

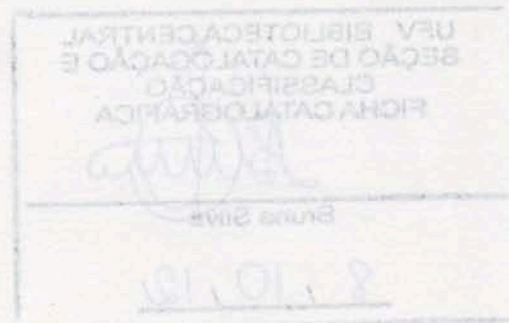
DAYANE VALENTINA BRUMATTI

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO AQUECIMENTO GLOBAL NO RISCO DE
FOGO NA ÁFRICA**

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

2012



**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B893a
2012

Brumatti, Dayane Valentina, 1985-
Avaliação do impacto do aquecimento global no risco de
fogo na África / Dayane Valentina Brumatti. – Viçosa, MG,
2012.

xi, 46f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 39-46

1. Aquecimento global. 2. Fogo. 3. Mudanças climáticas.
4. África. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 363.73874

DAYANE VALENTINA BRUMATTI

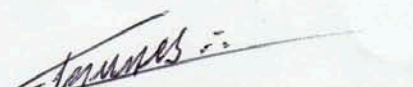
**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO AQUECIMENTO GLOBAL NO RISCO DE
FOGO NA ÁFRICA**

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*.

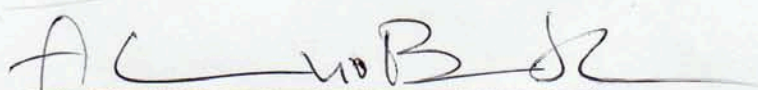
APROVADA: 19 de julho de 2012.



Marcelo Cid de Amorim



Edson Luís Nunes



Flávio Barbosa Justino
(Orientador)

Dedico aos meus pais, irmãs e sobrinhos pelo amor e apoio incondicionais e, em especial, aos meus amores Maurício e Rafael, minha vida.

O aquecimento global está afetando tudo o que vive e respira no planeta.
(*Brent Blackwerder*, presidente da organização Amigos da Terra)

**"Fogo sempre foi e, aparentemente, sempre será, o mais terrível dos elementos."
(Harry Houdini)**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela oportunidade de ter feito o mestrado e por estar concluindo mais essa etapa em minha vida.

Aos meus pais, que me ensinaram tudo que uma pessoa de boa índole deve ser e que, apesar de no início não apoiarem tanto minha vinda à Viçosa, sempre incentivaram meu crescimento através do estudo e da busca pela realização dos sonhos. Às minhas irmãs, por serem acima de tudo amigas, agradeço muito por isso. A distância nunca foi e jamais será suficiente para enfraquecer os laços da nossa união, que são feitos de amor e de muito companheirismo. Aos meus dois sobrinhos Katherine e Gabriel, que amo muito e morro de saudades e à Laura, o anjinho da titia que está para nascer. Também não poderia deixar de agradecer aos meus cunhados, que considero verdadeiros irmãos.

Agradeço ao meu amor Maurício por estar presente sempre que precisei e por ser marido, pai, amigo e tudo que um bom companheiro é. Obrigada por todo apoio e por todo amor.

Sinceramente agradeço ao professor Flávio Justino, por toda compreensão pela fase de mudança que houve em minha vida durante o mestrado, pela confiança depositada e por sempre ser atencioso. Por estar sempre disposto a ouvir, aconselhar e por ser um excelente profissional. Me sinto orgulhosa de ter sido sua orientada.

Aos velhos e bons amigos sempre em meu coração mesmo que a distância nos separe, em especial Gabi, Karen e Sávia. Aos não tão velhos e nem tão novos assim, laços criados na UFV. E à toda galera da Meteorologia, principalmente aos do anexo, por eu ter tido maior convívio. Agradeço em especial à Marine e ao Alex, companheiros de sala, além de parceiros de almoço, de café (com muuito pó de café), de descontração, entre outros, e à Aninha, muito amiga que estreitei os laços no departamento, agradeço por me ouvir, aconselhar e por ser uma pessoa com quem pude compartilhar todas minhas dúvidas e inquietações.

Ao professor Carlos Goulart, que se tornou um grande amigo, agradeço sempre os ensinamentos, o apoio e os conselhos. Ao Luiz Cláudio Costa e ao Marcelo Cid Amorim por terem me apresentado o programa de Meteorologia Agrícola, ainda na minha graduação.

À Tânia que cuida com maior carinho do Rafael e é minha "mãe de Viçosa" desde 2005, quando cheguei aqui.

Não poderia deixar de agradecer também pela solicitude da Graça, uma profissional exemplar, sempre disposta a resolver quaisquer problemas dos alunos.

Aos funcionários do DEA, em especial ao Seu Cosme, agradeço pela simpatia e por deixar nosso ambiente de trabalho sempre limpo.

Agradeço ao CNPQ, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado. Essa para mim foi uma chance não só de crescimento profissional e pessoal, mas também de conhecer tantas pessoas queridas com quem tive o prazer de conviver nestes anos.

E finalmente ao amor da minha vida Rafael, agradeço por ter entrado nela e ter me feito uma pessoa muito mais feliz. Eu amo ser mãe. Chegar em casa e vê-lo me faz esquecer de todos os problemas.

