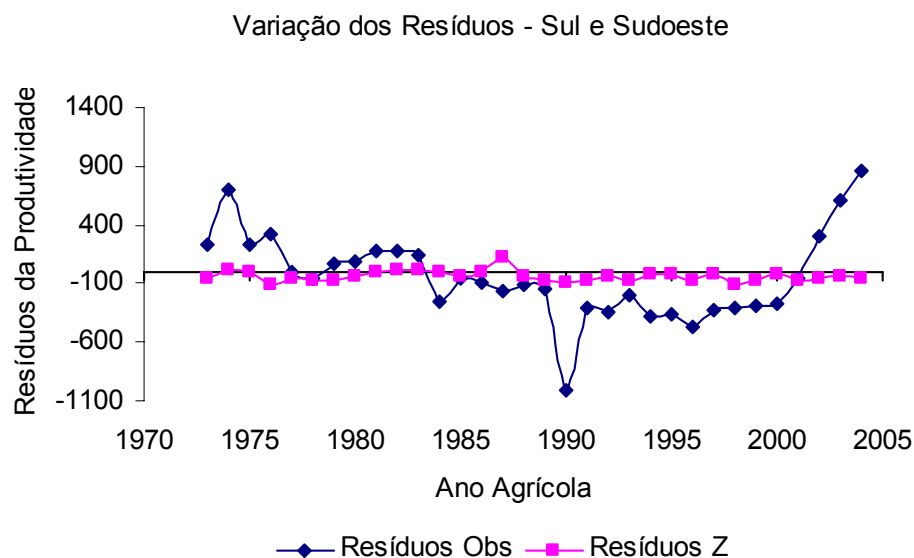


Figura 9 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Sul e Sudoeste, no período de 1973 a 2004.

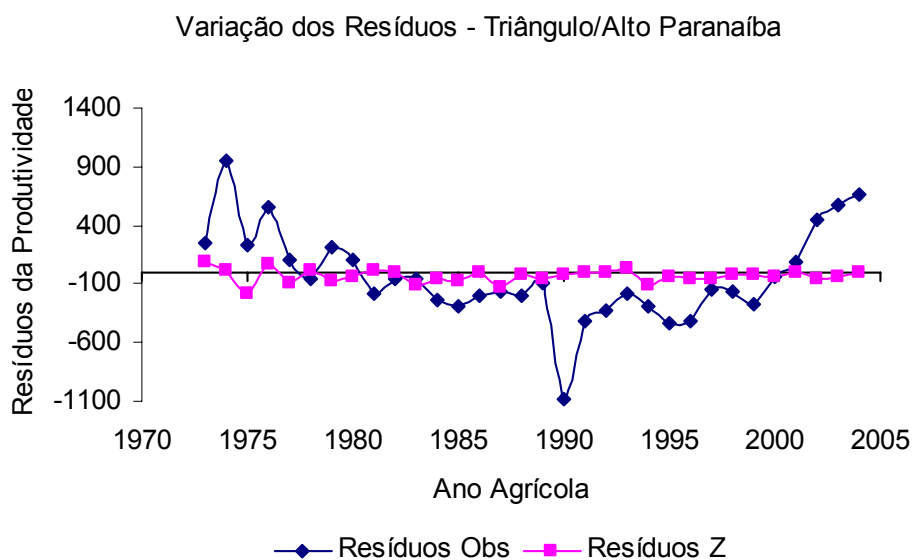


Figura 10 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, no período de 1973 a 2004.

Varição dos Resíduos - Metropolitana de Belo Horizonte

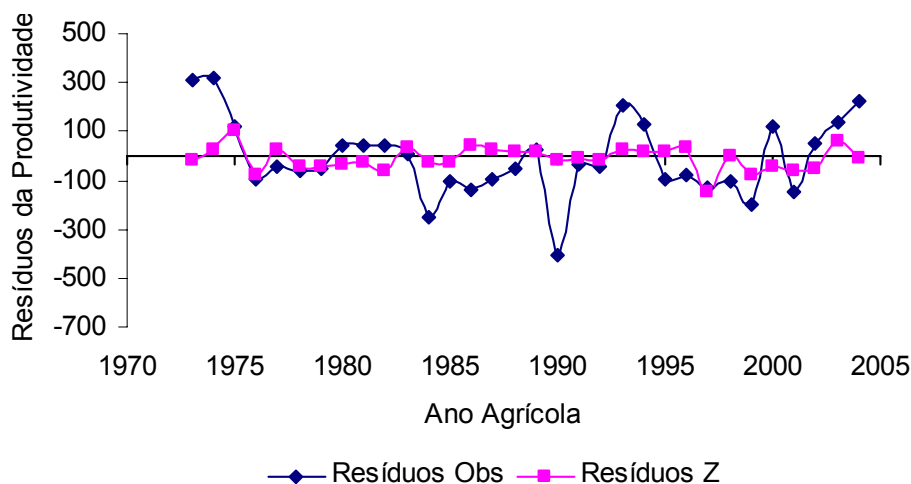


Figura 11 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de novembro) para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, no período de 1973 a 2004.

Varição dos Resíduos - Campo das Vertentes

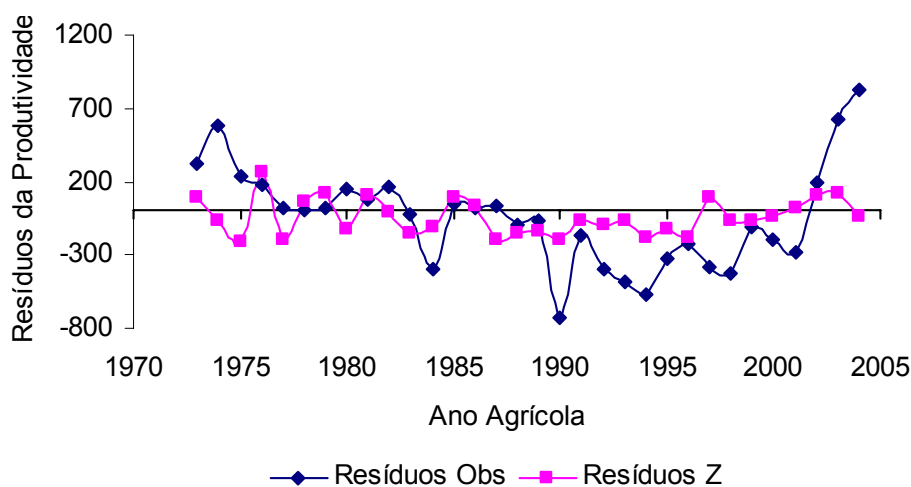


Figura 12 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de novembro) para a mesorregião Campo das Vertentes, no período de 1973 a 2004.

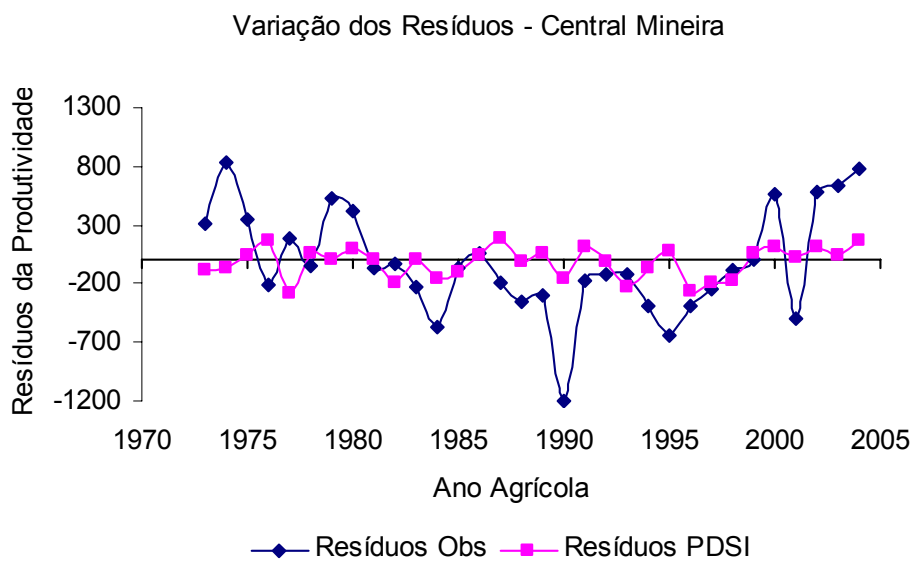


Figura 13 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice PDSI (mês de dezembro) para a mesorregião Central Mineira, no período de 1973 a 2004.

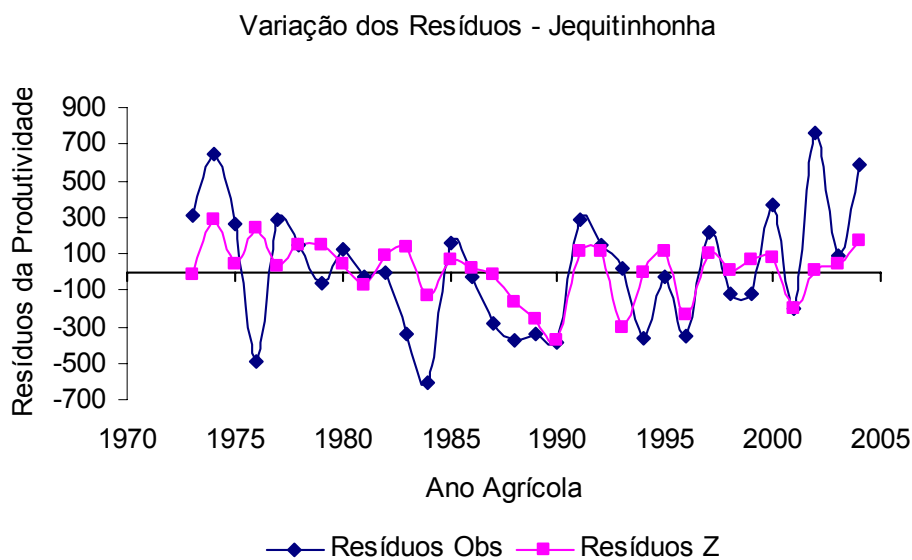


Figura 14 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Jequitinhonha, no período de 1973 a 2004.

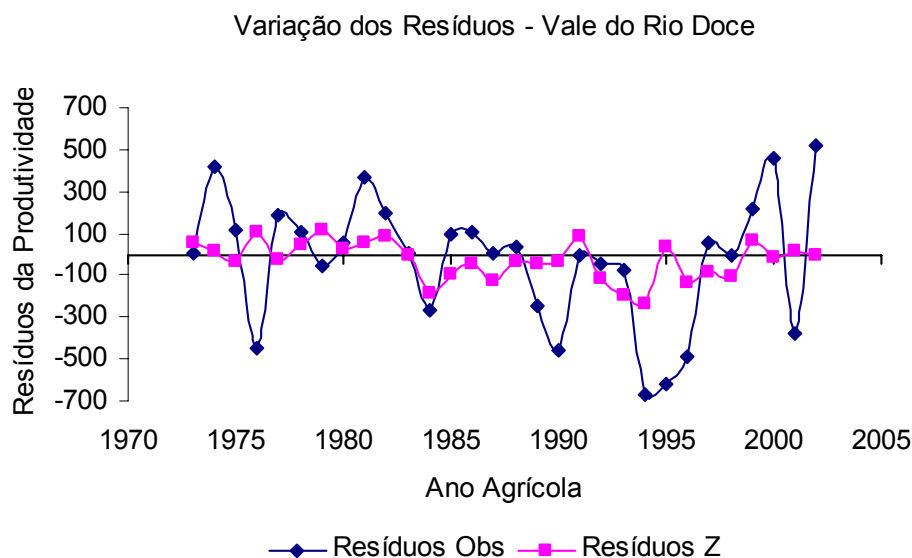


Figura 15 – Variação dos resíduos observados (Obs) e dos resíduos estimados pelo índice Z (mês de dezembro) para a mesorregião Vale do Rio Doce, no período de 1973 a 2002.

Apesar dos ajustes encontrados para o índice Z para os meses de dezembro e novembro apresentados nas Tabelas de 4 a 11 terem sido os mais adequados, as Figuras 8 a 15 mostram que estes ajustes não foram totalmente satisfatórios. Em todas as mesorregiões os modelos dos resíduos estimados tendem a superestimar as variações em anos com resíduos observados negativos e subestimar quando os resíduos observados são positivos (Figuras 8 a 15). Os piores ajustes foram encontrados nas mesorregiões Sul e Sudoeste (Figura 9), Triângulo/Alto Paranaíba (Figura 10), Metropolitana de Belo Horizonte (Figura 11) e Zona da Mata (Figura 8), que são regiões com alta produtividade e com elevados valores do coeficiente de determinação com a curva de tendência tecnológica. Enquanto em mesorregiões como Jequitinhonha (Figura 14), em que há uma grande variação entre produtividade e a curva de tendência tecnológica, os resíduos estimados aproximam-se melhor dos resíduos observados. Isso ocorre principalmente devido a influência da tendência tecnológica no cultivo do milho, pois mesorregiões como Sul e Sudoeste, Triângulo/Alto Paranaíba, Metropolitana de Belo Horizonte utilizam sementes de melhor qualidade, sistemas de irrigação, entre outras melhorias no cultivo, minimizando assim as influências negativas do clima na produtividade. O que não ocorre nas

mesorregiões como Jequitinhonha e Vale do Rio Doce, onde a cultura, em geral, está exposta a todas as adversidades climáticas e por serem regiões com baixo índice de precipitação, o déficit hídrico passa a ser um fator extremamente relevante para a produtividade, por isso os resíduos estimados pelo índice de seca foi melhor para essas mesorregiões, visto que o índice considera apenas elementos climáticos em sua composição.

A Figura 16 apresenta a distribuição do índice de concordância de Willmott nas diferentes mesorregiões analisadas nos meses em que ocorreram os melhores ajustes. Os valores do índice de concordância de Willmott (d) são muito pequenos, apresentando menos de 0,5 de concordância dos resíduos preditos pelos modelos de índices de seca com os resíduos observados na produtividade de milho nas diferentes mesorregiões, exceto para a mesorregião Jequitinhonha em que a concordância foi de 0,59. A mesorregião Jequitinhonha é uma região bem seca e com cultivo empregando pouca tecnologia, com isso o índice detectou melhor a variabilidade dos resíduos observados.

Entretanto, os resultados encontrados aqui são superiores aos encontrados por Gois (2005), que analisou o desempenho do Método dos Decis na produção de milho em Minas Gerais, obtendo para as mesorregiões Zona da Mata, Triângulo/Alto Paranaíba e Metropolitana de Belo Horizonte valores do índice d de Willmott iguais a 0,35, 0,22 e 0,04, respectivamente.

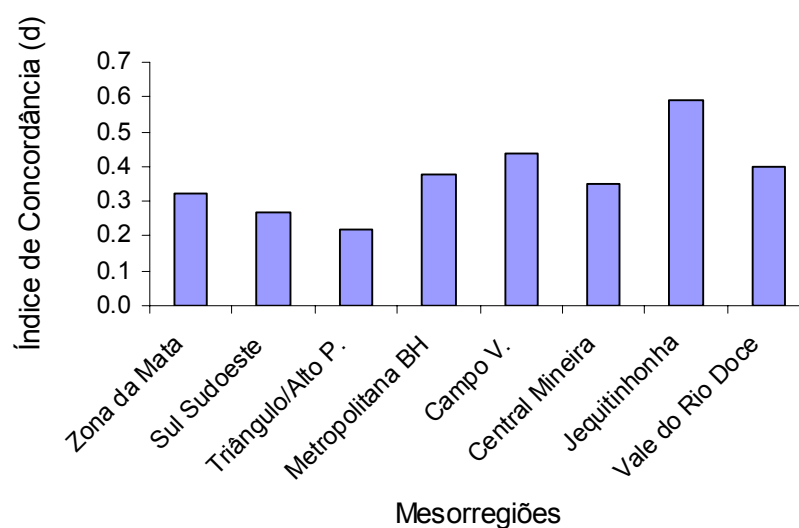


Figura 16 – Distribuição do índice de concordância de Willmott, obtidos com o modelo do índice Z para as diferentes mesorregiões analisadas no período de 1973 a 2004.

Juntamente a isso, os baixíssimos valores do coeficiente de determinação (r^2), mostram que esses índices analisados, sozinhos, não são completamente capazes de explicar os desvios na produtividade ao longo dos anos. Contudo, os valores de r^2 são similares aos obtidos por Gois (2005), com valores iguais 0,076, 0,033 e 0,001 para as mesorregiões Zona da Mata, Triângulo/Alto Paranaíba e Metropolitana de Belo Horizonte, respectivamente. Trnka *et al.* (2007), estudando a variabilidade de 62 distritos produtores de cevada na primavera da República Tcheca encontrou apenas 23 casos em que o índice Z foi capaz de explicar mais de 25% da variabilidade na produtividade e somente em um distrito em que essa variabilidade explicada foi maior do que 50%.

Além dos baixos valores do coeficiente de determinação e do índice de concordância de Willmott, deve-se destacar os dados de produtividade do IBGE, que correspondem a uma média da produtividade nas mesorregiões, considerando dados de produtividade desde fazendas com altíssimo nível de tecnologia, manejo, genética, etc, como dados de pequenos produtores com o cultivo de subsistência expostos a todos os tipos de adversidades. Ao mesmo tempo, as variações observadas na produtividade podem ter efeitos de outros elementos climáticos, além da seca.

6. CONCLUSÃO

Os resíduos calculados do índice Z dos meses de dezembro e novembro foram os mais adequados para prever os desvios da produtividade de milho nas mesorregiões estudadas em Minas Gerais. Contudo, os baixos valores do coeficiente de determinação e do índice de concordância de Willmott, indicam que apenas este índice não é suficiente para estimar toda a variabilidade dos resíduos observados (desvios da tendência tecnológica).

Apesar dos índices Z e PDSI ainda serem um dos mais utilizados no mundo, eles possuem algumas deficiências, pois não consideram nenhuma característica da cultura. Como o solo é dividido em duas camadas fixas e não é avaliado o tipo de solo e a distribuição da água nas suas camadas.

Além disso, a variabilidade na produtividade observada pode ser consequência de outros fatores climáticos, como, por exemplo, à temperatura, além do déficit de precipitação, tornando-se necessário um estudo mais elaborado que envolva não somente os índices de seca como também outros indicadores agrometeorológicos. Ao mesmo tempo, outros índices de seca agrícola devem ser testados, objetivando melhores previsões. Também é importante trabalhar com os dados de produtividade experimentais onde pode-se identificar melhor a influência do clima, ou ainda separar dados de localidades com alta tecnologia e sistemas de irrigação, pois nestas análises com índice de seca seria desnecessária.

CAPÍTULO 2 – IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO MILHO NO ESTADO DE MINAS GERAIS

1. INTRODUÇÃO

Analisar os impactos das mudanças climáticas a fim de compreender o que pode ser feito para fins de mitigação e, ou, adaptação, tem sido uma grande preocupação de pesquisadores e governos em todo o mundo. Com isso, muitos estudos estão direcionados para essa questão. Em destaque vêm os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), base de pesquisa para a maioria dos grupos pesquisadores pelo mundo. Em seus últimos relatórios, divulgados em 2007, o IPCC afirma com grande probabilidade que as causas do aquecimento global são as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (IPCC, 2007a).

Quando se analisa os possíveis impactos das mudanças climáticas, os relatórios do IPCC indicam que os países em desenvolvimento são, de modo geral, os mais vulneráveis. Olhando para o Brasil, é possível perceber esta vulnerabilidade: há muitos exemplos de impactos adversos da variabilidade natural do clima causadores de enormes prejuízos econômicos e sociais, como as secas, as inundações, geadas, entre outros.

A questão do possível aumento dos extremos climáticos automaticamente nos remete ao problema da fragilidade das populações e dos ecossistemas a estas mudanças. Decorre, assim, que pode-se esperar que, mantidas as condições atuais de desenvolvimento, a vulnerabilidade do Brasil às mudanças climáticas provavelmente seja muito alta.

De modo geral, todos os setores são vulneráveis as mudanças climáticas, entretanto, o setor agrícola devido a sua forte dependência ao clima e a necessidade cada vez maior da produção de alimentos, tem sido objeto de muitos estudos em todo o mundo. Muitos deles vêm mostrando que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (CHALLINOR *et al.*, 2007; LUO *et al.*, 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG; LIU, 2005).

Com o aquecimento global, em um futuro próximo, espera-se um cenário de clima mais extremo com secas, inundações e ondas de calor mais freqüentes. Burke *et al.* (2006) mostram uma previsão de aumento de eventos extremos de seca para a segunda metade do século XXI.