"Amor da minha vida

Daqui até a eternidade

Nossos destinos foram traçados

na maternidade.."

BIOGRAFIA

DAYANE VALENTINA BRUMATTI, filha de Valentim Brumatti e Gilda Côgo Brumatti, natural de São Gabriel da Palha/ES, nasceu no dia 02 de setembro de 1985.

Em março de 2005, ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), transferindo para Engenharia Ambiental em 2007. Em 2006, estagiou como aluna voluntária em Meteorologia Agrícola, orientada pelos professores Luiz Cláudio Costa e Marcelo Cid Amorim.

Em julho de 2010, graduou-se como Engenheira Ambiental.

Em agosto do mesmo ano ingressou no Programa de Pós-graduação, nível Mestrado em Meteorologia Agrícola, na linha de concentração Hidroclimatologia.

Em julho de 2012 submeteu-se à defesa de tese no programa de Mestrado em Meteorologia Agrícola.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA	6
2.1. Dados utilizados	6
2.2. Índice Potencial de Fogo (PFI - Potential Fire Index)	10
2.2.1. Formulação do PFI	10
2.2.2. Sequência do cálculo do PFI	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
3.1. Análise dos Dias Atuais (DA)	16
3.2. Análise para Aquecimento Global (AG)	26
4. CONCLUSÕES.....	37
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização das queimadas mundial com base mensal. Nesta imagem, destacam-se os incêndios em setembro de 2010.....3**
- Figura 2. Distribuição global de relâmpagos por quilômetro quadrado por ano, de abril de 1995 à fevereiro de 2003, a partir da combinação das observações dos satélites NASA OTD e LIS.....4**
- Figura 3. Distribuição da vegetação simulada por CLM-DGVM impulsionado pela forçante do clima por CCSM (esquerda), HadCM3 (meio) e ECHAM (direita) para condições pré- industriais (A, B, C) e para condições de aquecimento global (D, E, F)..9**
- Figura 4. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para DJF. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM.17**
- Figura 5. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para DJF. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM, para NNR.....19**
- Figura 6. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para ASO. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM.21**
- Figura 7. Cálculo da média para os dias atuais para ASO de temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). D, E e F representam o PFI com base na vegetação forçada para NNR.....22**

Figura 8. Pontos quentes detectados por satélite com temperatura de brilho maior do que 308K nos anos de 2004 e 2008, durante dezembro-janeiro-fevereiro e agosto-setembro-outubro.	24
Figura 9. Localização dos países da África Austral.....	26
Figura 10. Anomalias do aquecimento global em comparação com os dias atuais, em DJF. Temperatura máxima (A,°C), umidade relativa (B,%) e dias de seca (C).	27
Figura 11. A, B e C mostram o PFI estimado a partir da simulação do efeito estufa com base na vegetação forçada pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para DJF.	29
Figura 12. A, B e C mostram as anomalias do PFI em comparação com os dias atuais forçadas pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF).....	30
Figura 13. Anomalias do aquecimento global em comparação com os dias atuais, em Agosto, Setembro e Outubro (ASO). Temperatura máxima (A,°C), umidade relativa (B,%) e dias de seca (C).	32
Figura 14. A, B e C mostram o PFI estimado a partir da simulação do efeito estufa com base na vegetação forçada pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Agosto, Setembro e Outubro (ASO).	33
Figura 15. A, B e C mostram as anomalias do PFI em comparação com os dias atuais forçadas pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Agosto, Setembro e Outubro (ASO).	34
Figura 16. Média zonal mensal do PFI atual e futuro para (A) 5°N-20°N, (B) 10°S-5°N, (C) 25°S-10°S e (D) 40°S-25°S.....	36

RESUMO

BRUMATTI, Dayane Valentina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Avaliação do Impacto do Aquecimento Global no Risco de Fogo na África.** Orientador: Flávio Barbosa Justino.

Com base em simulações de modelos climáticos regionais realizadas com o RegCM3 e reanálises do NCEP, o impacto do clima anômalo forçando a vulnerabilidade ambiental para a ocorrência de incêndios na África é analisado através da aplicação do Índice de Potencial de Fogo (PFI). Três distribuições distintas de vegetação foram analisadas por uma simulação atual (1980-2000) e para o final do século XXI (2080-2100). Foi demonstrado que em condições atuais o PFI é capaz de detectar as principais áreas de risco de fogo, que estão concentradas na região do Sahel, de dezembro a março, e na África subtropical, de julho a outubro. Previsão de futuras mudanças na vegetação levam a modificações substanciais na magnitude do PFI, particularmente para a região subtropical da África. A confiabilidade do PFI para a reprodução de áreas com alta atividade de fogo indica que este índice é uma ferramenta útil para a previsão de ocorrência de incêndios em todo o mundo, uma vez que se baseia em fatores regionais dependentes da vegetação e clima.

ABSTRACT

BRUMATTI, Dayane Valentina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012. **Evaluation Of The Impact Of Global Warming On Fire Risk in Africa.** Adviser: Flávio Barbosa Justino.

Based on regional climate model simulations conducted with RegCM3 and NCEP Reanalyses, the impact of anomalous climate forcing on environmental vulnerability to wildfire occurrence in Africa is analyzed by applying the Potential Fire Index (PFI). Three distinct vegetation distributions were analyzed for a present day simulation (1980-2000) and for the end of the twenty-first century (2080-2100). It was demonstrated that under current conditions the PFI is able to detect the principal fire risk areas which are concentrated in the Sahelian region from December to March, and in subtropical Africa from July to October. Predicted future changes in vegetation lead to substantial modifications in magnitude of the PFI, particularly for the subtropical region of Africa. The reliability of the PFI for reproducing areas with high fire activity indicates that this index is a useful tool for forecasting fire occurrence worldwide, because it is based on regionally dependent vegetation and climate factors.

1. INTRODUÇÃO

O uso do fogo tem sido parte do sistema Terra desde 7000 a. C.. Resultado disso é o uso constante do mesmo para a expansão agrícola, onde anualmente grandes extensões terrestres são submetidas a processos de degradação ambiental e de mudança de uso da terra (ANDREAE, 1991).

Tal prática afeta a sustentabilidade dos ecossistemas (NEARY, 1999), pois diminuem a quantidade total de nutrientes no solo através de uma combinação de oxidação, volatilização, transporte de cinzas, lixiviação e erosão (RAISON, 1985). Isto causa o empobrecimento da terra, uma vez que elimina os microorganismos essenciais para fertilizá-la.

Após os incêndios, a atividade biológica do solo requer mais do que 20 anos para recuperação completa (PRODON ET AL., 1987). Além disso, o fogo pode modificar inóculos micorrízicos no solo (TORRES & HONRUBIA 1997, TARTAGLINI 1992), que pode limitar a regeneração de plantas.

Ao serem destruídos árvores, arbustos e outros tipos de vegetação, o solo se torna desprotegido. Uma condição de menor cobertura possui menor capacidade para reter água (SARAIVA et al., 1981). Conseqüentemente estas áreas são mais suscetíveis à erosão hídrica e eólica, bem como à lixiviação de nutrientes.

As queimadas modificam o balanço de energia na superfície, o balanço radiativo da atmosfera, o ciclo hidrológico e liberam para a atmosfera grandes quantidades de aerossóis e gases traços (CO₂, CH₄) (ANDREAE ET AL., 2004).

Segundo Langmann et al. (2009) os incêndios de vegetação em escala global são a segunda maior fonte de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE's). Estes intensificam o aquecimento global, principal responsável pelas mudanças nos eventos climáticos nas diversas escalas espaço-temporal.

Além disso, alguns gases emitidos na queima (monóxido de carbono, hidrocarbonetos não-metanos, ácido nítrico, entre outros) são

quimicamente ativos e interagem com as concentrações de hidroxilas (OH) presentes na atmosfera, alterando a eficiência de oxidação e modificando a quantidade de ozônio troposférico (KAUFMAN et al., 1992; GALANTER et al., 2000).

Andreae et al (2004) argumentam que a maior incidência de aerossóis na atmosfera devido à presença de queimadas, é um fator desfavorável para a ocorrência de precipitação devido à influência dos mesmos na diminuição do tamanho da gotícula da nuvem. Gotas pequenas são conduzidas por correntes de ar ascendente para níveis superiores da atmosfera, o que ocasiona a escassez de chuvas e, na maior parte dos casos, favorecendo novas queimadas.

A queimada é um fator que contribui para a concentração de material particulado na atmosfera, e conforme já demonstrado em alguns estudos, existe uma correlação positiva entre os altos índices deste poluente e a incidência de doenças respiratórias (OSTRO, 1983; SEROA DA MOTTA & MENDES, 1995). As partículas finas, oriundas da queima da biomassa, apresentam um tempo de residência na atmosfera maior que as partículas grossas, podendo ser transportadas por grandes distâncias. Isto aumenta a sua capacidade de dispersão, e, conseqüentemente, o seu impacto sobre os indivíduos (SANTOS et al. 2011).

Há que se ressaltar que, quando uma área perde suas particularidades, devido ao fogo, e deixa de ser agricultável, perde-se terreno para a produção de alimentos. Nesse sentido a África é a região mais preocupante em termos de consequência das queimadas. Num continente onde, segundo a FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2008), mais de 200 milhões de pessoas sofrem com a fome crônica, as conseqüências do fogo tomam maiores dimensões.

A África é conhecida como o "Continente do Fogo" devido à ocorrência regular e generalizada de incêndios florestais (KOMAREK 1965). Está sujeita a maioria dos incêndios detectados globalmente (50% de todos detectados) ocorrendo principalmente em regiões de savana (DWYER et al., 2000) (Figura 1). A África tem a mais extensa área de savana tropical do

mundo, caracterizado por um bosque verdejante que se torna extremamente inflamável durante a estação seca. Um relatório recente realizado pela NASA - United States National Aeronautics and Space Administration, indicou que cerca de 130 milhões de hectares de savanas e pastos queimam anualmente na África ao sul do equador (para comparação, o país da África do Sul cobre uma área de 122 milhões de hectares). A maior queima está concentrada na faixa subtropical úmida que inclui Angola, sul do Congo, Zâmbia, norte de Moçambique e sul da República Unida da Tanzânia. Durante a época de incêndios de 2000, a área queimada ao sul do equador podem ter alcançado mais de 200 milhões de hectares (FAO, 2001).