Para um país onde a agricultura tem enorme expressão na economia, há uma deficiência em estudos prospectivos sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas na produção agrícola. No Brasil, ainda há poucos estudos realizados sobre o reflexo das mudanças climáticas e seus impactos na agricultura.

A análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas na agricultura permite o planejamento de ações e a obtenção de tecnologias necessárias para enfrentar tais mudanças. Nesse contexto, é de extrema relevância analisar como as mudanças climáticas poderão afetar as safras agrícolas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar, em cenários futuros, a influência da seca na produtividade do milho no estado de Minas Gerais. O foco principal são as projeções de aquecimento global antropogênico propostas nos relatórios do IPCC.

2.2. Objetivos Específicos

- Estimar a produtividade do milho em Minas Gerais utilizando a metodologia da zona agroecológica (AEZ), com as séries de dados climáticos projetadas pelo cenário A1B do IPCC;
- Analisar o desempenho do índice de seca Z na produtividade estimada sob as condições climáticas projetadas para o futuro.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. As Mudanças Climáticas

De acordo com IPCC (2007b) a produtividade das culturas pode aumentar, levemente, para regiões de médias a altas latitudes, com aumento da temperatura média do ar entre 1 a 3° C, dependendo da cultura, podendo decrescer para outras regiões. Para latitudes mais baixas, especialmente em regiões tropicais com estações secas e chuvosas bem definidas, é esperada a diminuição da produtividade das culturas para aumentos de temperatura do ar de 1 a 2° C, o que aumentaria o risco de escassez de alimentos. Globalmente, é projetado que o potencial agrícola se eleve com aumentos na temperatura média do ar em torno de 1 a 3 °C; acima destes valores, acredita-se na diminuição. Outro agravante para a agricultura é o aumento na frequência de secas e inundações, que pode afetar a produção agrícola negativamente, especialmente em setores de subsistência em baixas latitudes.

Estudos com os modelos de circulação apresentam projeções de reduções da produtividade potencial média, em torno de 30 a 16%, para o trigo e o milho, respectivamente (SIQUEIRA *et al.*, 2001).

Oliveira (2007) analisou o impacto das mudanças climáticas nas culturas do milho e do feijão em Minas Gerais e verificou uma projeção de tendência decrescente na produtividade potencial para os anos de 2020, 2050 e 2080 para as duas culturas em todas as mesorregiões estudadas, quando considerou apenas as condições climáticas, sem o efeito de fertilização do CO₂.

3.2 Cenários do IPCC e Modelos de Circulação Geral

Para analisar o comportamento futuro do clima, o IPCC estabeleceu um conjunto de cenários, Special Report on Emissions Scenarios (SRES), com diferentes simulações de emissões de gases de efeito estufa. Os SRES

são constituídos dos seguintes cenários futuros de mudanças climáticas: B1, B2, A1T, A1B, A1FI e A2 (IPCC, 2007a).

Os cenários de emissões representam uma visão possível do desenvolvimento futuro de emissões de substâncias que tem um efeito radiativo potencial (gases de efeito estufa e aerossóis), baseados numa combinação coerente e internamente consistente de suposições sobre forçantes controladoras, como demografia, desenvolvimento sócio-econômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (IPCC, 2007a).

Os modelos matemáticos do sistema climático global são ferramentas usadas para projetar cenários prováveis de alterações climáticas para o futuro, os quais levam em conta, de forma quantitativa (numérica), o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, solos, etc.) e de suas interações. Estes modelos permitem simular prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos gases de efeito estufa. Sabe-se que existe um grau de incerteza do futuro cenário climático do planeta e em particular no Brasil (MARENGO; SOARES, 2003).

A literatura dá conta de vários modelos com o propósito de traçar a dinâmica de circulação do planeta, inclusive para os cenários de mudanças climáticas. O que se vê, na prática, é que os centros mundiais mais atuantes em hidrologia, meteorologia e oceanografia disponibilizaram tais concepções para atividades de planejamento, mitigação e desenvolvimento científico. As pesquisas para retratar os fenômenos são conduzidas em duas escalas: uma “global”, de baixa resolução, produzidas por modelos de circulação geral (CGM’s); e outra em escala “regional”, de alta (fina) resolução, estruturadas em modelos de circulação regional (RCM’s).

Os GCM’s descrevem os principais processos físicos e dinâmicos do sistema climático, bem como as interações entre as componentes do sistema e os mecanismos de retro-alimentação (feedbacks) entre os processos físicos, fornecendo uma visão tridimensional deste sistema. Estes modelos simulam o clima futuro a nível global como resposta as mudanças na concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis.

Há duas grandes fontes de incertezas ao utilizar estes modelos. A primeira é que não se sabe precisamente a trajetória futura das emissões dos gases de efeito estufa, que depende de decisões humanas sobre o caminho sócio-econômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. A segunda advém do fato de que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e que diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de concentrações de gases de efeito estufa. A maneira de abordar estas duas incertezas é utilizar vários cenários de emissões de gases de efeito estufa, em diferentes modelos climáticos (NOBRE, 2005).

3.3 Simulações de Produtividade das Culturas

O desenvolvimento e recomendação de novas técnicas, visando o aumento de produtividade, demandam muito tempo e recursos, uma vez que qualquer tecnologia de cultivo necessita ser avaliada em vários locais para se tornar uma prática de uso generalizado. Uma das formas de avaliação é a utilização de modelos de simulação, que estimam a produtividade da cultura sob as mais diversas condições ambientais. A grande vantagem desses modelos é a obtenção de resultados rápidos e de baixo custo, além de poder auxiliar eficientemente os agricultores e pesquisadores em programa de melhoramento de variedades de sementes ou plantas.

Os modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas possibilitam uma economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para a tomada de decisões. Eles fornecem meios importantes para integrar muitos fatores diferentes que afetam a produtividade das culturas.

Diferentes pesquisadores têm desenvolvido trabalhos com o objetivo de determinar a relação água/produtividade das culturas. Os primeiros trabalhos consideraram apenas a quantidade de água transpirada pelas plantas. Estes trabalhos levaram à conclusão de que a transpiração e,

conseqüentemente, a necessidade de água das culturas são proporcionais à evaporação de uma superfície água-livre (LEAL, 2000).

A metodologia da zona agroecológica (AEZ) foi desenvolvida por Kassam (1977) para o Projeto Zona Agroecológica (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Ela utiliza o conceito de cultura-padrão de De Wit e da taxa de produção de matéria seca, empregando detalhes agronômicos baseados no conhecimento para simular o uso e a disponibilidade dos recursos da terra, as opções de manejo e a produtividade potencial das culturas em função do clima (TUBIELLO *et al.*, 2007).

Para estudar o impacto das mudanças climáticas na agricultura em níveis regionais, é necessário analisar as complexas interações do clima, da função agro-ecossistema e do manejo humano (TUBIELLO *et al.*, 2007). A metodologia AEZ resume os modelos da cultura e do ecossistema.

Leal (2000) utilizou a metodologia AEZ para estimar a produtividade das culturas do milho, soja, sorgo e trigo nos municípios de Capinópolis e Montes Claros em Minas Gerais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo e Base de Dados

O estudo foi realizado para estado de Minas Gerais localizado na região Sudeste do país, entre os paralelos 14° 13' 57" e 22° 55' 22" de latitude Sul e os meridianos de 39° 51' 23" e 51° 02' 45" a oeste de Greenwich. Considerou-se a divisão do estado de Minas Gerais em mesorregiões geográficas, conforme critério do IBGE.

Nas simulações, foram usadas as condições climáticas projetadas pelo modelo de circulação geral da atmosfera ECHAM5/MPI-OM, desenvolvido no Max-Planck-Institute for Meteorology em Hamburgo, Alemanha. Foram utilizadas as projeções climáticas de 2008 a 2020 do cenário A1B.

O contexto e a família de cenários A1 descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século XXI e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1FI), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B) (em que o equilíbrio é definido como não depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final) (IPCC, 2007a).

As condições climáticas projetadas pelo modelo ECHAM5/MPI-OM mostraram-se coerentes, mantendo a mesma tendência, com os dados climáticos observados no período de 1991 a 2004. Nos Apêndices E e F são apresentados gráficos da climatologia oficial do INMET (período de 1961 a

1990) como a climatologia do modelo ECHAM5/MPI-OM para o cenário A1B (período 1991 a 2020) e gráficos de comparação entre a precipitação observada e precipitação simulado pelo o modelo no período de 1991 a 2004 para todas as mesorregiões estudadas, respectivamente. Indicando a possibilidade de utilização deste modelo para aplicações de análises futuras.

Para as projeções futuras, foi calculado o índice de seca Z (índice de anomalia de umidade).

A produtividade do milho para as projeções climáticas futuras foi calculada utilizando a metodologia AEZ.

Para a data de plantio, considerou-se o início do período chuvoso. O início do período chuvoso foi determinado como a data depois do dia primeiro de outubro, quando a precipitação acumulada em um ou dois dias consecutivos alcança, no mínimo, 20 mm, desde que não haja a ocorrência de um período seco, nos 30 dias seguintes, que exceda dez dias consecutivos. Foi considerado um período seco, os dias com precipitação inferior a 1,0 mm.

4.2. Metodologia da Zona Agroecológica (AEZ)

A produtividade de uma cultura é função de complexos processos biológicos, fisiológicos, físicos e químicos, os quais são determinados pelas condições ambientais (clima, solo e água) e por fatores genéticos da própria cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

A produtividade potencial da cultura calculada pela metodologia AEZ reflete o regime da temperatura e da radiação do local em estudo. Sua aplicação nas culturas se faz por meio de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, do índice de área foliar, da relação entre a parte colhida e a produtividade final, da produção bruta de matéria seca e do clima.

Essa metodologia é basicamente eco-fisiológico (KASSAM, 1977 citado por FISCHER *et al.*, 2002) e necessita das seguintes características da cultura:

- a) Duração do ciclo de crescimento (dias da emergência até a maturação completa);
- b) Índice de área foliar (IAF) na taxa de crescimento máxima;
- c) Índice de colheita (cH);
- d) Correção para o desenvolvimento da cultura com relação ao tempo e à área foliar (cL);
- e) Correção para a produção líquida de matéria seca (cN);

A produtividade potencial (Y_{mp}) da cultura representa o nível de referência de produtividade atingível com alto padrão de manejo da cultura e água, em que não há limitações de clima, água e nutrientes e sem ataque de pragas e doenças (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

$$Y_{mp} = cL * cN * cH * G * [F * (a + b * ym) * yon + (1 - F) * (c + d * ym) * yc] \quad (1)$$

$$F = \frac{(R_{so} - 0,5 * R_s)}{(0,8 * R_{so})} \quad (2)$$

$$yon = 31,653 + 0,5477 * R_{so} \quad (3)$$

$$yc = 104,66 + 0,9061 * R_{so} \quad (4)$$

em que,

Y_{mp} = produtividade potencial (kg ha^{-1});

cL= correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (adimensional);

cN= correção para a produção de matéria seca (adimensional);

cH= índice de colheita (adimensional);

G = duração do ciclo de crescimento (dias);

F= fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens (adimensional);

R_{so} = radiação solar na superfície para dias claros ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$);

R_s = radiação global à superfície ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$);

yon = taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão em dia completamente nublado ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$);

yc = taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão em dia sem nuvens ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$);

ym = taxa de produção bruta de matéria seca ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

Os valores de a, b, c, d são iguais a 0,8, 0,01, 0,5 e 0,025 respectivamente, para $y_m \geq 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$; e iguais a 0,5, 0,025, 0 e 0,05, respectivamente, para $y_m < 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

As equações 3 e 4 foram desenvolvidas por Leal (2000).

A correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL) fundamenta-se na suposição de que a cultura-padrão possui área foliar ativa equivalente a cinco vezes a área do terreno, isto é, $IAF = 5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (DOORENBOS; KASSAM, 1979). O valor de cL é apresentado na Tabela 1, em função da área foliar da cultura.

Tabela 1– Valores da correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL), em função da área foliar da cultura (IAF).

IAF	1	2	3	4	5
cL	0,2	0,3	0,4	0,48	0,5

Fonte: DOORENBOS; KASSAM (1979).

A correção para a produção de matéria seca (cN) é um índice que representa a energia disponível para produzir novo crescimento, pois a planta necessita de energia para os processos internos de desenvolvimento (respiração) e para manter a produção de matéria seca. A equação 5 apresenta os valores estimados para cN em função da temperatura média do ar (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

$$cN = \begin{cases} 0,60 & \text{se } T < 20^\circ \text{C} \\ 0,50 & \text{se } T \geq 20^\circ \text{C} \end{cases} \quad (5)$$

Sendo T a temperatura média do ciclo.

O índice de colheita (cH) é a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total. Geralmente, apenas uma parte de matéria seca total é colhida. A tabela 2 apresenta os valores de cH, IAF e G utilizados nesse estudo.

Tabela 2 - Valores do índice de colheita (cH), índice de área foliar (IAF) máximo e duração do ciclo (G) para a cultura do milho.

Duração do ciclo	cH	IAF Máximo
120 dias	0,45	4

Fonte: DOORENBOS; KASSAM (1979); FISCHER *et al.* (2002).

A taxa de produção bruta de matéria seca (y_m) da cultura-padrão é considerada como tendo o valor de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Entretanto, a produção da matéria seca depende da cultura e da temperatura. O valor de y_m para a cultura de milho em função da temperatura está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de y_m ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) para a cultura do milho em função da temperatura média durante o ciclo da cultura.

Temperatura média (°C)								
5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
0	0	5	45	65	65	65	45	5

Fonte: DOORENBOS; KASSAM (1979); FISCHER *et al.* (2002).

O cálculo da produtividade limitada pela água segue os procedimentos do método conhecido como Cropwat. Nessa aproximação, a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) é relacionada com a evapotranspiração de referência (ET_o), dada por:

$$ET_m = k_c * ET_o \quad (6)$$

em que,

k_c = coeficiente da cultura;

ET_o = evapotranspiração de referência.

A evapotranspiração de referência foi calculada de acordo com a equação de Penman-Moneith FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998).

As características relacionadas ao ciclo da cultura, denotando a duração (em dias) dos quatro estádios de desenvolvimento da cultura (d1-estádio inicial, d2 - estádio vegetativo, d3 - estádio reprodutivo e d4 - estádio de maturação) e os coeficientes da cultura para os estádios inicial (k_1^c), fase reprodutiva (k_2^c), estádio final e de maturação (k_3^c) e para todo o ciclo de crescimento (k_0^c) são apresentados na Figura 1 e na Tabela 4.

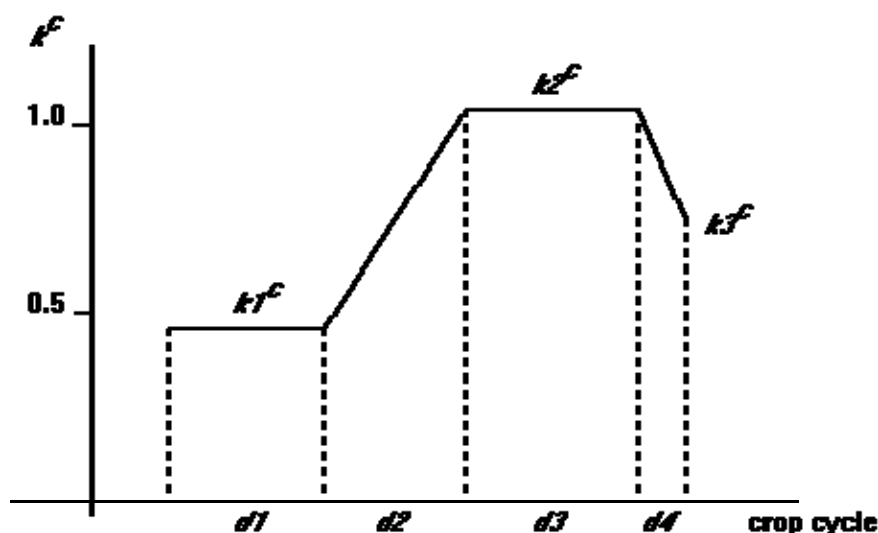


Figura 1 – Descrição dos estádios de crescimento.
 Fonte: FISCHER *et al.* (2002).

Tabela 4 – Duração dos estádios e coeficientes de cultura para o milho.

Duração dos estádios (%)				Coeficiente de cultura			
d1	d2	d3	d4	k1 ^c	k2 ^c	k3 ^c	k0 ^c
15	30	35	20	0,4	1,1	0,6	0,85

Fonte: DOORENBOS; KASSAM (1979), FISCHER *et al.* (2002).

Seja D1, ..., D4 os dias pertencentes a cada um dos quatro estádios de crescimento da cultura,

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \{j \mid 1 \leq j \leq d1\} \\
 D_2 &= \{j \mid d1 < j \leq d1 + d2\} \\
 D_3 &= \{j \mid d1 + d2 < j \leq d1 + d2 + d3\} \\
 D_4 &= \{j \mid d1 + d2 + d3 < j \leq d1 + d2 + d3 + d4\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

O valor de k_c para o dia j é definido por:

$$k_c = \begin{cases} k1^c & j \in D_1 \\ k1^c + (j - d1) * \frac{k2^c - k1^c}{d2} & j \in D_2 \\ k2^c & j \in D_3 \\ k2^c + (j - (d1 + d2 + d3)) * \frac{k3^c - k2^c}{d4} & j \in D_4 \end{cases} \tag{8}$$

A evapotranspiração máxima da cultura para todo o ciclo (ETm) é dada por:

$$ETm = \sum_{j=1}^{d0} k_{c_j} * ETo_j \tag{9}$$

$$d0 = d1 + d2 + d3 + d4$$

Similarmente, aplicando o balanço hídrico do solo para a cultura, a evapotranspiração real da cultura para o ciclo (ETr^c) é:

$$ETr^c = \sum_{j=1}^{d0} ETr_j^c \quad (10)$$

A evapotranspiração real (ETr^c) e o balanço hídrico diário (W) são calculados como segue:

$$W_{j+1} = \text{Mínimo}(W_j + P_j - ETr_j^c ; Sa) \quad (11)$$

$$ETr_j^c = \begin{cases} ETm_j & \text{se } (W_j + P_j) * z \geq Sa * z * (1 - f) \\ \rho_j * ETm_j & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho_j = \frac{W_j + P_j}{Sa * (1 - f)} \quad (13)$$

em que,

Sa = capacidade de água disponível no solo (mm m^{-1});

z = profundidade efetiva das raízes (m);

f = fração de depleção da água do solo abaixo de $ETr < ETo$ (adimensional);

ρ_j = fator de proporcionalidade de evapotranspiração real (adimensional).

A tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para o balanço hídrico.

Tabela 5 – Valores da fração de depleção da água do solo e profundidade efetiva das raízes para a cultura do milho.

Parâmetros	Estádios de Desenvolvimento			
	I	II	III	IV
Coeficiente de depleção	0,5	0,5	0,5	0,8
Profundidade das raízes	0,3			1

Fonte: DOORENBOS; KASSAM (1979).

A produtividade limitada por água (Ya) é obtida por:

$$1 - \frac{Ya}{Ymp} = k_y * \left(1 - \frac{ETr^c}{ETm} \right) \quad (14)$$

Logo, Ya é dada por:

$$Ya = \left(1 - k_y * \left(1 - \frac{ETr^c}{ETm} \right) \right) * Ymp \quad (15)$$

em que, k_y é o coeficiente que expressa a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. O valor de k_y para a cultura do milho é igual a 1,25 (DOORENBOS; KASSAM 1979).

O valor de Y_a refere-se a matéria seca, e como os grãos para serem comercializados apresentam, em geral, de 13 a 14% de umidade, a produtividade calculada por meio das equações 1 e 15 foi corrigida para 13%.

As simulações de produtividade consideram que as práticas de manejo e que as cultivares serão as mesmas adotadas atualmente.

Os valores de produtividade limitada por água (Y_a) foram ajustados em um modelo de regressão, que considera o índice de seca (Z) como variável independente e Y_a como variável dependente, conforme ilustrado na Figura 2. As análises são feitas considerando o índice acumulado durante o ciclo (Outubro a Janeiro) e o índice de cada mês do ciclo.

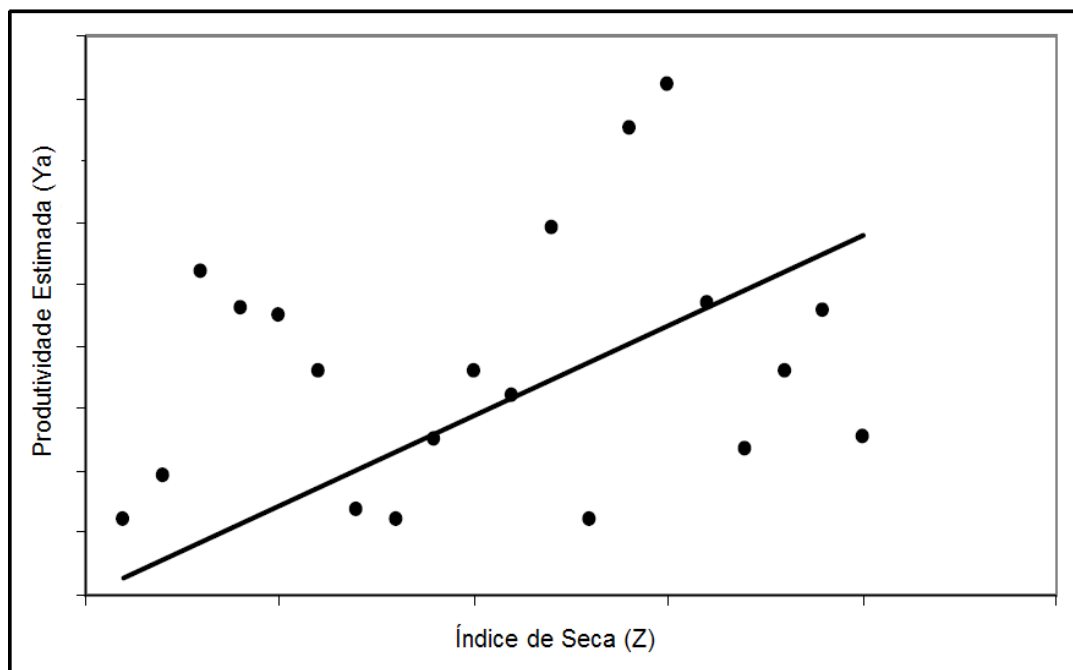


Figura 2 – Representação do modelo conceitual da produtividade estimada e índice de seca.

A partir desse modelo calculou-se a produtividade predita pelo índice de seca dada pela seguinte equação conceitual:

$$Y_{a_{predita}} = a * Z + b \quad (16)$$

em que, a e b são os coeficientes de regressão da reta do modelo conceitual e Z o índice de seca (Figura 2).

O desempenho dos modelos foi verificado por meio das seguintes medidas estatísticas: coeficiente de determinação (r^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE, siga em inglês), o erro absoluto médio (MAE, siga em inglês), o viés médio (MBE, Sigla em inglês) e o índice de concordância (d) de Willmott (1982). As medidas estatísticas são dadas pelas seguintes equações:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (19)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (20)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (21)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas da produtividade potencial (Y_{mp}) e da produtividade limitada por água (Y_a) para a cultura do milho, em resposta às condições climáticas futuras simuladas pela metodologia AEZ com os dados diários do cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM são apresentadas na Figura 3 (a, b) para cada uma das mesorregiões estudadas. As estimativas de produtividade potencial apresentam um comportamento muito similar entre as mesorregiões, às exceções se dão para as mesorregiões Jequitinhonha, Triângulo/Alto Paranaíba e Central Mineira que nos anos agrícolas de 2007/2008 e 2008/2009 apresentam produtividade potencial superior as demais (Figura 3 a). As variações na produtividade potencial estimada em uma mesma mesorregião são devidas, principalmente, ao aumento e ao decréscimo na temperatura média do ciclo ao longo dos anos e alterações nos valores médios do ciclo da fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens (F).

Ao adicionar a limitação por água na produtividade potencial, observa-se um comportamento semelhante entre as mesorregiões Triângulo/Alto Paranaíba e Central Mineira com estimativas de quedas significantes nos anos agrícolas de 2008/2009, 2009/2010 e 2018/2019. Na mesorregião Zona da Mata a maior limitação por água é estimada para o ano agrícola de 2010/2011. As demais mesorregiões apresentam um comportamento muito similar entre si, em relação aos anos agrícolas que apresentam alguma deficiência hídrica (Figura 3 b). As estimativas mostram que a mesorregião Campo das Vertentes será pouco afetada pelo déficit hídrico.

As estimativas de perdas na produtividade devido a limitações por água para as mesorregiões podem ser observadas na Figura 4. Em todas as localidades, as estimativas apontam para perdas nos anos agrícolas de 2008/2009, 2011/2012 e 2015/2016 devido à deficiência hídrica. As maiores perdas são estimadas para as mesorregiões Triângulo/Alto Paranaíba, Central Mineira e Jequitinhonha na safra de 2014/2015. Essas também são as mesorregiões mais afetadas pela deficiência hídrica. Para a mesorregião Zona da Mata estima-se uma perda significativa para o ano agrícola de 2010/2011.

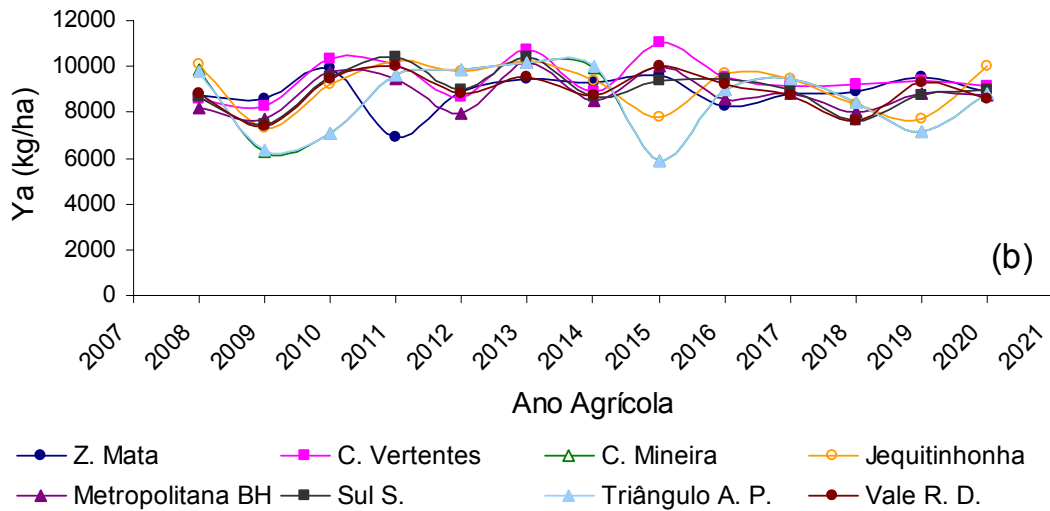
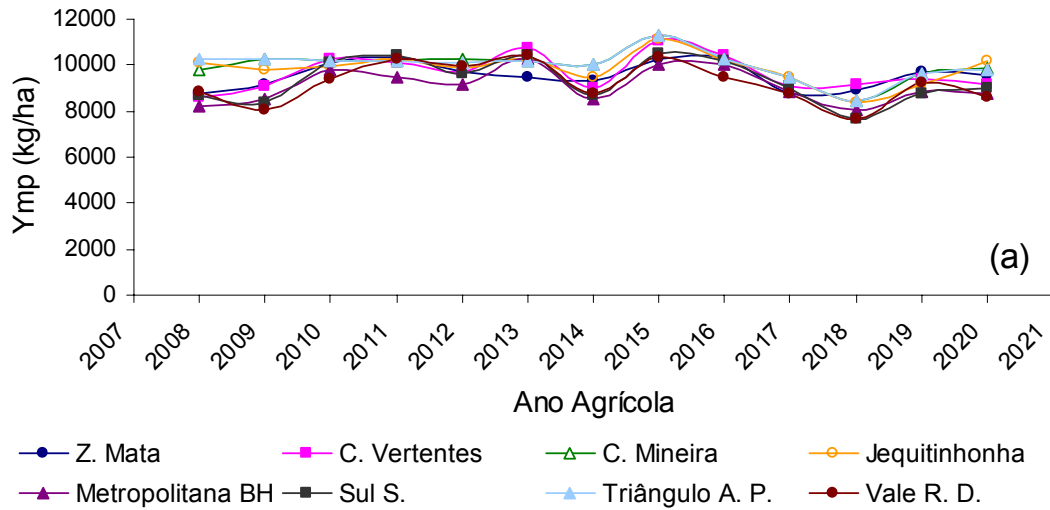


Figura 3 (a) – Variação das estimativas da produtividade potencial (Y_{mp}); (b) Variação das estimativas de produtividade limitada por água (Y_a) do milho simuladas a partir de dados diários para o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM para as mesorregiões, para o período de 2008 a 2020.

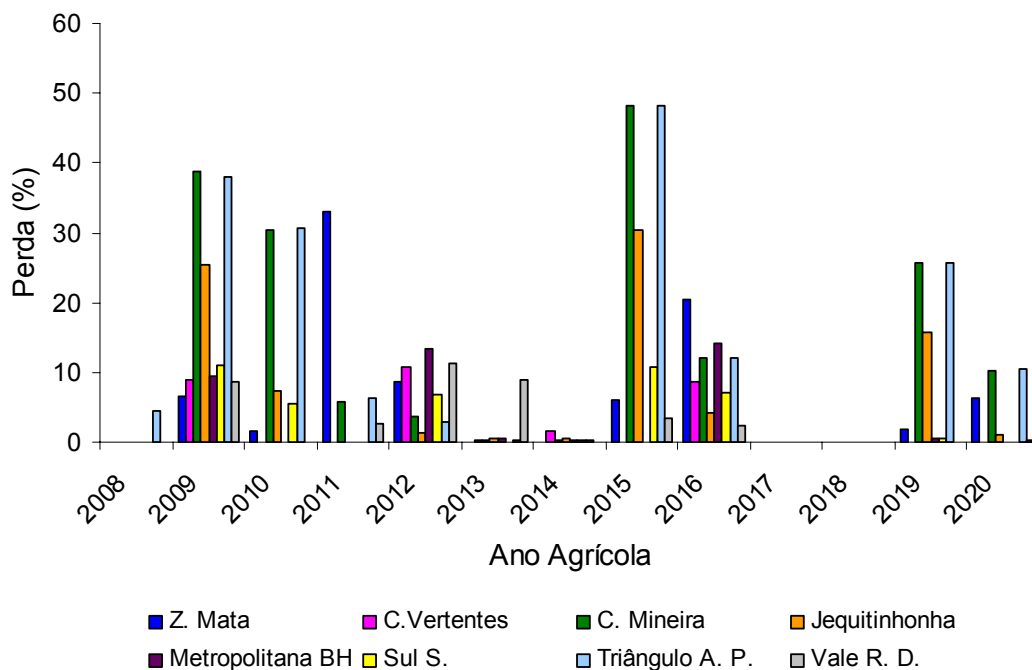


Figura 4 – Estimativas de perdas por limitação hídrica na produtividade do milho simulada a partir de dados diários para o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM para as mesorregiões, para o período de 2008 a 2020.

A Figura 4 demonstra que regiões como Jequitinhonha, que atualmente sofrem perdas agrícolas devido aos baixos índices de precipitação, tendem a continuar com problemas de déficit hídrico na próxima década. Ainda, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM, é projetada uma tendência de déficit hídrico para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, umas das maiores produtoras de milho no momento, e também para a mesorregião Central Mineira.

Para a mesorregião Zona da Mata as estimativas de déficit hídrico são significativas apenas em dois anos agrícolas (Figura 4). Entretanto, como as demais localidades apresentam uma tendência, que de certa forma se matem ao longo da década, essa queda de precipitação nos anos agrícolas de 2010/2011 e 2015/2016 pode ser atribuída a alguma deficiência do modelo, isso demonstra que nesta região não há estimativas de perdas expressivas.

Nas demais regiões estudadas, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM, não se projeta perdas devido à deficiência hídrica (Figura 4).

Sendo assim, casos as projeções cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM se confirmem, serão necessários investimentos em implantação e/ou aprimoramento de sistemas de irrigação nas mesorregiões Jequitinhonha, Triângulo/Alto Paranaíba e Central Mineira. Desta forma, este estudo pode ser utilizado com ferramenta para tomadores de decisão.

No Apêndice F pode se verificar os resultados mensais estimados do índice Z para os agricultores no período de outubro a janeiro. Nas Figuras 1 a 8 do Apêndice F, observa-se que em todas as mesorregiões estudadas não há estimativas de déficit hídrico para os anos agrícolas de 2017 e 2018 durante o ciclo de cultivo do milho.

Os resultados do desempenho do índice Z para as mesorregiões de Minas Gerais são apresentados nas Tabelas 6 a 13 e nas Figuras de 5 a 12, a seguir:

Tabela 6 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Zona Mata.

Período	Zona da Mata				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	709,30	569,23	0,37	0,01	0,08
Outubro	735,40	556,14	0,09	-0,02	0,01
Novembro	733,06	534,47	0,14	0,05	0,01
Dezembro	674,68	529,87	0,52	0,04	0,16
Janeiro	731,02	535,86	0,18	0,04	0,02

Distribuição da Produtividade Estimada - Zona da Mata

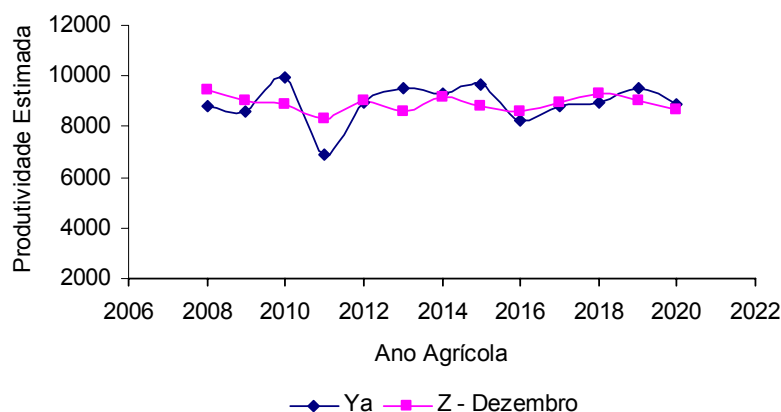


Figura 5 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Zona da Mata, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 7 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Sul e Sudoeste.

Período	Sul e Sudoeste				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	594,88	444,49	0,80	0,01	0,49
Outubro	607,23	447,29	0,79	0,00	0,47
Novembro	729,47	500,13	0,59	0,05	0,24
Dezembro	791,28	641,68	0,37	0,01	0,10
Janeiro	763,70	599,96	0,47	0,01	0,16

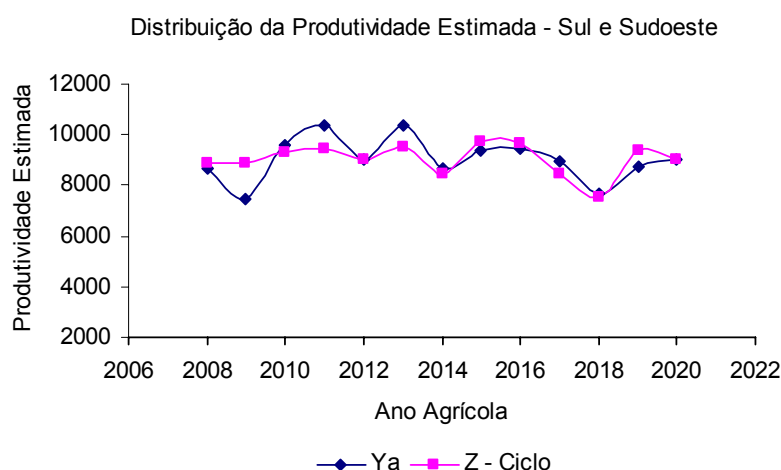


Figura 6 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do ciclo para a mesorregião Sul e Sudoeste, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 8 – Desempenho do índice Z para o Triângulo/Alto Paranaíba.

Período	Triângulo/Alto Paranaíba				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	1328,23	1194,65	0,44	-0,02	0,12
Outubro	1416,05	1214,50	0,09	0,04	0,00
Novembro	1375,54	1249,47	0,32	0,01	0,06
Dezembro	1139,86	902,15	0,72	0,01	0,36
Janeiro	1418,06	1237,16	0,07	0,00	0,00

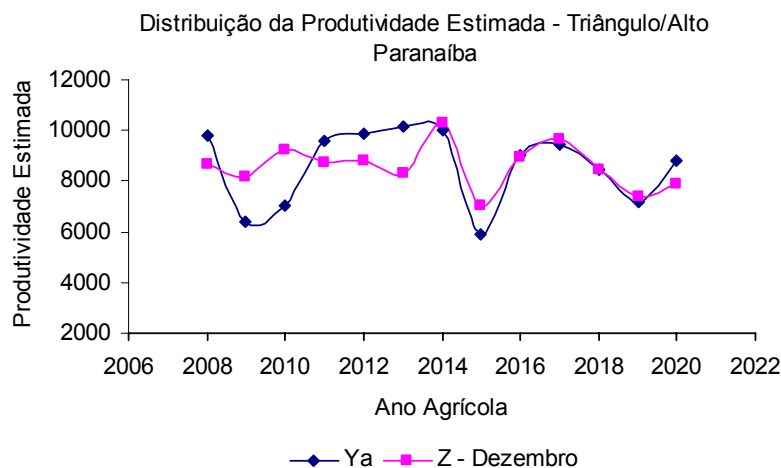


Figura 7 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 9 – Desempenho do índice Z para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.

Período	Metropolitana de Belo Horizonte				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	649,44	553,13	0,66	0,05	0,30
Outubro	754,46	602,85	0,34	-0,04	0,06
Novembro	662,05	539,37	0,64	0,02	0,27
Dezembro	641,26	515,63	0,67	-0,03	0,32
Janeiro	773,48	653,01	0,07	0,01	0,01

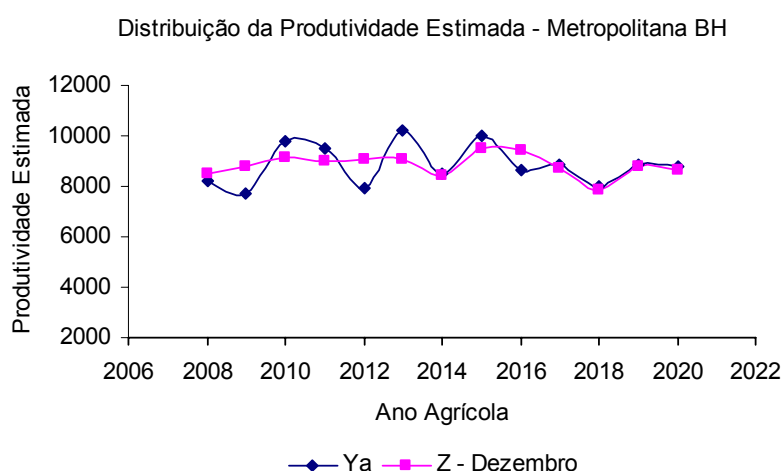


Figura 8 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 10 – Desempenho do índice Z para Campo das Vertentes.

Período	Campo das Vertentes				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	655,84	570,02	0,70	-0,03	0,35
Outubro	800,40	663,31	0,23	0,01	0,03
Novembro	703,14	549,76	0,59	0,00	0,25
Dezembro	643,54	548,60	0,71	0,00	0,37
Janeiro	759,46	644,46	0,43	-0,02	0,13

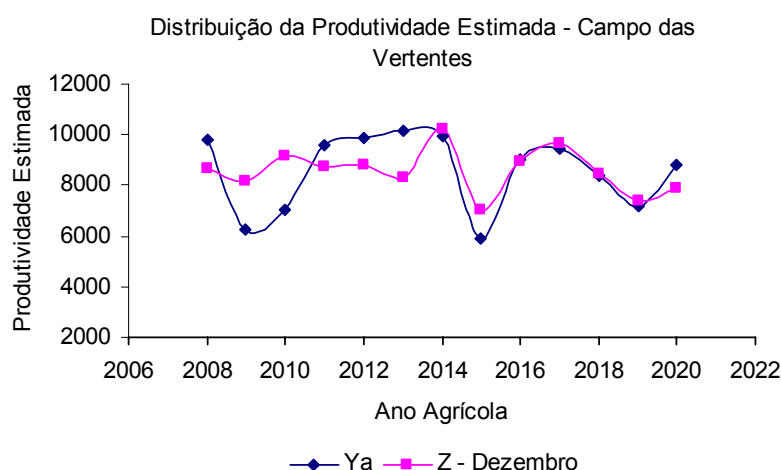


Figura 9 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Campo das Vertentes, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 11 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Central Mineira.