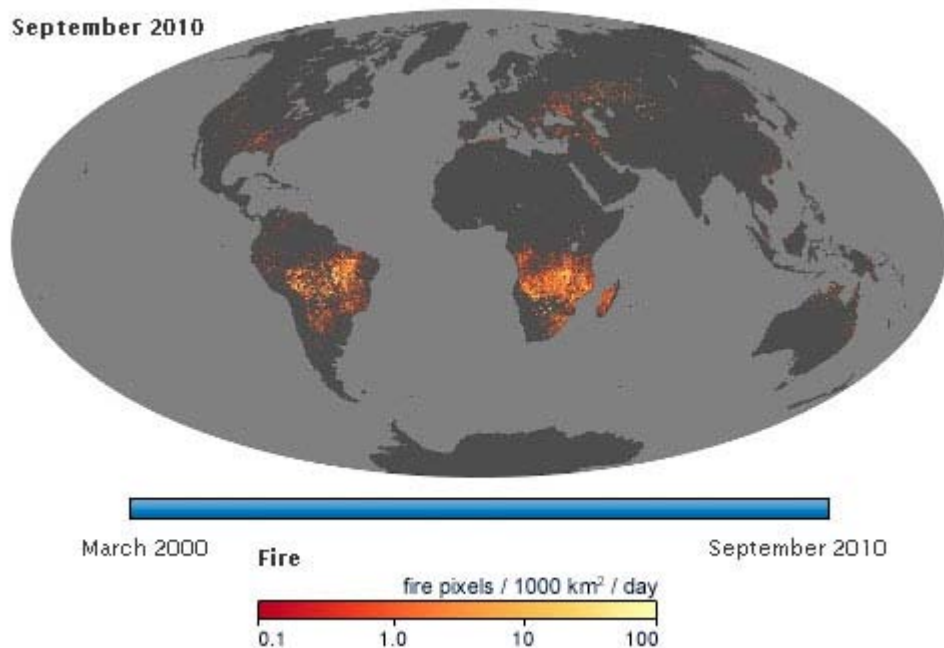


Figura 1. Localização das queimadas mundial com base mensal. Nesta imagem, destacam-se os incêndios em setembro de 2010. Fonte: NASA (2012).

Segundo a FAO (2001), na Etiópia, o atraso no início da estação chuvosa e a crescente pressão para o uso da terra resultou em uma temporada de incêndios no início de 2000. Houve grandes incêndios florestais, particularmente no sul montanhoso e, apesar do governo ter pedido ajuda internacional e uma coalizão de países (Alemanha, África do Sul, Canadá e Estados Unidos) terem respondido, até o final da estação seca em abril de 2000, mais de 100.000 ha de florestas de montanha foram

gravemente atingidas ou destruídas. A FAO (2001) ainda destaca que em Marrocos, o número de incêndios anuais aumentou de 150 para 200, e a área queimada anual aumentou de 2000 a 3.100 ha, desde a década de 1970 até 2001.

Como discutido por Goldammer (1993), a África é um continente que é altamente propenso a raios e tempestades, segunda maior fonte de focos de incêndio. A ocorrência de incêndios é determinada por fatores os quais iniciam a reação de combustão e permitem a sua continuação, dependendo da energia potencial do material combustível (GOUVEIA et al., 2010; LYNCH et al., 2007) e condições meteorológicas. A região com a maior atividade de relâmpagos do mundo está localizada sobre a República Democrática do Congo, na África Central (Figura 2). Esta área tem trovoadas durante todo o

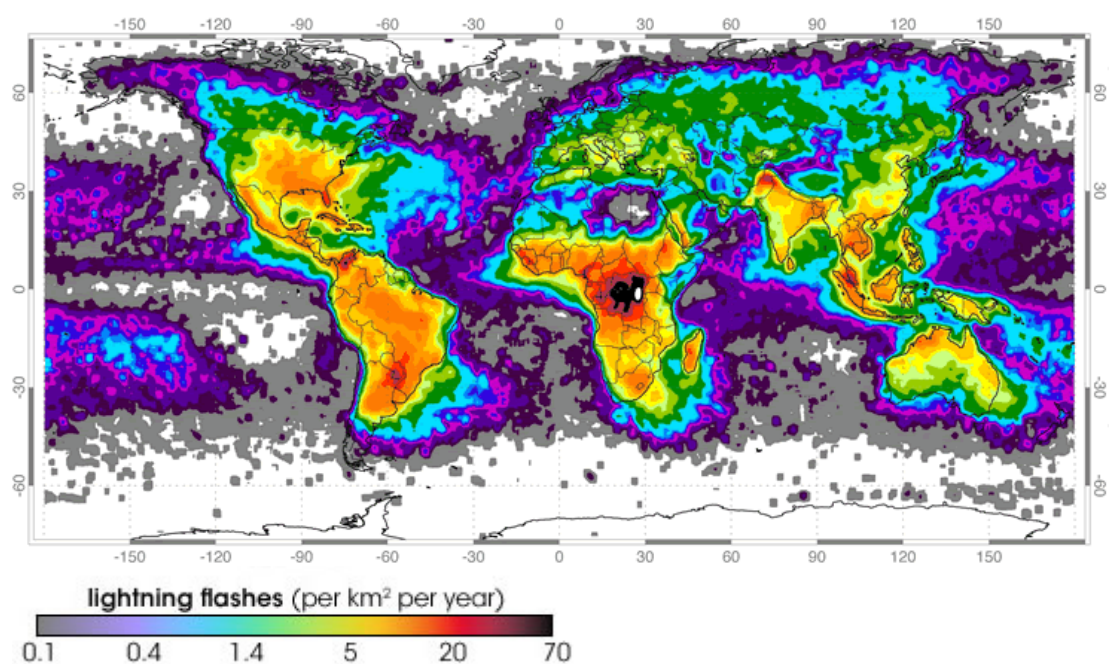


Figura 2. Distribuição global de relâmpagos por quilômetro quadrado por ano, de abril de 1995 à fevereiro de 2003, a partir da combinação das observações dos satélites NASA OTD e LIS. Fonte: NASA.

ano, como resultado das massas de ar carregadas de umidade vindas do Oceano Atlântico de encontro com as montanhas.