Período	Central Mineira				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	1342,67	1205,99	0,43	0,04	0,12
Outubro	1425,85	1222,70	0,10	-0,03	0,01
Novembro	1384,78	1259,20	0,32	-0,03	0,06
Dezembro	1154,77	914,50	0,71	-0,03	0,35
Janeiro	1429,56	1246,82	0,05	-0,04	0,00

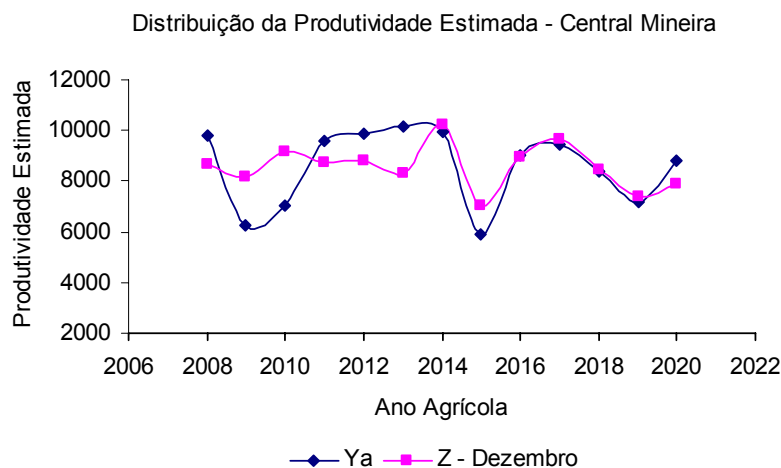


Figura 10 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Central Mineira, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 12 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Jequitinhonha.

Período	Jequitinhonha				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	995,53	858,21	0,06	0,01	0,00
Outubro	924,07	816,45	0,46	-0,04	0,14
Novembro	996,84	858,35	0,01	-0,01	0,00
Dezembro	934,31	788,81	0,48	-0,04	0,12
Janeiro	989,78	856,70	0,15	-0,05	0,01

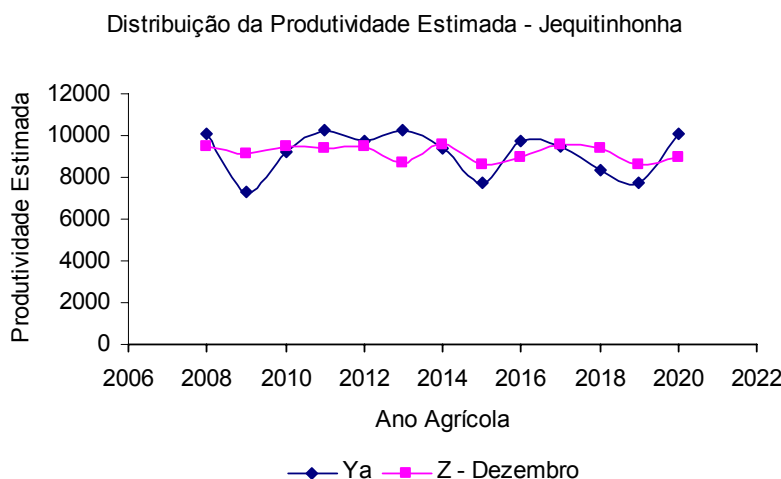


Figura 11 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de dezembro para a mesorregião Jequitinhonha, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 13 – Desempenho do índice Z para a Mesorregião Vale do Rio Doce.

Período	Vale do Rio Doce				
	RMSE	MAE	d	MBE	r ²
Ciclo	480,77	389,64	0,85	-0,03	0,59
Outubro	740,73	592,30	0,21	0,04	0,02
Novembro	418,46	336,43	0,90	0,02	0,69
Dezembro	701,09	589,94	0,41	-0,03	0,13
Janeiro	621,80	525,02	0,65	-0,01	0,31

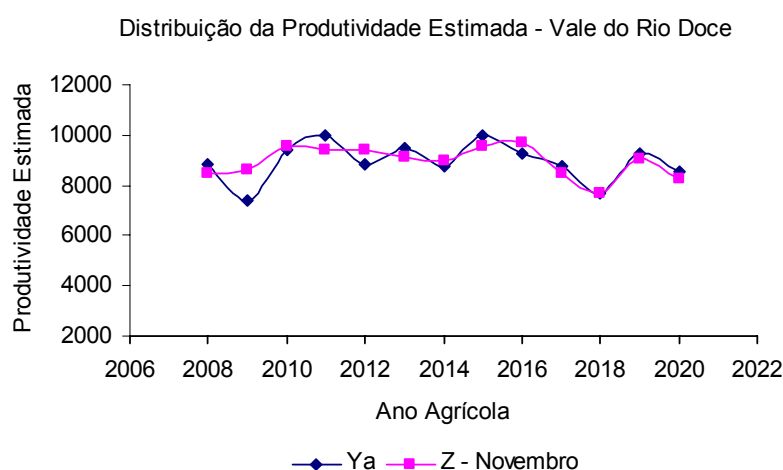


Figura 12 – Distribuição da produtividade estimada pela metodologia da zona agroecológica (Ya) e pelo índice Z do mês de Novembro para a mesorregião Vale do Rio Doce, considerando o cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM.

O índice Z calculado com os dados do cenário A1B do modelo ECHAM5/MPI-OM para o mês de dezembro apresentou os melhores ajustes para as estimativas de produtividade, exceto para a mesorregião Sul e Sudoeste (Tabela 7), para as quais se destacou o ajuste para o ciclo todo (índice Z acumulado nos meses de outubro a janeiro) e a mesorregião Vale do Rio Doce (Tabela 13), com o melhor ajuste em novembro (Figuras 5 a 12). As piores estimativas do modelo que considera o índice Z como variável independente são para as mesorregiões Triângulo/Alto Paranaíba e Central Mineira, justamente as que tiveram as maiores quedas na produtividade em função da limitação por água (Figuras 7, 10). Em quase todas as localidades estudadas, o modelo do índice Z tende a superestimar a produtividade estimada pela metodologia AEZ nos anos agrícolas com deficiência hídrica,

ou nas safras com menor produtividade, e subestimar os anos agrícolas com as maiores produtividade (Figuras 5 a 12).

De maneira geral, este resultado está coerente, uma vez que nas simulações os plantios foram feitos do início de outubro até novembro em alguns anos simulados (Apêndice D). Assim, nesses meses o milho estaria em suas fases mais dependentes de água.

Os menores valores dos erros entre as diferenças médias da produtividade estimada pelo índice Z e a produtividade estimada pela metodologia AEZ foram obtidos nas mesorregiões Vale do Rio Doce e Sul e Sudoeste, com valores de RMSE e MAE iguais a 418,46 e 594,88 kg/ha e 336,43 e 444,49 kg/ha, respectivamente (Tabela 13 e 7). Nessas mesorregiões também se obteve bons valores do coeficiente de determinação (r^2) e índice de concordância de Willmott (d).

Os menores valores do coeficiente de determinação e do índice de concordância de Willmott foram obtidos para as mesorregiões Jequitinhonha e Zona da Mata (Tabela 12 e 6).

Os resultados encontrados nesse estudo estão de acordo com a literatura, como Quiring e Papakryiakou (2003), que encontraram baixos valores para o coeficiente de determinação, que variaram de 0,15 a 0,47; e os índices de concordância entre 0,14 e 0,76, para avaliação do desempenho do índice de seca mais apropriado ao monitoramento da seca agrícola no cultivo do trigo nas pradarias canadenses e Gois (2005), que obteve baixos valores de r^2 e d na avaliação do método dos Decis na produção de milho em Minas Gerais.

O desempenho do índice Z para estimar as variações na produtividade estimada pela metodologia AEZ, foi satisfatório. Porém, considerando que os valores de produtividade estimados (Y_a) foram limitados somente por água, esperava-se que a produtividade gerada pelo modelo do índice Z apresentasse uma maior concordância com a produtividade calculada pela metodologia AEZ (Y_a). Isto indica que o índice Z e, conseqüentemente o PDSI, não são muito eficientes para avaliação de seca agrícola. A própria metodologia AEZ mostrou-se melhor para detectar variações na produtividade devido à deficiência hídrica.

6. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que, se as cultivares, práticas de manejo e tecnologias atuais, forem mantidas e caso as condições futuras do clima tenderem ao cenário de emissões A1B, a mudança projetada do clima terá um efeito negativo na produtividade de milho nas mesorregiões analisadas, quando se analisa apenas a água como fator de limitação para a produtividade. Porém, sabe-se que existe uma grande incerteza em relação aos valores de precipitação modelados para o clima futuro. Além disso, a influência do clima nas culturas se dá por meio de uma combinação dos diferentes elementos climáticos, sendo assim, é necessário um estudo elaborado, que analise todas essas interações climáticas, bem como, práticas de manejo, influências do solo, entre outras.

O índice Z não se mostrou completamente eficiente para estimar a produtividade nos períodos mais secos projetados pelo modelo. Sendo, esses períodos melhor identificados pela metodologia da Zona Agroecológica. Isso demonstra uma limitação desse índice de seca. Porém, ele ainda é um dos índices mais indicados para análises com dados climáticos futuros, visto que, em formulação ele considera precipitação e evapotranspiração como dados de entrada, uma vez que, a maior parte dos índices de seca consideram apenas a precipitação.

Ao mesmo tempo, pode ser proveitoso fazer várias simulações de plantio em diferentes datas no mesmo ano, para evitar eventuais veranicos. Testar outras metodologias (modelos) para simular a produtividade da cultura e adaptar ou desenvolver um índice seca para região de estudo, e incorporar nesses índices, características da cultura.

CONCLUSÕES GERAIS

Apesar do índice de Palmer ser amplamente utilizado, ele não se mostrou completamente adequado para a seca agrícola no estado de Minas Gerais. Isso pode ser devido as suas limitações, pois o PDSI assume que a capacidade do solo em duas camadas são independentes das mudanças (sazonal e anual) na vegetação de cobertura e desenvolvimento das raízes, o balanço hídrico adota que a evapotranspiração real (ET_r) de um período é igual a evapotranspiração de referência (ET_o) se a precipitação for maior ou igual a ET_o e não considera nenhuma característica da cultura.

A metodologia da zona agroecológica utilizada nesse estudo considerou apenas a água como fator de limitação para a produtividade potencial. E, como as maiores incertezas nos modelos de circulação geral são em relação à precipitação, ainda não se tem elementos substanciais, e nem se pode afirmar com a acurácia necessária em quanto o clima no futuro afetará, negativamente ou não, a produção agrícola de uma região.

Os resultados encontrados referem-se à produtividade potencial e a penalização por água, não considerando a influência do aumento de temperatura, as restrições nutricionais, pragas e doenças, o efeito de fertilização do CO₂, bem como a capacidade das plantas de se adaptarem. Sendo assim, os resultados não dispensam a necessidade de estudos posteriores, com modelos de simulações de produtividade envolvendo mais fatores, avaliação com diferentes cenários de emissões e índices (ou outra metodologia) mais adequados para seca agrícola.

Os índices de seca Z e, conseqüentemente o PDSI, empregados sozinhos não se mostraram muito eficientes para avaliar a variabilidade da produtividade, tornando se necessário um estudo mais elaborado que envolva não somente os índices de seca como também outros indicadores agrometeorológicos. Ao mesmo tempo, outros índices de seca agrícola devem ser testados, objetivando melhores predições.

Contudo, há um indicativo de que algumas regiões tendem a ter problemas de déficit hídrico na próxima década. Sinalizando possíveis áreas potenciais para implantação e aperfeiçoamento de sistemas de irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, FAO, 300 p. 1998.

ALLEY, W. M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 23, p.1100-1109, 1984.

BARRA, T. S. **Análise climatológica das secas do estado do Ceará**. 2000. 84p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

BLAIN, G. C. **Avaliação a adaptação do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) e do índice padronizado de precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo**. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2005.

BLAIN, G. C.; BRUNINE, O. Quantificação da seca agrícola pelo índice padronizado de evapotranspiração real (IPER) nos estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 517-525, 2006.

BLAIN, G. C.; BRUNINE, O. Análise de escala temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 255-261, 2007.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Variabilidade climática e agricultura do Rio Grande do Sul. In: FEDERACITE. **As Estiagens e as Perdas na Agricultura: Fenômeno Natural ou Imprevidência?**. 1ª ed, Porto Alegre: Ideograf Editora Gráfica, p. 43-59, 2005.

BURKE, E. J.; BROWN, S. J.; CHRISTIDIS, N. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the hadley centre climate model. **Journal of Hidrometeorology**, v. 7, p. 1113-1125, 2006.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, v.12, p. 2747-2756, 1999.

CALLINOR, A. J.; WHEELER, T. R.; CRAUFURD, P. Q., FERRO, C. A. T.; STEPHENSON, D. B. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures. **Agriculture Ecosystems & Environment**. V.119, p. 190-204, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33, Rome, FAO, 172 p. 1979.

EDWARDS, D. C.; MCKEE, T. B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. **Climatology Report**, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, n. 97-2, 1997.

EMATER. **Estudo e perspectivas para a agropecuária de Minas Gerais em 2007**. Belo Horizonte, jan. 2007. 44 p.

EMBRAPA. **Cultivo do milho**. Sistemas de Produção 3ª edição. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2007. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/index.htm>>. Acesso em 10 de abril de 2008.

ERA-40 – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40 Year Re-analysis Basic Atmospheric Data Sets. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/oper/an/sfc/2.5/index.html>>. Acesso em 09 de maio de 2008.

EWERT, F.; ROUNSEVELL, M. D. A.; REGINSTER, I.; METZGER, M. J.; LEEMANS, R. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.107, p. 101-116, 2005.

FAO. Food and Agriculture Organization. **World agriculture: towards 2015/2030**. A FAO Perspective. London: Earthscan Publications LTDA, 2003.

FENG, S.; HU, Q. Changes in agro-meteorological indicators in the contiguous United States: 1951–2000. **Theoretical and Applied Climatology**. v.78, p. 247-264, 2004.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results**. IIASA RR-02-02, IIASA, Laxenburg, 2002.

GOIS, G. de. **Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para diferentes regiões do Estado de Minas Gerais**. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

GUTTMAN, G. B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. **Journal of the American Water Resources**, Washington, v.34, n.1, p. 113-121, 1998.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A. & VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought index using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 80, n. 3, 1999.

HEIM JUNIOR, R. R. A review of twentieth - century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1149-1165, 2002.

HILL, J. D.; STROMMEN, N. D.; SAKAMOTO, C. M.; LEDUC, S. K. LACIE— an application of meteorology for United States and for-eign wheat Assessment. **Journal of Applied Meteorology**. v.19, p. 22-34, 1980.

HUBBARD, K. G.; WU, H. Modification of a crop-specific drought index for simulating corn yield in wet years. **Agronomy Journal**. v.97, n.6, p. 1478-1484, 2005.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge, 18 p. 2007a.

_____. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.

KARL, T. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 25, p. 77-86, 1986.

KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield of crops**, FAO, Rome, 1977.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.83, p.1167-1180, 2002.

LEAL, B. G. **Sistema computacional para a avaliação e estimativa das produtividades potencial e real de culturas agrícolas**. 2000. 97p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, p. 273-285, 2005.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: Síntese do terceiro relatório do IPCC de 2001. CPTEC-INPE, 29p. 2005.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8, 1993, Anaheim. **Anais...** American Meteorological Society, Boston: PREPRINTS, p. 179 -184, 1993.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J. e KLEIST, J. Drought monitoring with multiple times scales. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 9, 1995, Dallas. **Anais...** American Meteorological Society, Boston: PREPRINTS, p. 233-236, 1995.

NARASIMHAN, B. **Development of indices for agricultural drought monitoring using a spatially distributed hydrologic model**. 2004. 187 p. 2004. Tese (Doctor of Philosophy – Biological and Agricultural Engineering Texas A & M University, 2004).

NARASIMHAN, B; SRINIVASAN, R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, p. 69 – 88, 2005.

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudança do clima**. In: Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do Clima: Negociações internacionais sobre a mudança do clima. Brasília. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, v. 1 parte 2, p. 147-216, 2005

OLIVEIRA, L. J. C. **Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no Estado de Minas Gerais**. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Research Paper n. 45, Weather Bureau, Washington, 58 p., 1965.

PINTO, L. I. C. **Comparação de produtos de precipitação e radiação solar incidente para a América do Sul: dados observados e reanálise**. 2007. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

PURCELL, L. C.; SINCLAIR, T. R.; MCNEW, R. W. Drought avoidance assessment for summer annual crops using long-term weather data. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 1566 – 1576, 2003.

QUIRING, S. M.; PAPAKRYAIKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.118, p. 49-62, 2003.

RICHTER, G. M.; SEMENOV, M. A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

SEAPA - MG, Secretaria de Estado Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Julho/2007. **Governo de Minas vai subvencionar seguro rural**. Disponível em <<http://www.agricultura.mg.gov.br/noticia.asp?id=414>>. Acesso em: 27 de setembro de 2007.

SILVA JUNIOR, J. L. C. **Simulação da produtividade das culturas do milho e do feijão, baseada nos cenários de mudanças climáticas globais, do estado de Minas Gerais**. 2007. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

SINGH, M. Identifying and assessing drought hazard and risk in Africa. Council for Geoscience. **IN: SOUTH AFRICA REGIONAL CONFERENCE ON INSURANCE AND REINSURANCE FOR NATURAL CATASTROPHE RISK IN AFRICA.** Casablanca, Marrocos, 2006.

SIQUEIRA, O. J. W. de; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. de; FERNANDES, J. M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In. LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira.** Embrapa: Jaguariúna. São Paulo, p. 33-63. 2001.

SIVAKUMAR, M. V. K.; DAS, H. P.; BRUNINI, O. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. **Climatic Change**, v.70, p. 31-72, 2005.

SÖNMEZ, F. K.; KÖMÜSCÜ, A. U.; ERKAN, A.; TURGU, E. An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. **Natural Hazards**, v. 35, n. 2, p. 243-264, 2005.

TRNKA, M.; HLAVINKA, P.; SEMERÁDOVÁ, D.; DUBROVSKÝ, M.; ZALUD, Z.; MOZNÝ, M. Agricultural drought and spring barley yields in the Czech Republic. **Plant Soil Environment**, v. 53, n. 7, p. 306-316, 2007.

TUBIELLO, F. N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000 – 2080. **Technological Forecasting & Social Change**, v .74, p. 1030 – 1056, 2007.

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p.127-142, 2005.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: The role definitions. **In: WILHITE et al. Planning for drought toward a reduction of societal vulnerability.** WESTVIEW, p. 11-14, 1987.

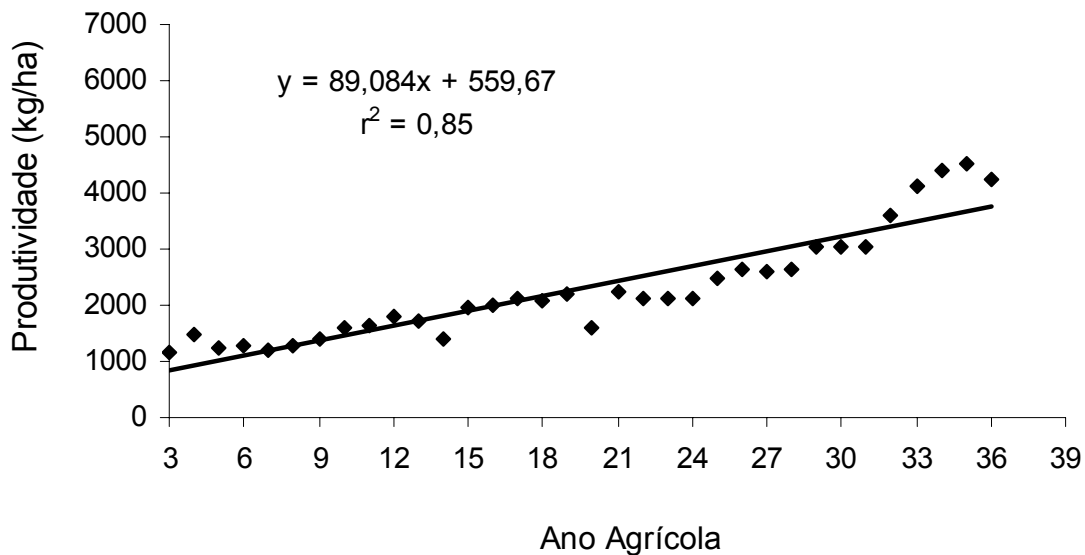
WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Lancaster, v. 63, n.11, p. 1309 – 1313, 1982.

WU, H.; WILHITE, D. A. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. **Natural Hazards**, v. 33, p. 1 – 21, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Campo das Vertentes



Central Mineira

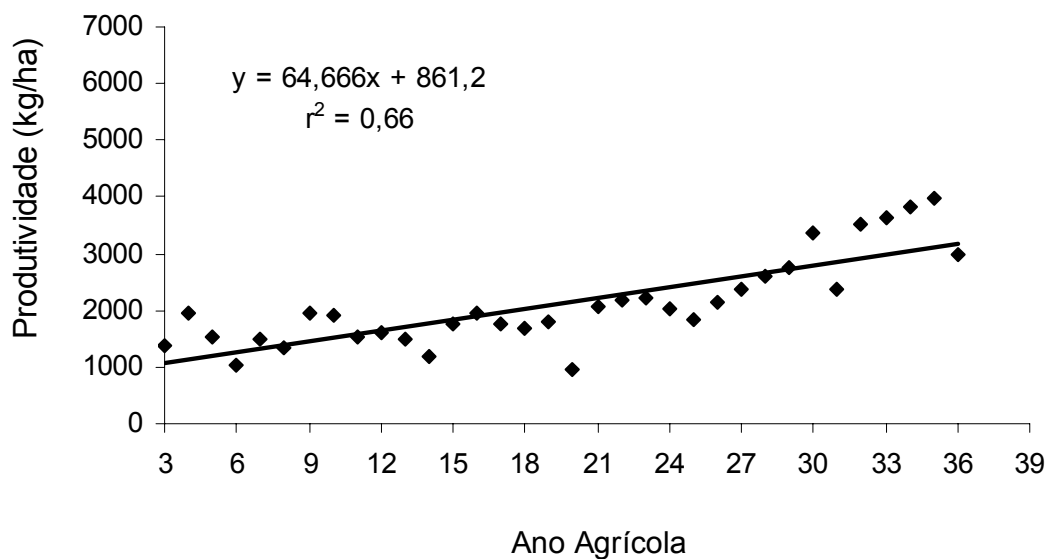
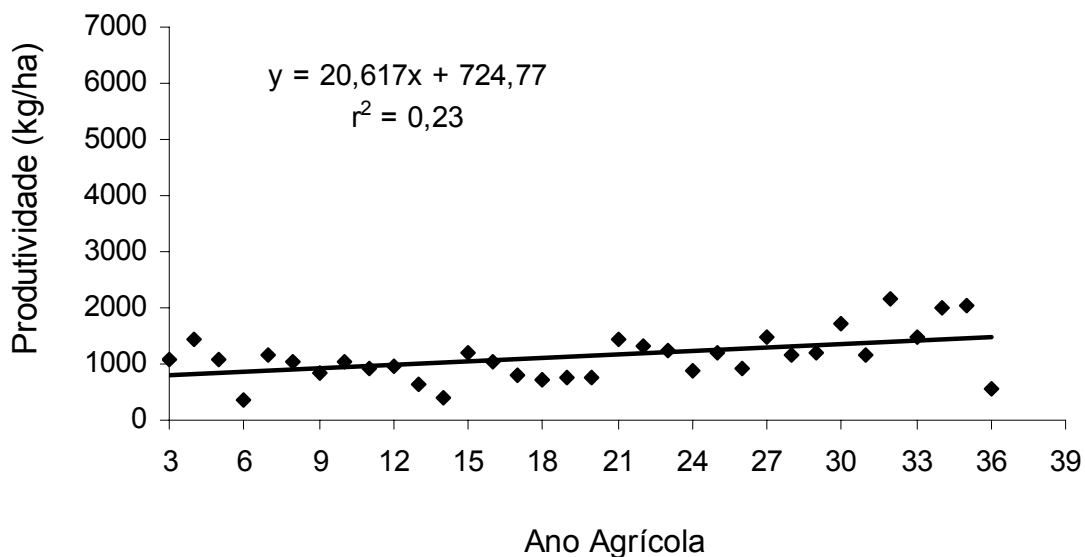


Figura 1 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho nas mesorregiões Campo das Vertentes e Central Mineira Horizonte, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

APÊNDICE A

Jequitinhonha



Vale do Rio Doce

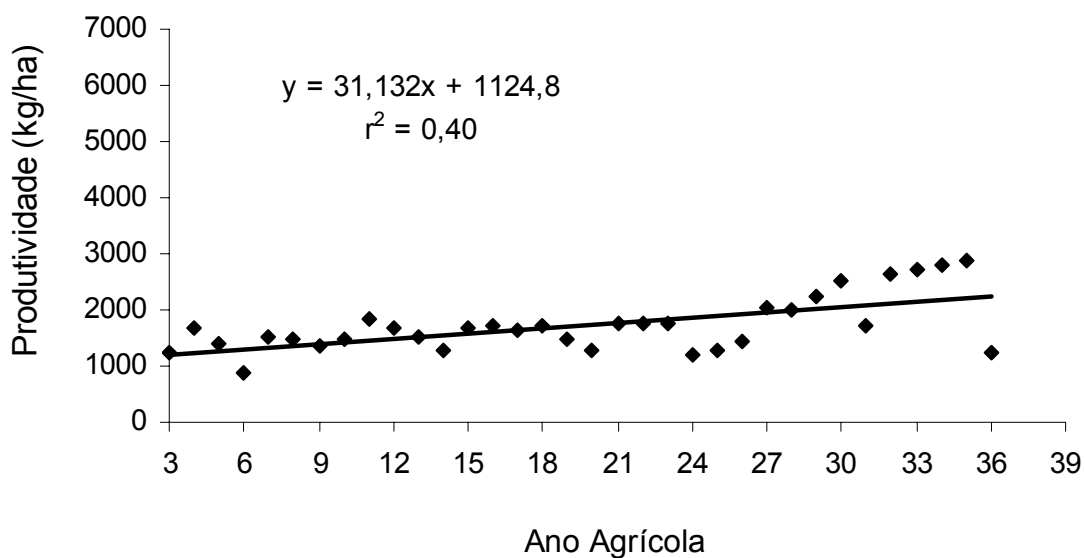


Figura 2 – Diagrama de dispersão da curva de tendência tecnológica da produtividade do milho nas mesorregiões Jequitinhonha e Vale do Rio Doce, de 1973 a 2006 (todos os anos foram subtraídos de 1970 para ajustar a escala).

APÊNDICE B

Quadro 1 – Porcentagens de falhas preenchidas com reanálise em cada mesorregião.

Mesorregião	Tmax	Tmin	Precip	Rs	VV
	%	%	%	%	%
Zona Mata	1.30	1.20	1.28	1.23	1.30
Sul e Sudoeste	2.80	2.54	2.54	3.07	2.95
Triângulo/Alto Paranaíba	5.57	5.52	5.92	5.80	6.19
Metropolitana de Belo Horizonte	2.86	2.86	2.86	2.88	3.14
Campo das Vertentes	11.68	11.12	11.11	12.78	13.17
Central Mineira	6.79	6.80	6.91	33.05	7.33
Jequitinhonha	7.76	14.63	6.09	0.00	6.84
Vale do Rio Doce	19.03	18.80	19.46	23.49	24.60

Quadro 2 – Período com maior número de falhas em cada mesorregião.

Mesorregião	Tmax	Tmin	Precip	Rs	VV
	Período	Período	Período	Período	Período
Zona da Mata	-	-	-	-	-
Sul Sudoeste	1988	1988	1988	1988	1988
Triângulo/Alto Paranaíba	1985; 1988	1985; 1988	1985; 1988	1985; 1988	1985; 1988
Metropolitana Belo Horizonte	1984-1985	1984-1985	1984-1985	1984-1985	1984-1985
Campo das Vertentes	1986-1989	1986-1989	1986-1989	1986-1989	1986-1989
Central Mineira	1984-1985	1984-1985	1984-1985	1961-1974; 1984-1985	1984-1985
Jequitinhonha	1980-1982; 1985-1986	1981-1983; 1986-1989	1985-1986	-	1985-1986
Vale do Rio Doce	1983-1988; 1992	1983-1988	1983-1988; 1992	1983-1988; 1991-1992	1983-1988; 1991-1992

Tmax – Temperatura Máxima (°C);

Tmin – Temperatura Mínima (°C);

Precip – Precipitação (mm);

Rs – Radiação Global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

VV – Velocidade do Vento (m s^{-1})

APÊNDICE C

Quadro 1 – Valores dos coeficientes a' e b' da equação 21 e equação final do PDSI para cada uma das mesorregiões estudadas.

Mesorregião	a'	b'	Equação PDSI
Zona da Mata	0.34	0.70	$X_i = \frac{Z_i}{1.04} + 0.6743 * X_{i-1}$
Sul e Sudoeste	0.55	0.63	$X_i = \frac{Z_i}{1.18} + 0.5345 * X_{i-1}$
Triângulo/Alto Paranaíba	0.52	0.47	$X_i = \frac{Z_i}{0.99} + 0.4784 * X_{i-1}$
Metropolitana de Belo Horizonte	0.61	0.03	$X_i = \frac{Z_i}{0.64} + 0.0527 * X_{i-1}$
Campo das Vertentes	0.48	0.96	$X_i = \frac{Z_i}{1.43} + 0.666 * X_{i-1}$
Central Mineira	0.38	1.18	$X_i = \frac{Z_i}{1.56} + 0.7594 * X_{i-1}$
Jequitinhonha	0.58	0.16	$X_i = \frac{Z_i}{0.73} + 0.2159 * X_{i-1}$
Vale do Rio Doce	0.44	0.45	$X_i = \frac{Z_i}{0.89} + 0.5082 * X_{i-1}$

APÊNDICE D

Quadro 1 – Data das simulações do plantio.

Safra	Zona da Mata		Sul e Sudoeste		Triângulo/Alto P.		Metropolitana BH	
	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ
2007/2008	29-Out-2007	302	9-Out-2007	282	10-Out-2007	283	3-Out-2007	276
2008/2009	8-Out-2008	282	3-Out-2008	277	4-Out-2008	278	3-Out-2008	277
2009/2010	6-Out-2009	279	6-Out-2009	279	13-Dez-2009	347	5-Out-2009	278
2010/2011	24-Out-2010	297	27-Out-2010	300	29-Nov-2010	333	24-Out-2010	297
2011/2012	15-Nov-2011	319	4-Nov-2011	308	12-Out-2011	285	15-Nov-2011	319
2012/2013	11-Nov-2012	316	6-Out-2012	280	3-Nov-2012	308	4-Out-2012	278
2013/2014	23-Out-2013	296	3-Out-2013	276	16-Out-2013	289	4-Out-2013	277
2014/2015	23-Out-2014	296	19-Out-2014	292	20-Out-2014	293	19-Out-2014	292
2015/2016	18-Nov-2015	322	20-Out-2015	293	15-Out-2015	288	6-Out-2015	279
2016/2017	10-Nov-2016	315	6-Out-2016	280	12-Out-2016	286	6-Out-2016	280
2017/2018	17-Out-2017	290	4-Out-2017	277	5-Out-2017	278	2-Out-2017	275
2018/2019	14-Out-2018	287	13-Out-2018	286	15-Out-2018	288	14-Out-2018	287
2019/2020	22-Nov-2019	326	19-Out-2019	292	21-Nov-2019	325	22-Out-2019	295

(Continua)

Safra	Campo Vertentes		Central Mineira		Jequitinhonha		Vale do Rio Doce	
	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ	Data Plantio	DJ
2007/2008	2-Out-2007	275	10-Nov-2007	314	10-Out-2007	283	9-Out-2007	282
2008/2009	3-Out-2008	277	3-Out-2008	277	3-Out-2008	277	3-Out-2008	277
2009/2010	4-Out-2009	277	13-Dez-2009	347	6-Dez-2009	340	5-Out-2009	278
2010/2011	23-Out-2010	296	28-Nov-2010	332	28-Out-2010	301	22-Out-2010	295
2011/2012	15-Nov-2011	319	4-Nov-2011	308	14-Dez-2011	348	4-Nov-2011	308
2012/2013	4-Out-2012	278	3-Nov-2012	308	3-Nov-2012	308	5-Out-2012	279
2013/2014	5-Out-2013	278	16-Out-2013	289	5-Out-2013	278	3-Out-2013	276
2014/2015	19-Out-2014	292	20-Out-2014	293	20-Out-2014	293	19-Out-2014	292
2015/2016	14-Out-2015	287	15-Out-2015	288	1-Dez-2015	335	9-Nov-2015	313
2016/2017	11-Out-2016	285	12-Out-2016	286	12-Out-2016	286	12-Out-2016	286
2017/2018	3-Out-2017	276	5-Out-2017	278	4-Out-2017	277	3-Out-2017	276
2018/2019	13-Out-2018	286	15-Out-2018	288	14-Out-2018	287	14-Out-2018	287
2019/2020	22-Out-2019	295	22-Nov-2019	326	20-Out-2019	293	21-Nov-2019	325

DJ – Dia Juliano

APÊNDICE E

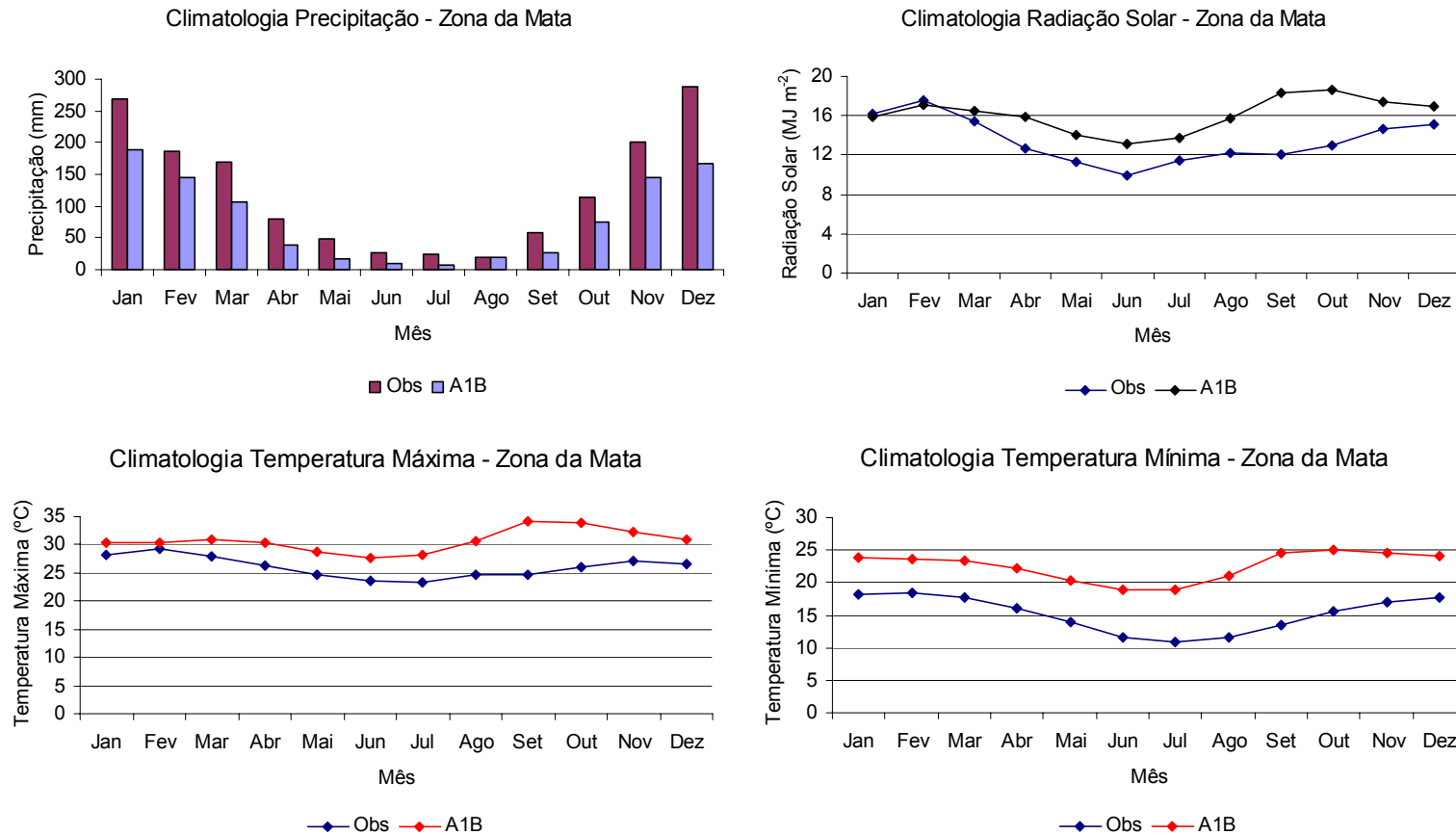


Figura 1 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Zona da Mata.

APÊNDICE E

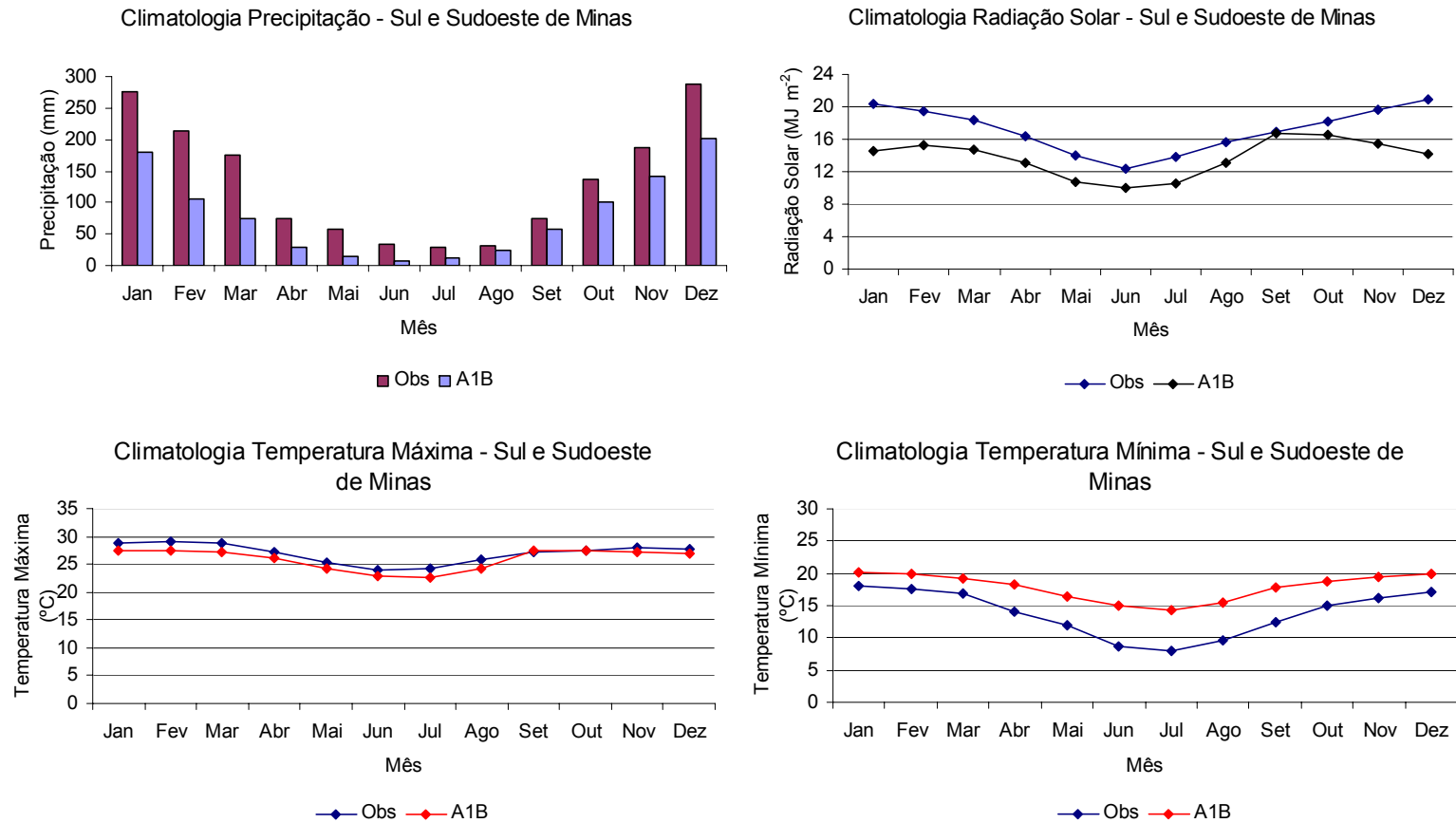


Figura 2 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.