Incêndios florestais também acontecem devido às ondas de calor, secas e mudanças no padrão climático associado à fenômenos tais como *El Niño* (PHILANDER, 2001). Os efeitos do *El Niño* antecipam as queimadas

agrícolas, provocando uma ampliação do período tradicional, aumentando a ocorrência de focos de queimada e incêndios florestais ao longo do ano (MÉLO, 2009).

Mudanças induzidas na distribuição dos biomas também podem alterar a suscetibilidade atmosférica para a ocorrência de fogo (JUSTINO et al., 2010). Hoffmann et al. (2002) argumentam que a savanização aumenta temperaturas e velocidades do vento, enquanto reduz precipitação e umidade relativa. Esta é uma situação que muito provavelmente pode ocorrer no futuro devido ao aumento dos fatores antrópicos podendo aumentar substancialmente a frequência do fogo.

Estudos sobre o impacto do fogo em florestas tornam-se cada vez mais importantes à medida que os efeitos provocados pelos incêndios passam a ter repercussões globais negativas, particularmente devido sua influência na composição atmosférica e no estoque de biodiversidade (WHITMORE, 1990; COCHRANE, 2003).

Um passo importante para a redução das queimadas é a investigação da suscetibilidade que um determinado ambiente possui para a queima ou mesmo para o alastramento do fogo (risco de fogo). Isto já é feito em alguns países do Hemisfério Norte com destaque para os Estados Unidos e Canadá. Para a América do Sul e o Caribe, a equipe do Projeto Queimadas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisa (INPE), desenvolveu uma metodologia que relaciona as condições atmosféricas (temperatura, umidade e precipitação) e a cobertura vegetal, em um índice que quantifica a aptidão que uma região apresenta para o desenvolvimento do fogo (CPTEC - Risco de Fogo (RF)), (SISMANOGLU et al, 2002).

Embora existam estudos em desenvolvimento para o presente, não existem registros na literatura de investigações similares que tenham focado em análises de risco de fogo sob outras condições climáticas, como por exemplo, aquecimento global. A aplicação dos riscos de fogo para épocas futuras, e sua comparação com as condições atuais, são úteis para avaliar as regiões mais propícias ao fogo em um cenário de aquecimento global.

Dados de modelagem numéricas e observacionais demonstram que nos últimos 200 anos a temperatura média da Terra tem aumentado (HOUGHTON et al, 2001). Embora este aquecimento possa favorecer um alastramento maior das queimadas, ainda não é claro que regiões serão mais suscetíveis às queimas, já que outras variáveis meteorológicas também devem ser levadas em consideração.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é investigar a suscetibilidade do ambiente a ocorrência de queimadas na África com base em um Índice de Potencial de Fogo (PFI) e avaliar o impacto para as condições climáticas atuais e futuras.

2. DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA

2.1. Dados utilizados

O clima africano é afetado por processos climáticos regionais e globais (GIANNINI et al., 2008; NICHOLSON & SELATO, 2000; COOK, 1997) que envolvem a interação entre as temperaturas da superfície do mar (TSM) (REASON & ROUAULT, 2005; COOK, 2001), vegetação/cobertura do solo e umidade do solo (HELD et al., 2005). Para avaliar o risco de incêndio na África, dados climáticos e projeções futuras fornecidos por modelos climáticos regionais de ESEMBLES foram utilizados (<http://sites.google.com/site/rt3validation/86> (MARIOTTI et al., 2011)).

Os modelos climáticos são uma das principais ferramentas que ajudam na compreensão de processos que governam o sistema climático (PAL et al., 2007). A terceira versão do Regional Climate Model (RegCM3), é a terceira geração de uma estrutura de modelagem originalmente descrita por Giorgi & Bates (1989) desenvolvido pelo *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP), na Itália.

O RegCM3 é um modelo compressível, hidrostático e em coordenadas verticais *sigma*, disponível à comunidade para utilização na plataforma *Linux*. Esse modelo possui uma extensa gama de parâmetros

que podem ser modificados conforme o objetivo de cada simulação. Todos os cálculos envolvidos na modelagem estão implementados em linguagem *Fortran*© (FORMula TRANslator) (PEDROSO, 2012).

Em Mariotti et al. (2011) o RegCM3 é integrado por uma simulação de cenários contínuos transitórios por um período de 120 anos (1980-2100). Condições iniciais e de contorno do RegCM3 e TSM necessárias para executar o modelo foram obtidas a partir de uma simulação com o Modelo de Circulação Geral Atmosférica (MCGA), ECHAM5/MPI-OM, desenvolvido no Instituto Max-Planck de Meteorologia (MPIM) de Hamburgo na Alemanha. Os dois componentes do modelo, ECHAM5 para a atmosfera, e MPI-OM para o oceano, estão bem documentados em Jungclaus et al. (2006). Sua versão acoplada foi utilizada para os cenários climáticos do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (ROECKNER et al., 2003), com resolução espacial de aproximadamente 180 x 180 Km.