APÊNDICE E

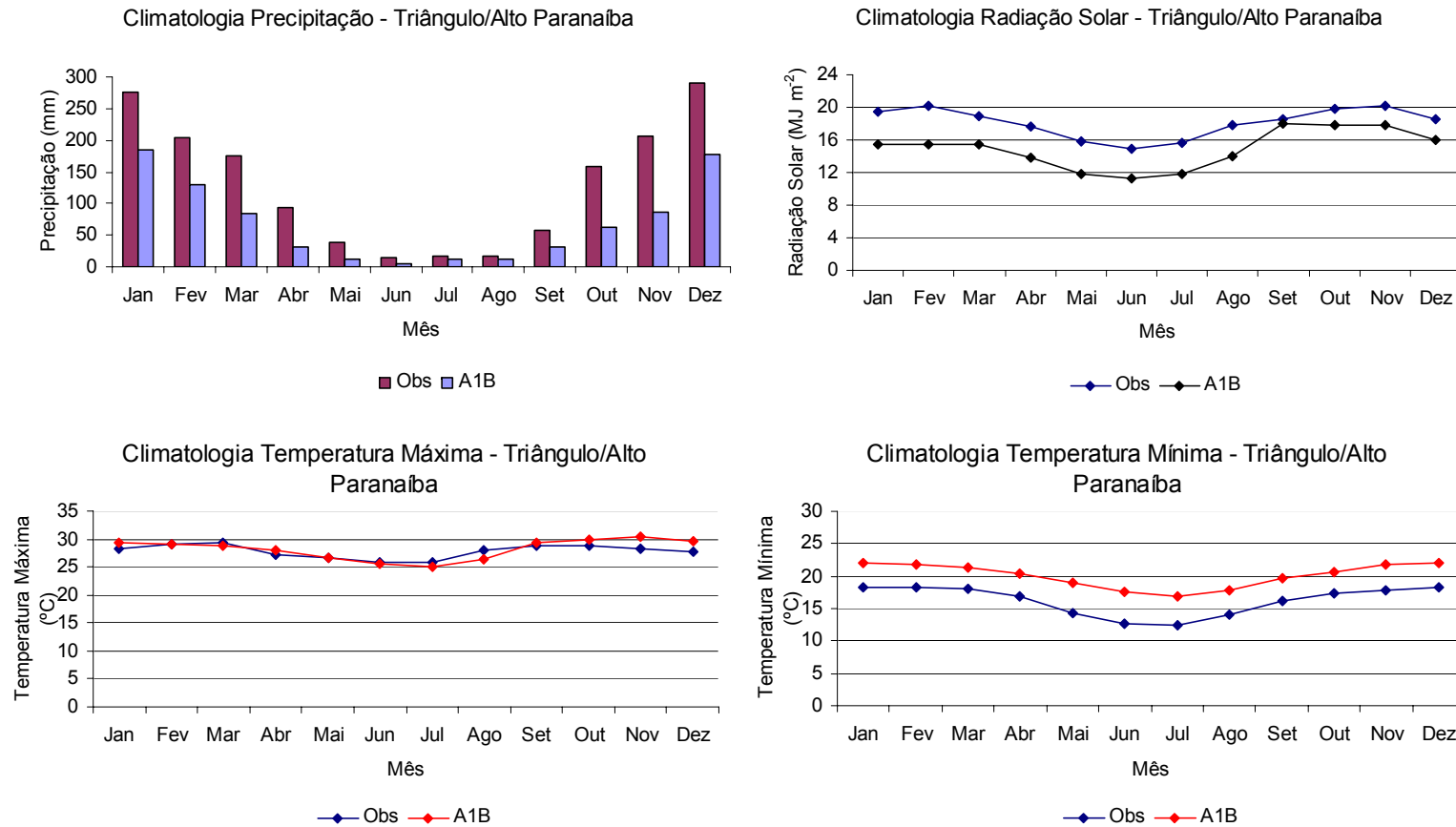


Figura 3 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.

APÊNDICE E

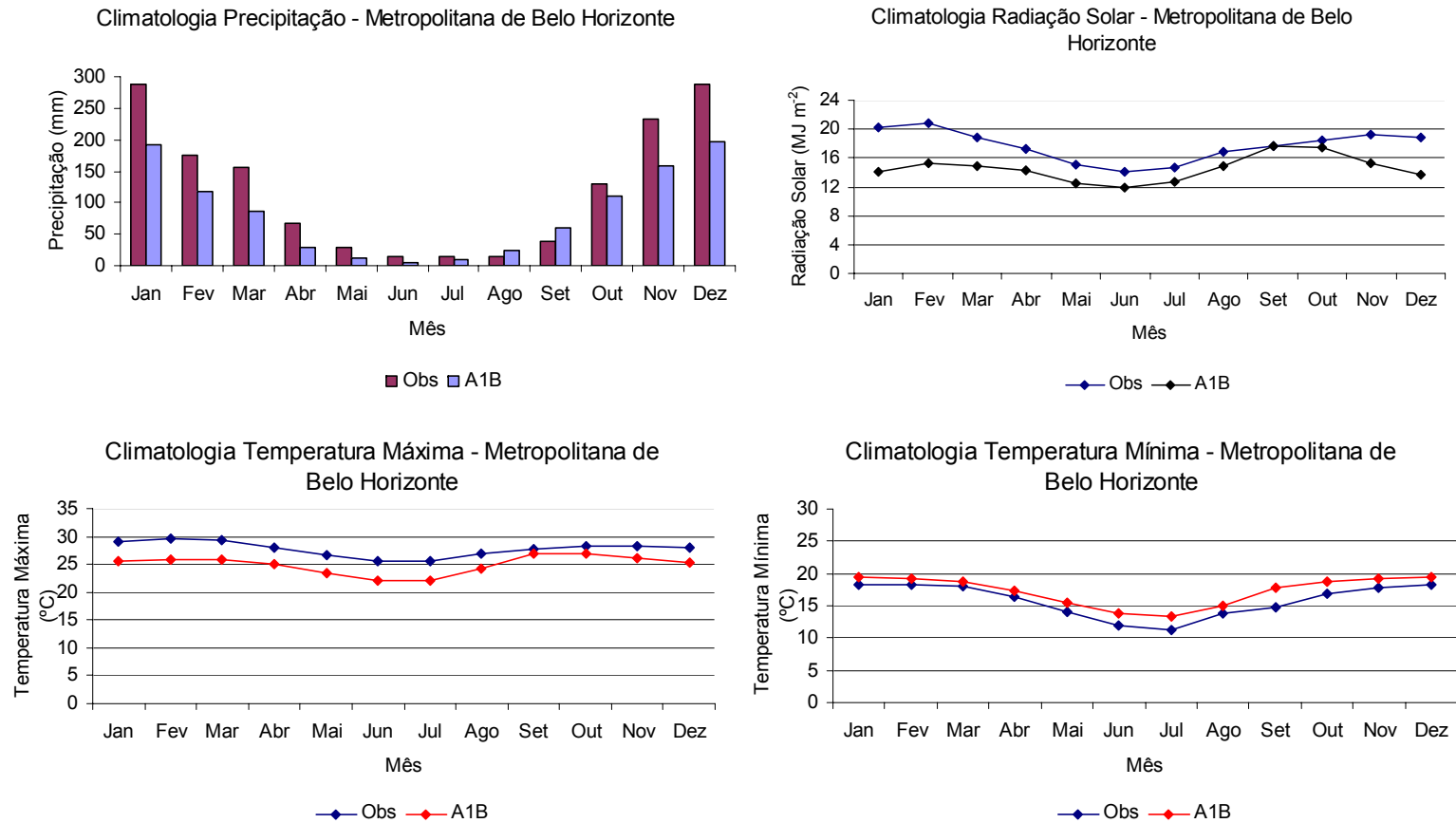


Figura 4 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.

APÊNDICE E

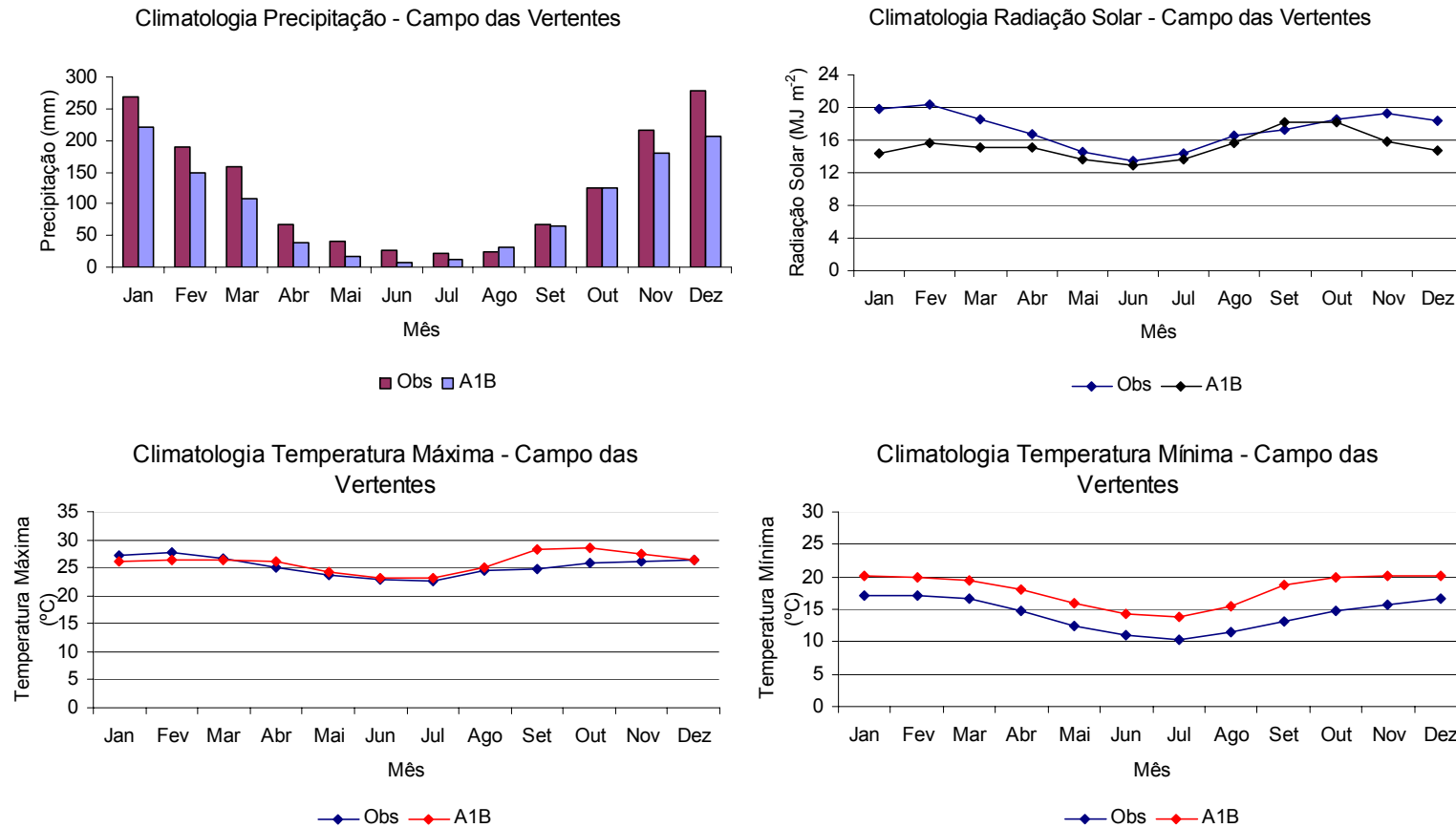


Figura 5 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Campo das Vertentes.

APÊNDICE E

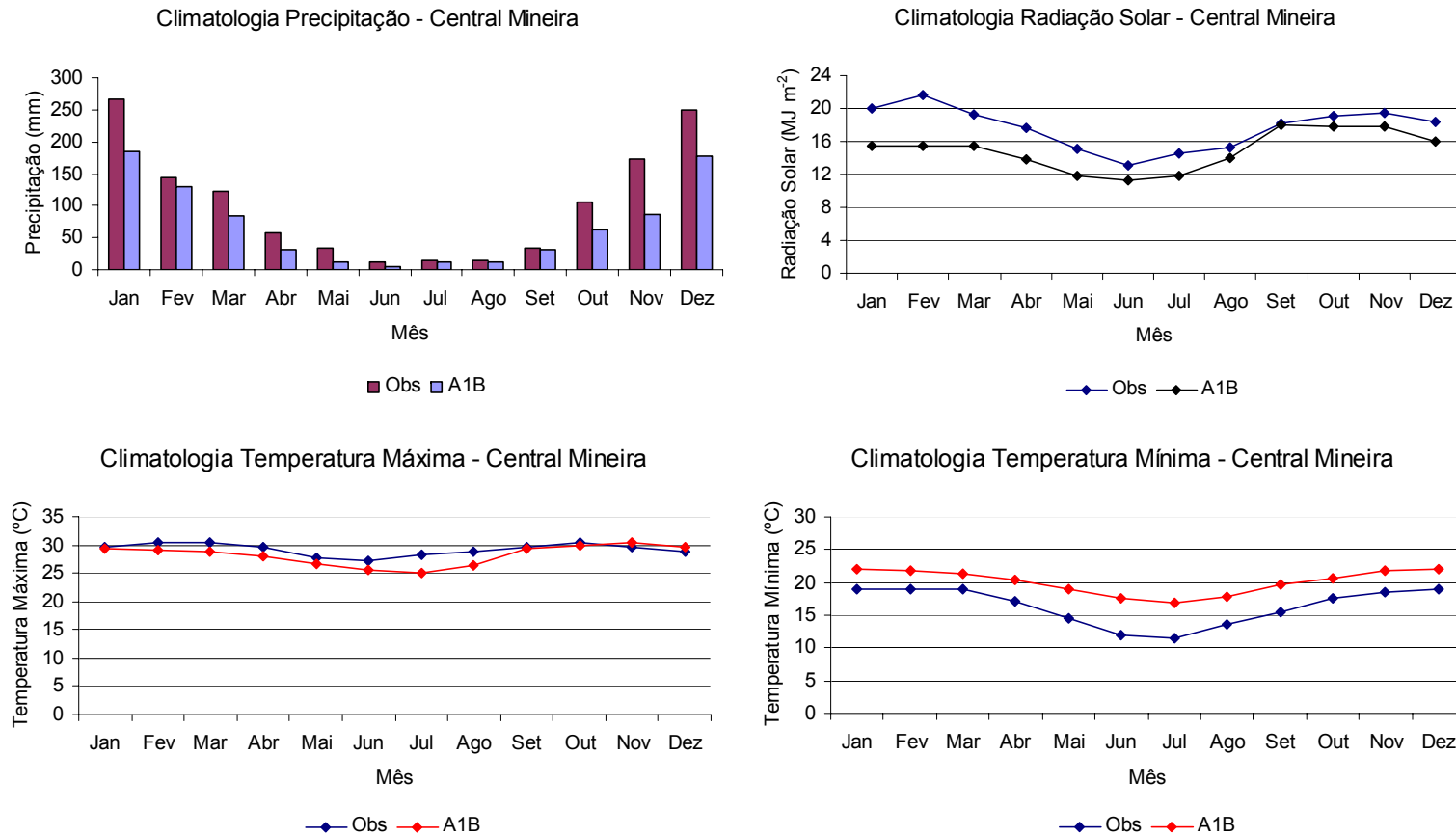


Figura 6 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Central Mineira.

APÊNDICE E

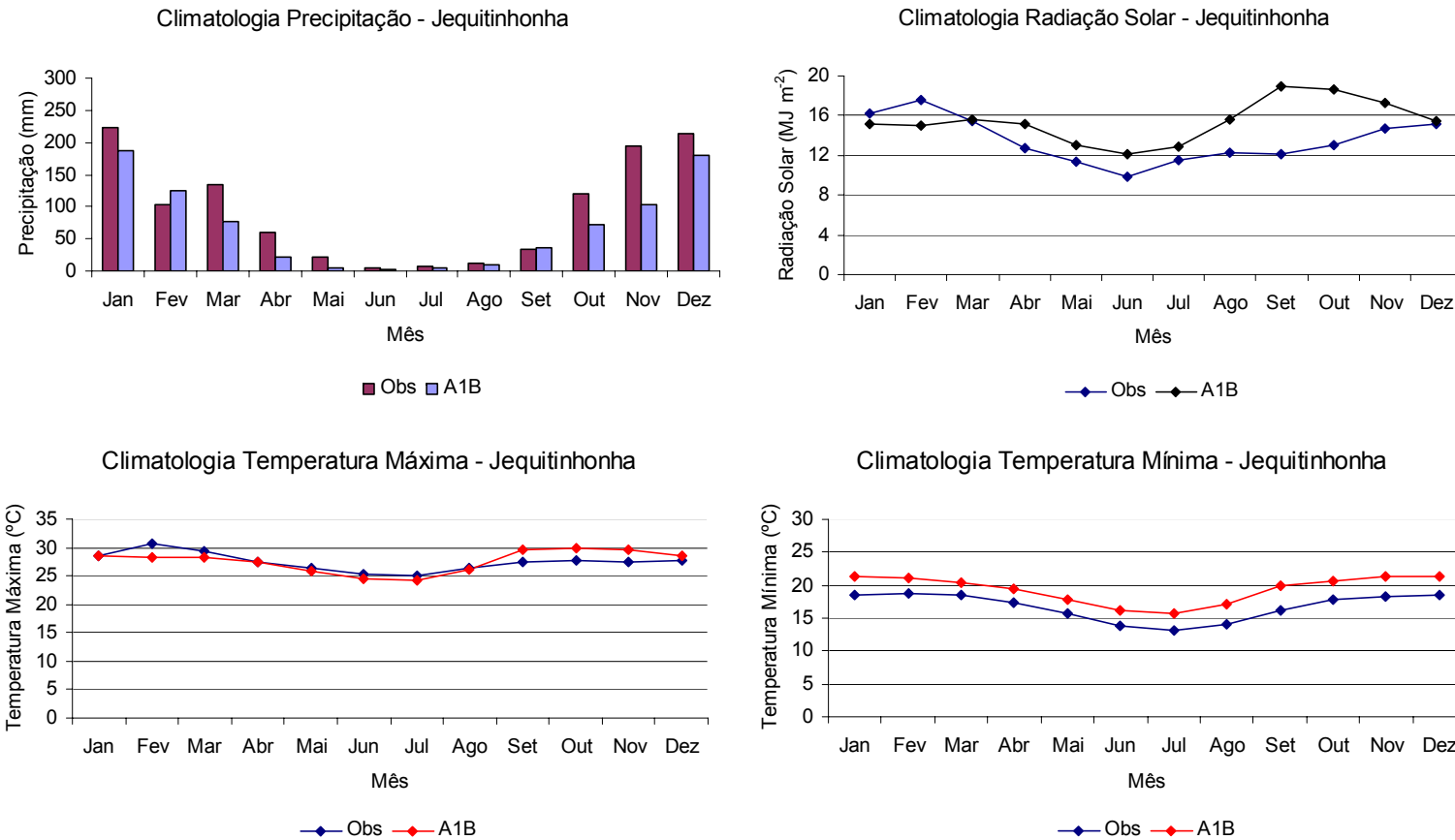


Figura 7 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Jequitinhonha.

APÊNDICE E

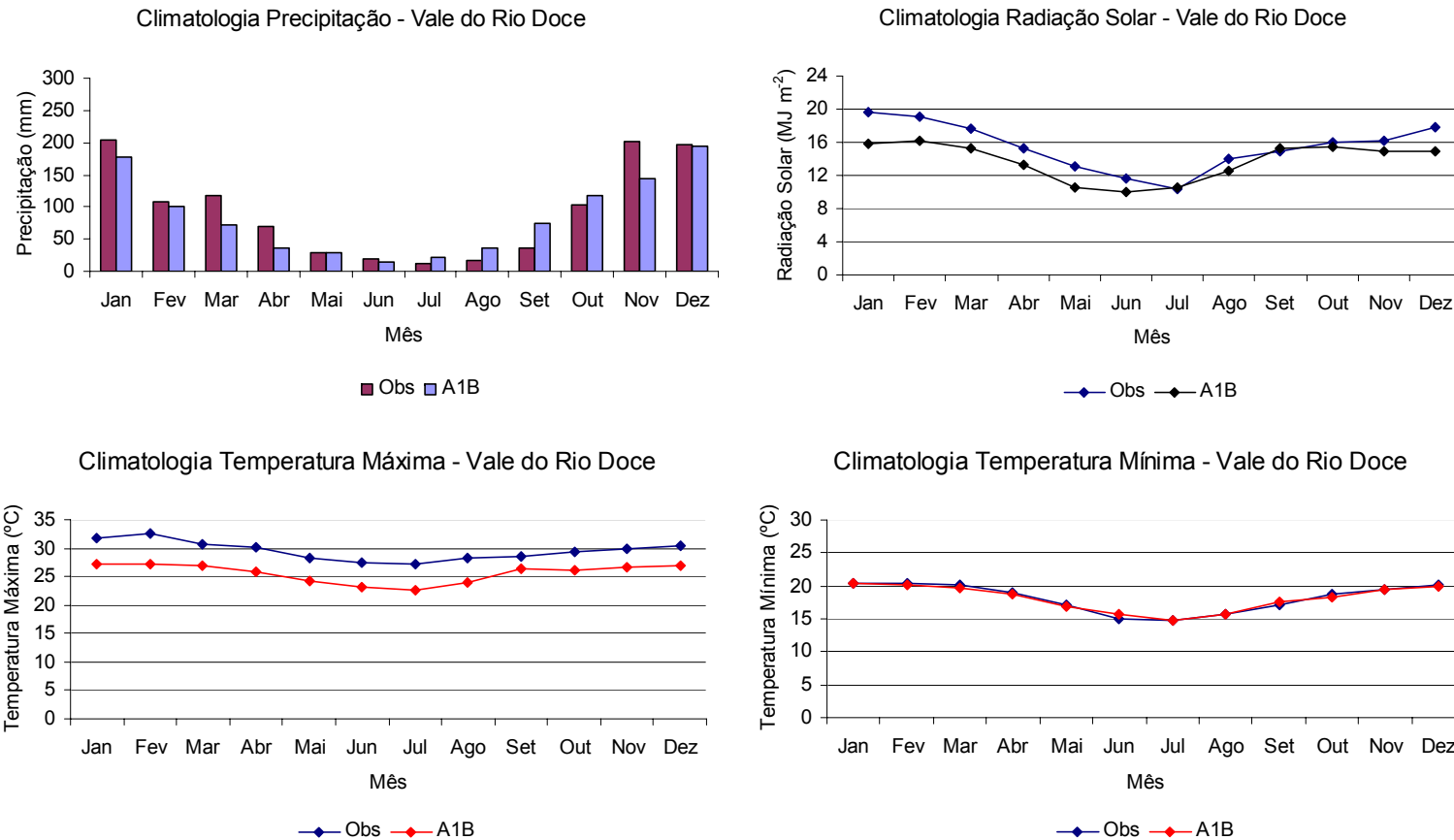


Figura 8 – Distribuição da climatologia observada (1961-1990) e simulada (ECHAM5/MPI-OM), cenário A1B (1991-2020), para a mesorregião Vale do Rio Doce.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Zona da Mata

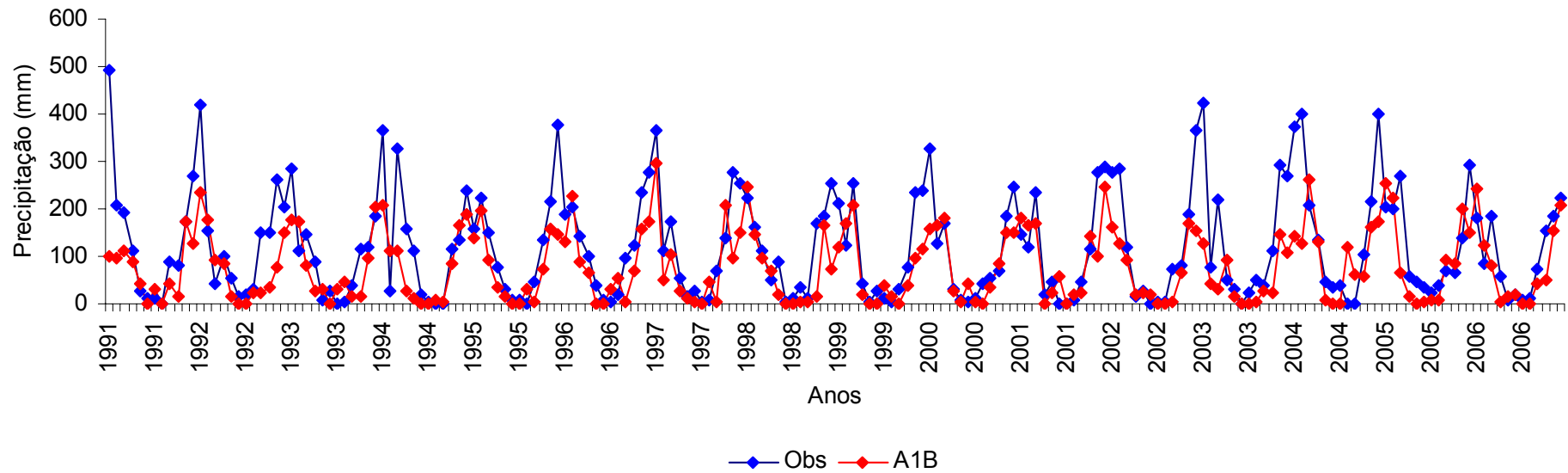


Figura 1 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2006 para a mesorregião Zona da Mata.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Sul e Sudoeste de Minas

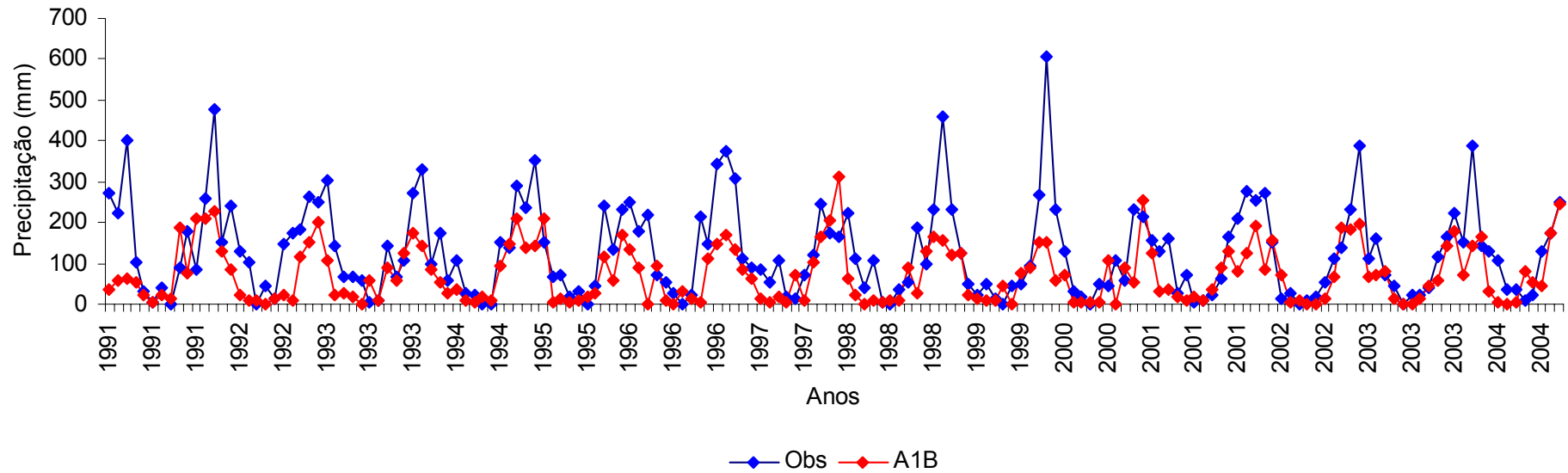


Figura 2 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Sul e Sudoeste de Minas.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Triângulo/Alto Paranaíba

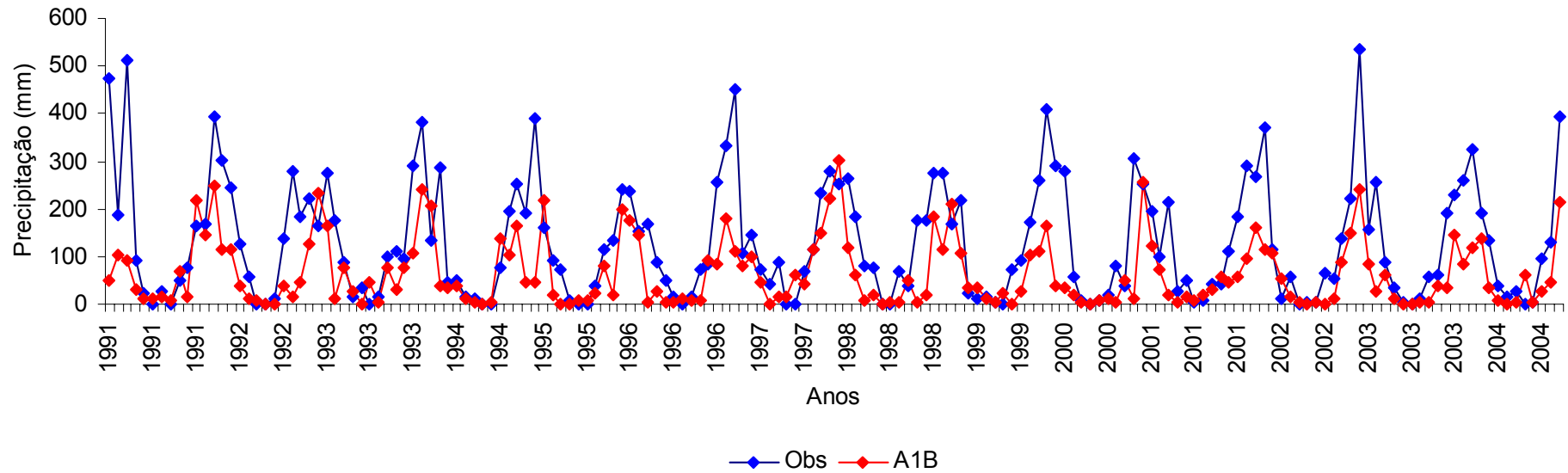


Figura 3 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Metropolitana de Belo Horizonte

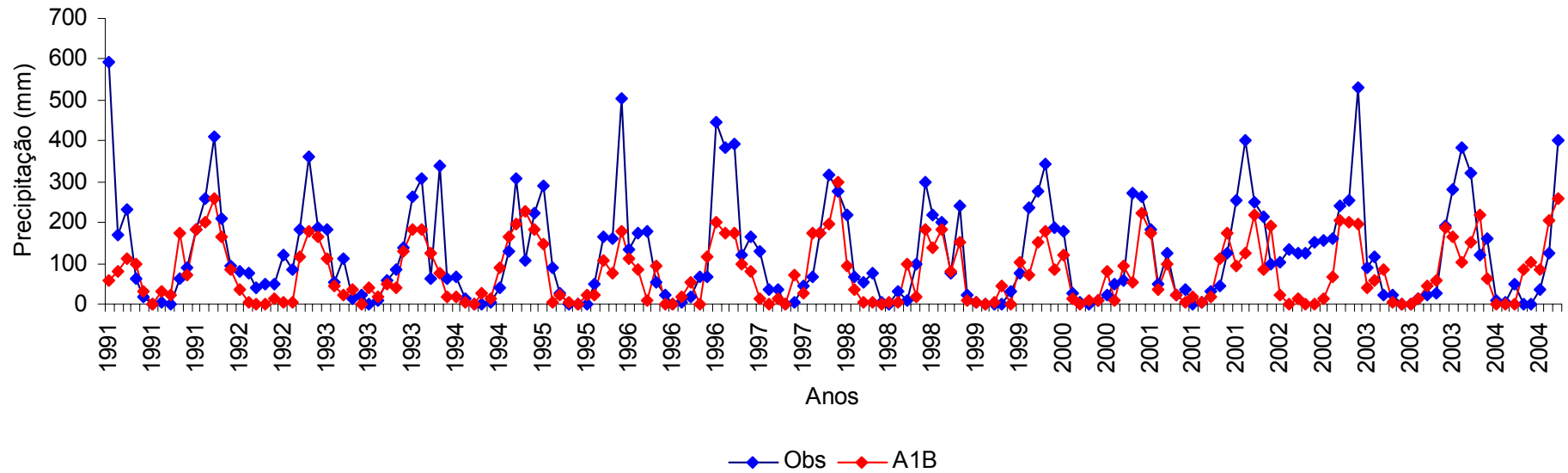


Figura 4 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Campo das Vertentes

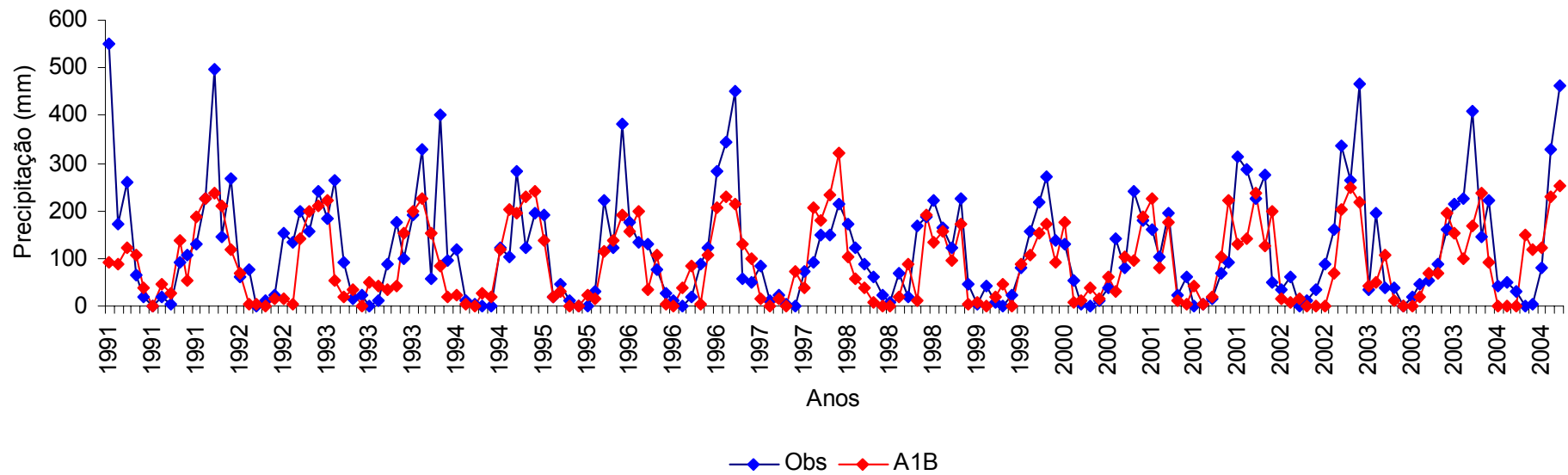


Figura 5 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Campo das Vertentes.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Central Mineira

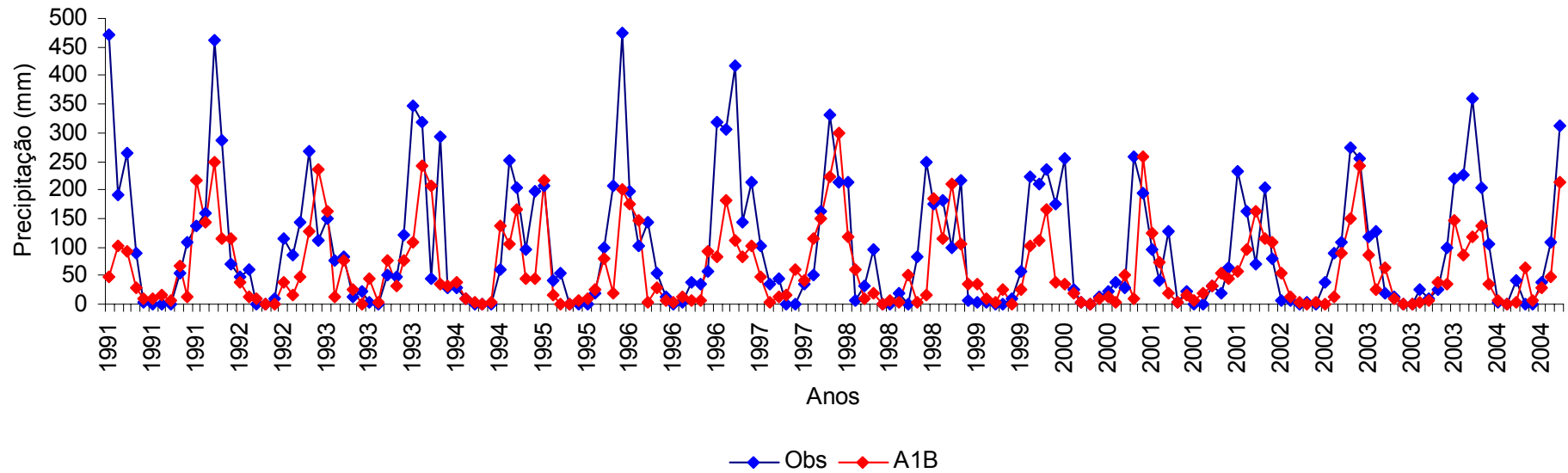


Figura 6 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Central Mineira.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Jequitinhonha

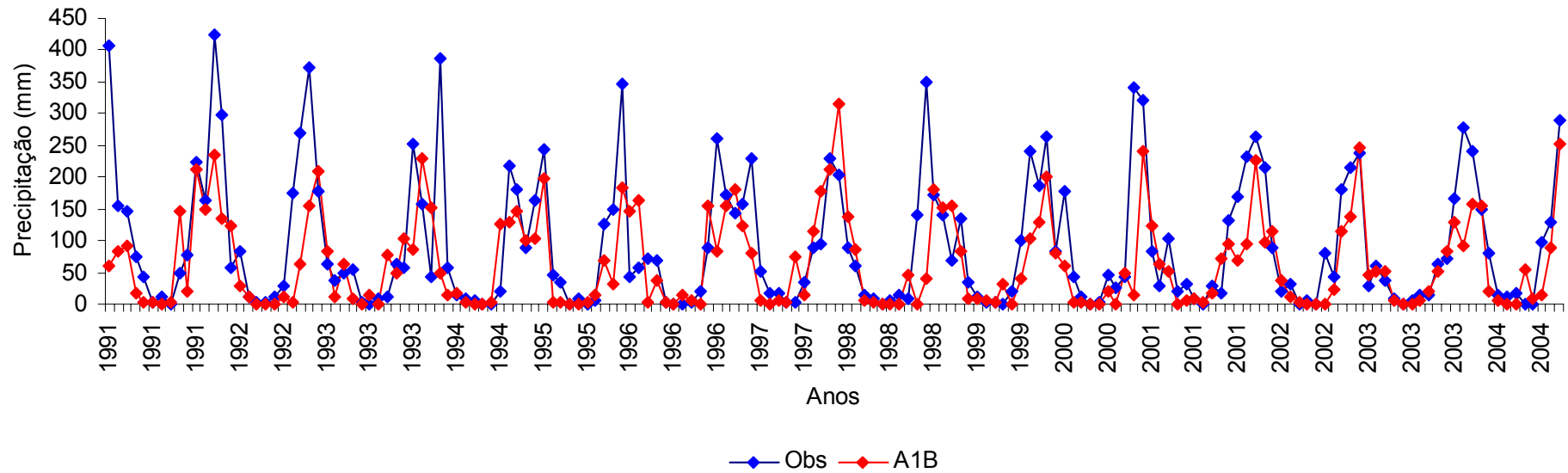


Figura 7 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Jequitinhonha.