A fim de investigar o impacto da inclusão das condições de aquecimento associado ao efeito estufa na suscetibilidade do fogo na África, três avaliações foram realizadas: a primeira baseia-se no clima atual (1980-2000) como previsto pelo RegCM3 e vegetação simulada para o período pré-industrial realizada por ALO e WANG (2008) (Figuras 3 A, B, C). A segunda análise utiliza resultados da simulação futura do clima pelo RegCM3 e a distribuição da vegetação futura (Figuras 3 D, E, F). A terceira foi realizada para condições climáticas do futuro (2080 a 2100) e ignorou as mudanças na vegetação, utilizando a distribuição atual do bioma. Ressalta-se que este intervalo mais longínquo foi escolhido devido à necessidade de se investigar o risco de queimadas em condições extremamente diferentes das condições atuais.

Estes padrões de vegetação resultam de condições climáticas diferentes a partir de três modelos globais - CCSM (Community Climate System Model), HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) e ECHAM - aplicados no CLM-DGVM (Community Land Model's Dynamic Global Vegetation Model) (LEVIS et al., 2004). O CLM-DGVM simula a estrutura e a distribuição da vegetação natural e suas alterações transitórias. O modelo é composto por um componente de superfície CLM 3.0, um

módulo de fenologia, e os módulos dinâmicos da vegetação e biogeoquímica, com base no LPJ-DGVM (Lund-Postdam-Jena-Dynamic Global Vegetation Model) (SITCH et al., 2003). Processos biogeofísicos e biogeoquímicos são simulados em um espaço de tempo de 20 min, enquanto a fenologia da planta é avaliada diariamente. Estrutura e distribuição da vegetação são atualizadas anualmente com base no conhecimento dos processos integrados para passos mais curtos.

Pertencente a cada um dos três modelos empregados, CCSM, HadCM3 e ECHAM, a vegetação de controle foi simulada com o CLM-DGVM para o período pré-industrial, onde considerou-se a concentração de CO₂ de 275 ppmv (partes por milhão em volume) (Figuras 3A, B, C). A vegetação futura foi simulada com o modelo de vegetação baseado nos dados climáticos médios de 2100 obtidos para o período 2071-2100 a partir do cenário A1B (Figuras 3D, E, F). Este cenário tem uma concentração de gases de efeito estufa (GEE) descrita pelo RECE A1B (Relatório Especial sobre Cenário de Emissões A1B) (NAKICENOVIC & SWART, 2000), o qual projeta um estado futuro de emissão de CO₂ de 775 ppmv para o final do século XXI. Em todas as simulações de vegetação, o CLM-DGVM foi iniciado considerando o solo descoberto e rodado por 200 anos, a fim de atingir o equilíbrio de vegetação com a forçante do clima especificada (isto é, com relação ao Índice de Área Foliar (IAF) e cobertura vegetal). Uma descrição detalhada do CLM-DGVM e simulações da vegetação é dada em Alo & Wang (2008).

Como as análises presentes se baseiam em dados climáticos fornecidos pelo modelo RegCM3, os experimentos são diferenciados apenas pela distribuição da vegetação. Por exemplo, o CCSM prevê no futuro grande aumento na precipitação, em uma porção substancial da África e HadCM prevê maior estiagem. O ECHAM, por outro lado, está entre os valores de precipitação intermediário (ALO & WANG, 2008). Assim, o uso destes três modelos permite que o presente estudo capture uma gama de respostas do índice para potencial futuro climático, induzidos por mudanças na vegetação. Portanto, os resultados do presente estudo foram referidos como CCSM, HadCM3 e ECHAM.