APÊNDICE F

Distribuição da Precipitação Observada e Simulada (ECHAM5/MPI - OM) - Vale do Rio Doce

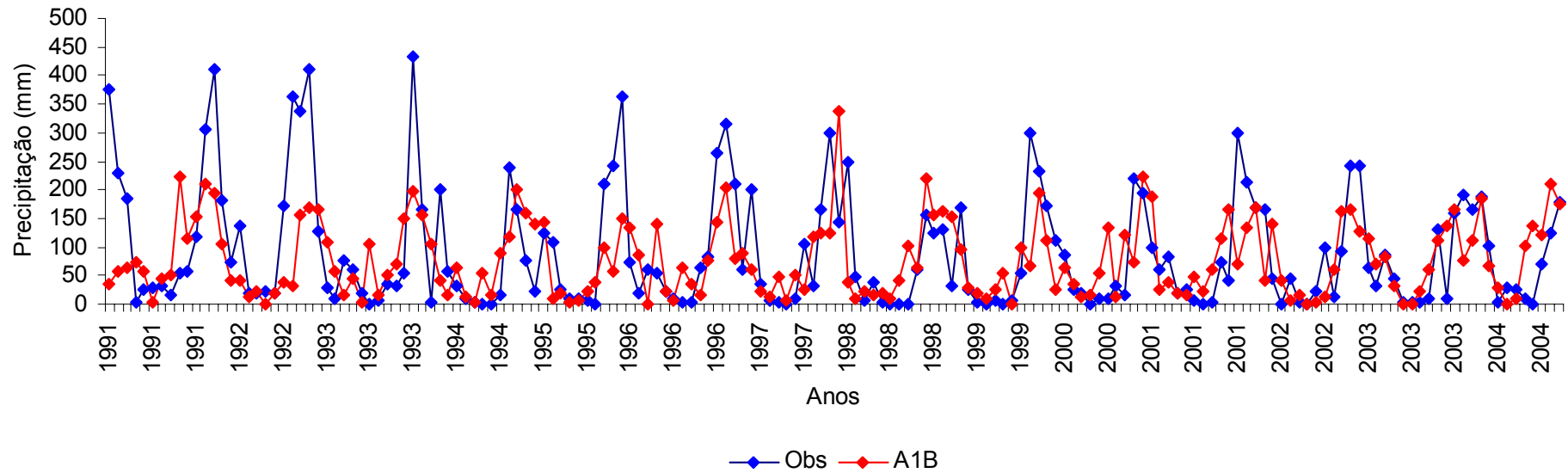


Figura 8 – Distribuição mensal da precipitação observada (Obs) e simulada pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B) no período de 1991 a 2004 para a mesorregião Vale do Rio Doce.

APÊNDICE G

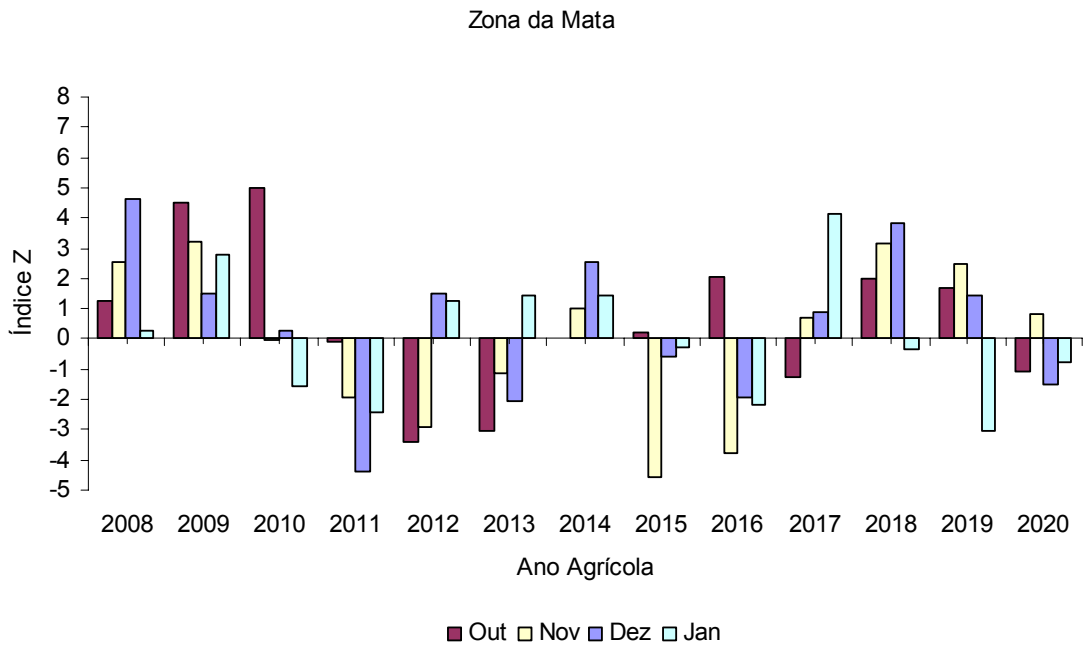


Figura 1 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Zona da Mata pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

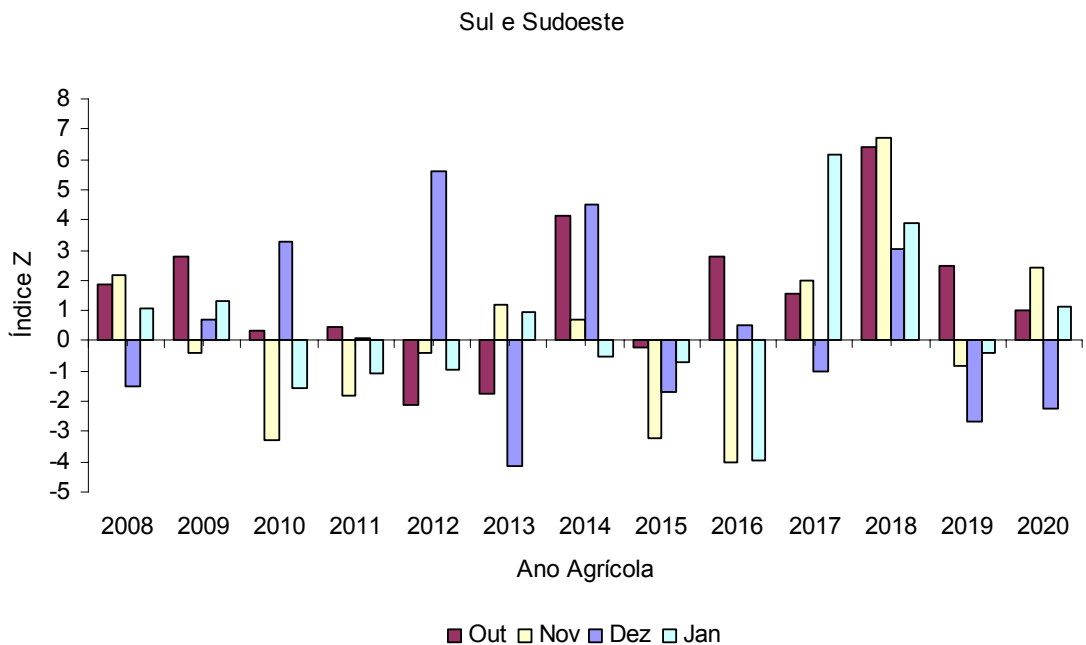


Figura 2 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Sul e Sudoeste pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

APÊNDICE G

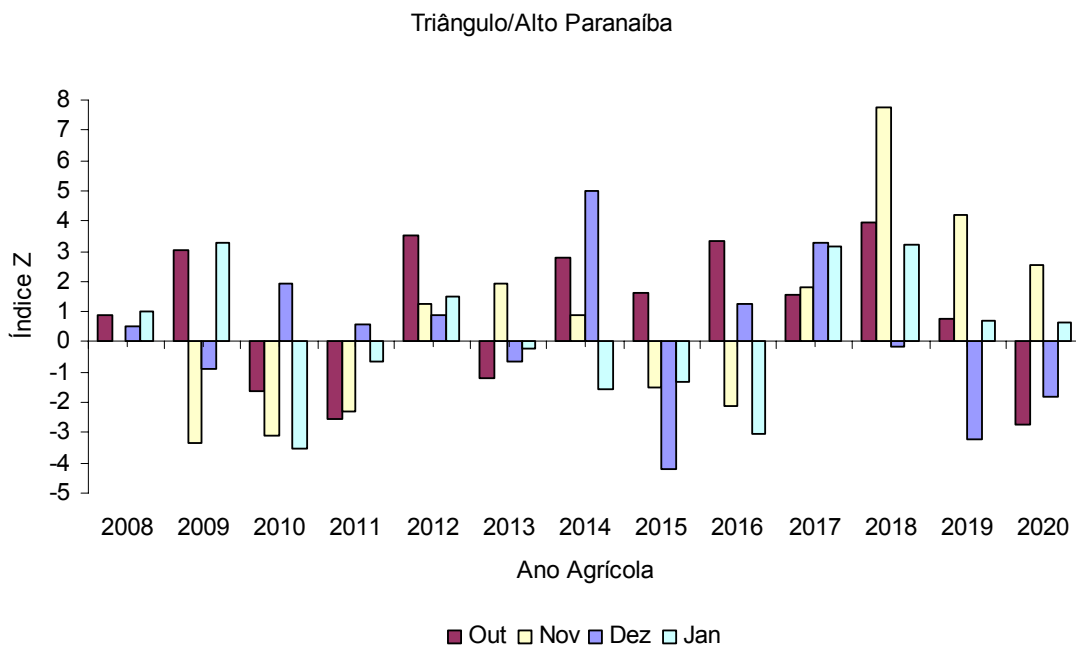


Figura 3 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

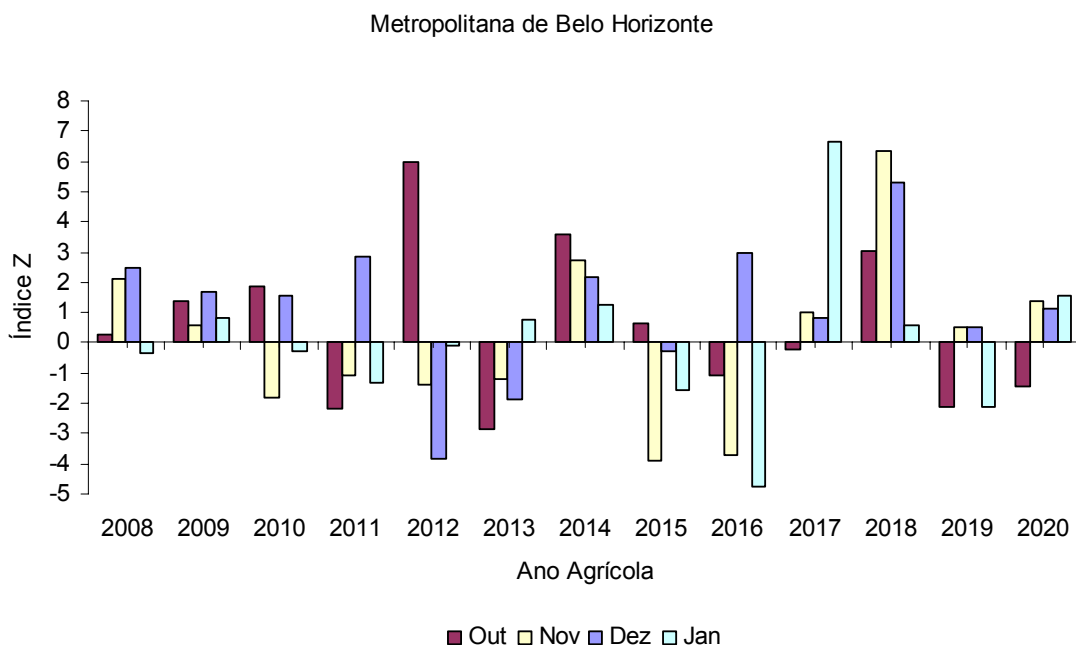


Figura 4 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

APÊNDICE G

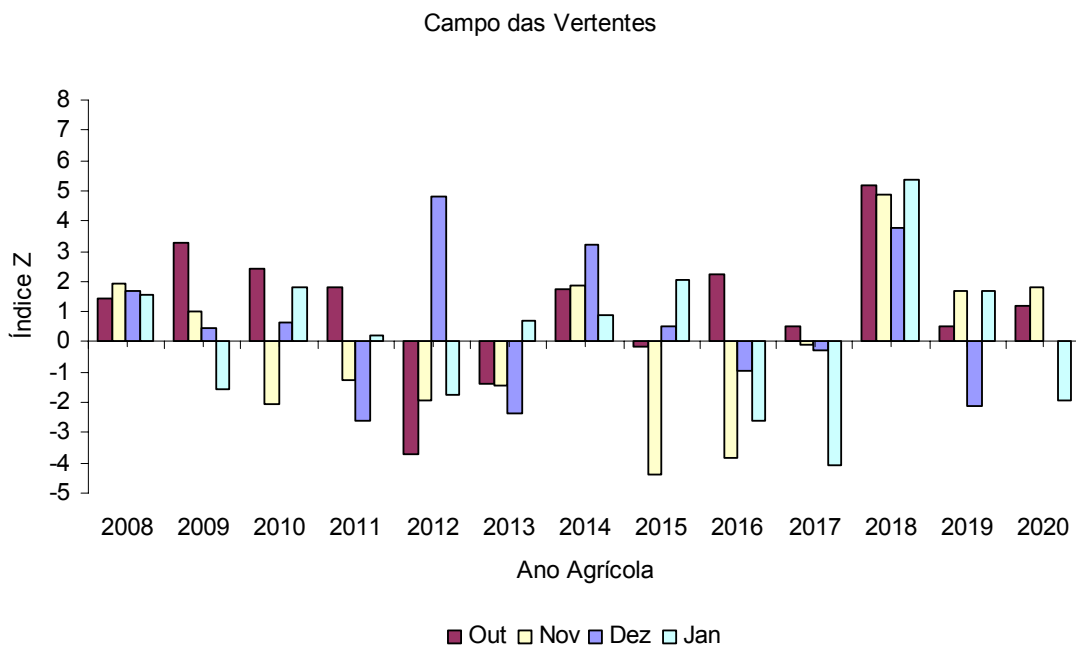


Figura 5 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Campo das Vertentes pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

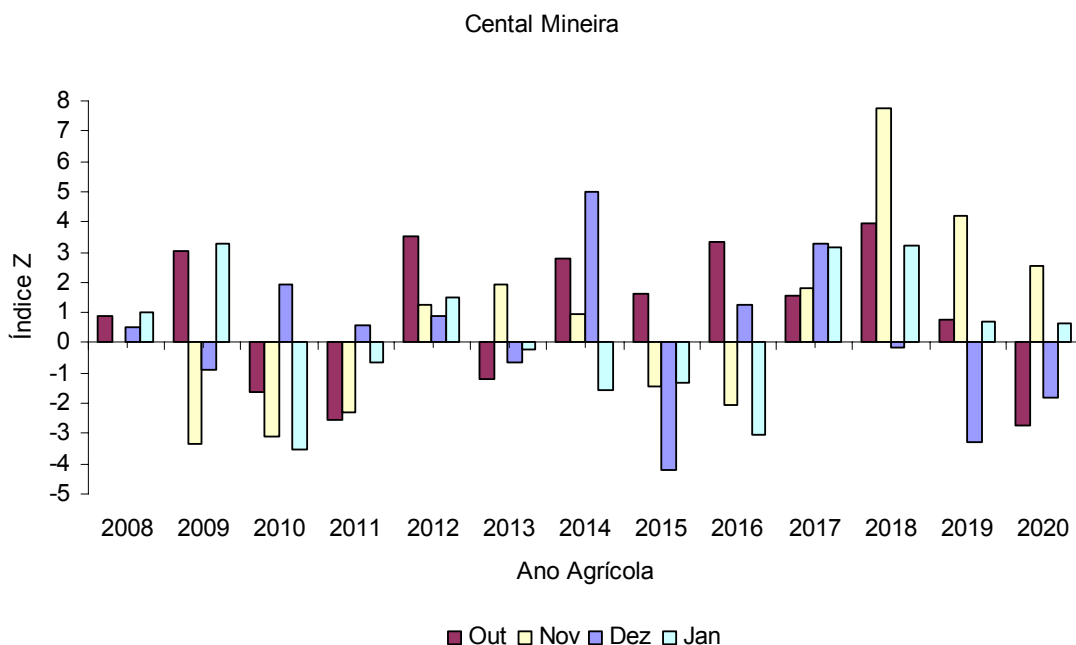


Figura 6 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Central Mineira pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

APÊNDICE G

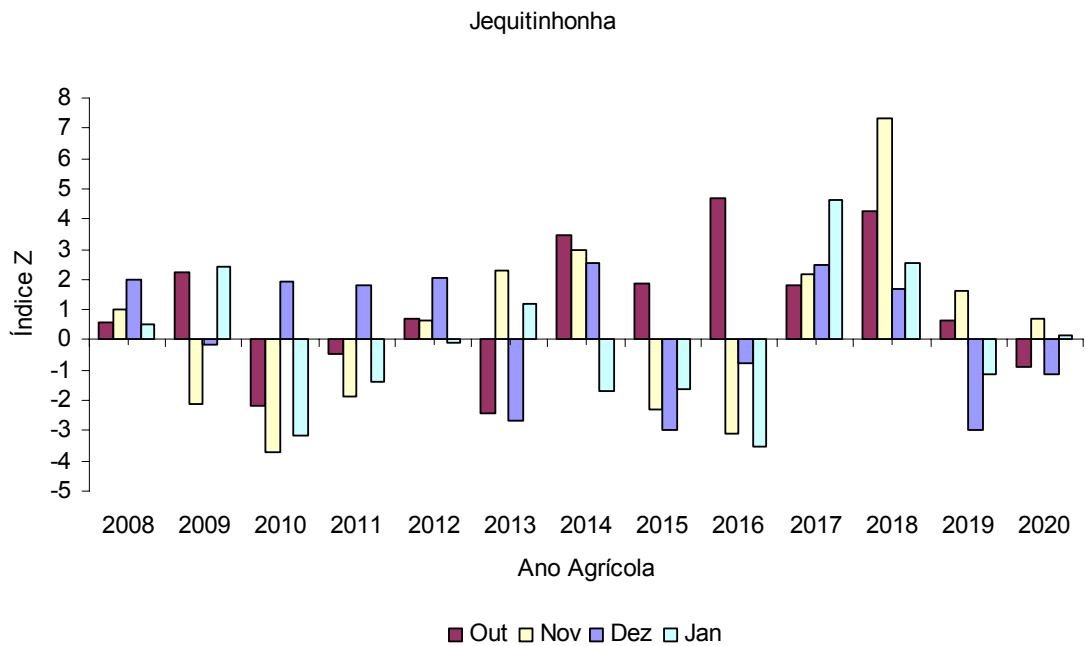


Figura 7 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Jequitinhonha pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.

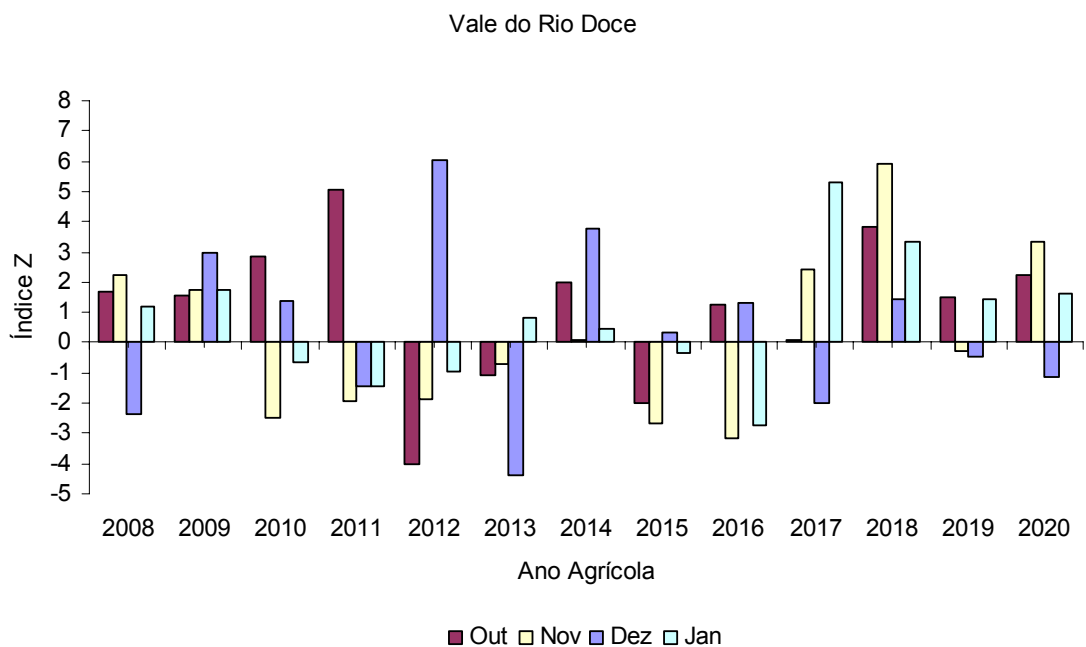


Figura 8 – Variação projetada para o índice Z para a mesorregião Vale do Rio Doce pelo modelo ECHAM5/MPI-OM para cenário A1B no período de 2008 – 2020.