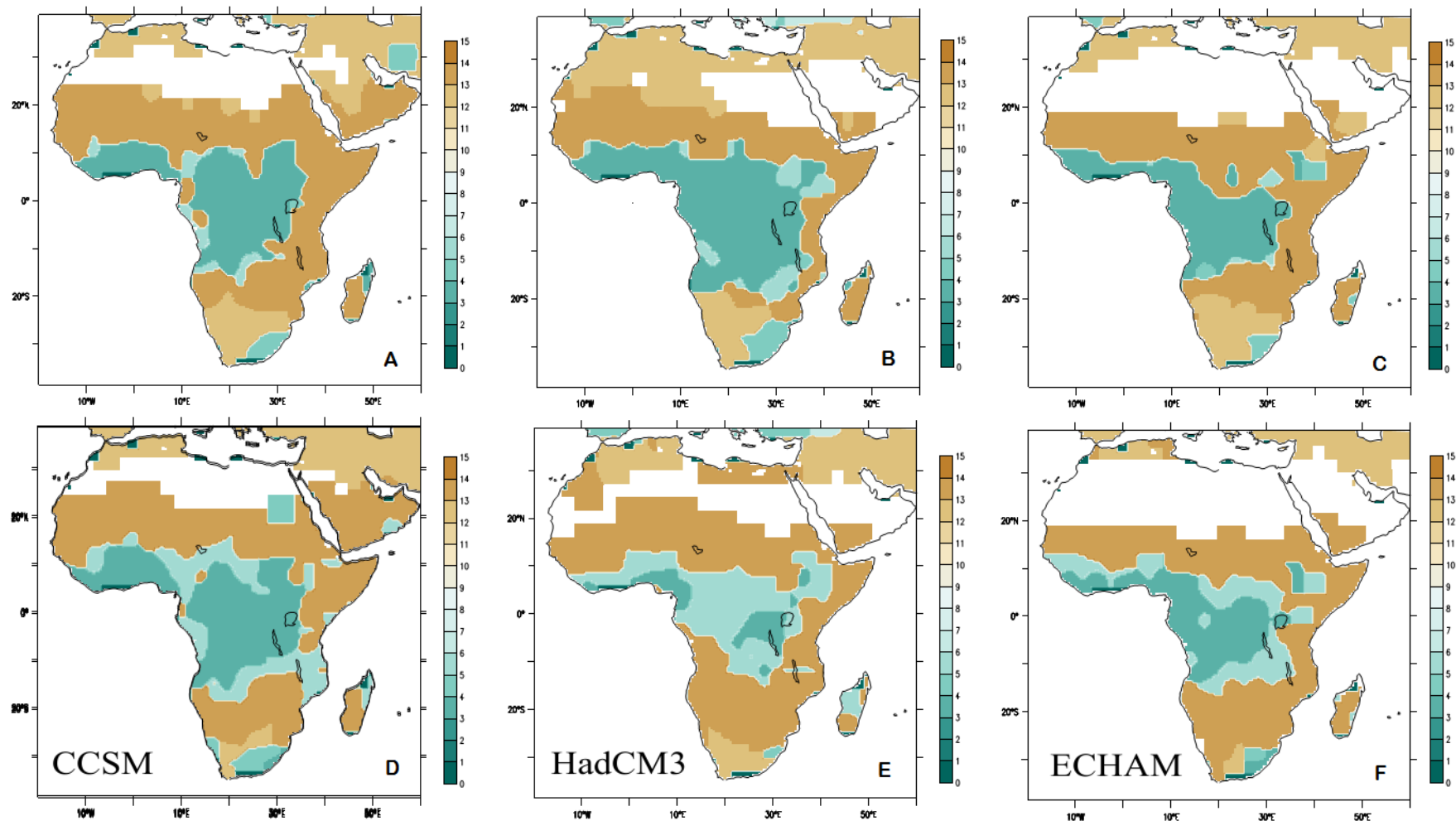


Figura 3. Distribuição da vegetação simulada por CLM-DGVM impulsionado pela forçante do clima por CCSM (esquerda), HadCM3 (meio) e ECHAM (direita) para condições pré- industriais (A, B, C) e para condições de aquecimento global (D, E, F). Fonte: Alo and Wang (2008).

2.2. Índice Potencial de Fogo (PFI - Potential Fire Index)

2.2.1. Formulação do PFI

A metodologia do PFI é baseada na evidência empírica temporal e espacial da ocorrência de centenas de milhares de queimadas no Brasil (BROWN et al., 2006) durante os últimos 20 anos. Embora a grande maioria desses incêndios sejam de origem antrópica e distribuídos por quase todo o país, eles estão relacionados com o ciclo climático anual.

Esse índice se baseia no princípio de que a vegetação aumenta o risco de incêndio com a duração dos períodos de seca. O tipo e o ciclo natural de desfolhamento da vegetação, temperatura máxima e umidade relativa mínima do ar também estão incluídos, a fim de calcular o PFI. A referência dos cálculos está nos "Dias de Seca" ou "Secura", que é um número hipotético de dias sem precipitação anteriores a 120 dias.

Mélo (2009) utilizou esse índice para calcular o risco de fogo no Brasil. Este trabalho diferencia-se do realizado por Mélo por utilizar modelo regional de clima e se basear em 15 classes de vegetação sugeridas por RAMANKUTTY & FOLEY (1998) (Tabela 1).

Tabela 1. Os tipos de vegetação e respectivos valores de "A" (que variam em função da flamabilidade da vegetação) utilizados para definir o risco básico (BR).
 Fonte: RAMANKUTTY & FOLEY (1998).

Classe	Tipo de Vegetação	"A"
1	Floresta Ombrófila Densa	1.5
2	Floresta Decídua Tropical	6
3	Floresta Ombrófila Temperada de Folhas Largas	1.5
4	Floresta Ombrófila Temperada de Folhas Estreitas	2
5	Floresta Decídua Temperada	5
6	Floresta Ombrófila Boreal	2
7	Floresta Decídua Boreal	2
8	Floresta Mista	3
9	Savana	3
10	Pradaria/Estepe	6
11	Arbusto Denso	3
12	Arbusto Aberto	2.4
13	Tundra	3
14	Deserto	0
15	Gelo e Neve	0

2.2.2. Sequência do cálculo do PFI

Seguindo a metodologia de Setzer et al. (2002) estão demonstrados a seguir as etapas de cálculo do risco.

- Estima-se diariamente para uma determinada área geográfica, o valor da precipitação, em milímetros (mm), acumulada nos onze períodos imediatamente anteriores de 1, 2, 3, 4, 5, 6-10, 11-15, 16-30, 31-60, 61-90 e 91-120 dias. Isso é chamado de Fatores de Precipitação. Os Fatores de Precipitação (FP) alcançam valores entre 0 e 1 para cada um dos onze períodos com uma função exponencial empírica da precipitação em milímetros (JUSTINO et al., 2010). As equações são respectivamente:

$$\begin{aligned}FP_1 &= \exp(-0,14 \times prec_1); & FP_{6-10} &= \exp(-0,01 \times prec_{6-10}); \\FP_2 &= \exp(-0,07 \times prec_2); & FP_{11-15} &= \exp(-0,008 \times prec_{11-15}); \\FP_3 &= \exp(-0,04 \times prec_3); & FP_{16-30} &= \exp(-0,004 \times prec_{16-30}); \\FP_4 &= \exp(-0,03 \times prec_4); & FP_{31-60} &= \exp(-0,002 \times prec_{31-60}); \\FP_5 &= \exp(-0,02 \times prec_5); & FP_{61-90} &= \exp(-0,001 \times prec_{61-90}); \\ & & FP_{91-120} &= \exp(-0,0007 \times prec_{91-120});\end{aligned}$$

- Calcula os Dias de Seca (DD - *Dry Day*), de acordo com a equação:

$$DD = 105 \times FP_1 \times FP_2 \times \dots \times FP_{91-120} \quad (1)$$

- Determina o Risco de Fogo Básico (RB) para cada um dos cinco tipos de vegetação considerados, utilizando a equação:

$$RB_{n-i} = 0,9[1 + \sin(A_i \times DD)]/2 \quad (\text{Erro!})$$

Indicador não definido.)

Os valores de "A" variam em função da flamabilidade da vegetação. O A_i representa os tipos de vegetação, onde i pode variar entre 1 e 15

(Tabela 1). Por exemplo as florestas perenes e folhosas densas atingem valores de "A" de 1.5, savanas 3 e pastagens 6, vez que são mais suscetíveis ao fogo. Água e solo nu recebem valores 0. Valores baixos de "A" indicam que a vegetação necessita de um longo período sem precipitação para alcançar o Risco de Fogo Básico (RB) máximo.

Com base no Gráfico 1 pode ser demonstrado que 30 dias consecutivos sem precipitação resulta em um máximo RB (considerado aqui 0,9) para pastagem, mas não indica risco de incêndio significativo considerando florestas ombrófilas de folhas largas.

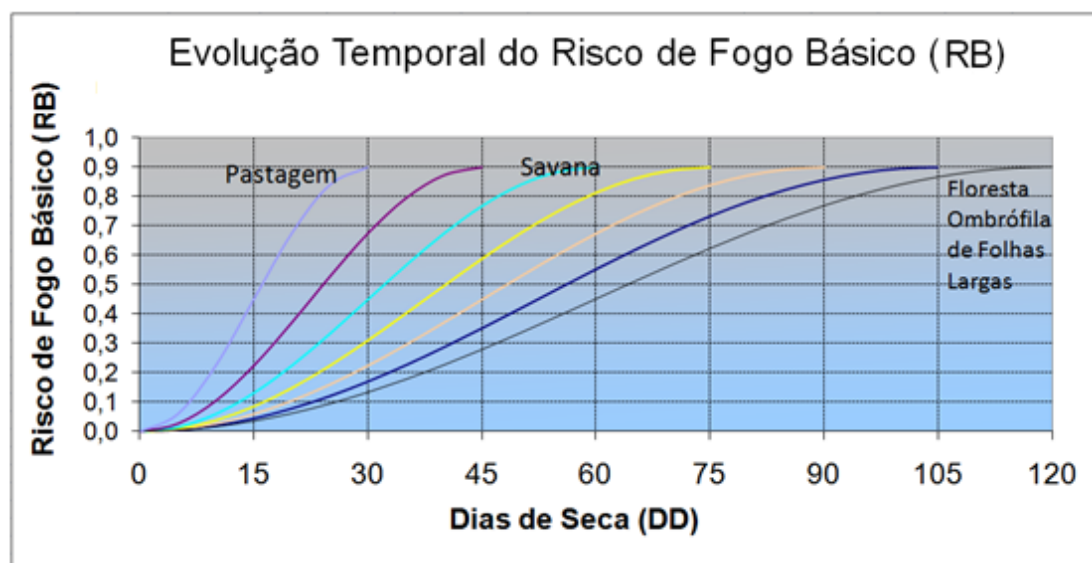


Gráfico 1. Evolução Temporal do Risco de Fogo Básico (RB)

Outros fatores também são considerados para o cálculo do risco de incêndio final (PFI).

- Em primeiro lugar, o RB é corrigido com base na umidade relativa mínima do ar (UR_{\min}). O risco (RU) aumenta quando a umidade é inferior a 40% e diminui para valores maiores de 40%. Dados de umidade a partir de observações durante a 18h GMT são utilizados, em busca do valor mínimo. A equação de ajuste linear é:

$$RU = RB(-0,006 \times RH_{\min} + 1,3) \quad (\text{Erro!})$$

Indicador não definido.)

- Em segundo lugar, o risco de fogo é corrigido com base na temperatura máxima do ar ($T_{m\acute{a}x}$). O risco (RT) aumenta para temperaturas superiores a 30°C e diminui para temperaturas inferiores a 30°C. Os dados de temperatura a partir de observações durante as 18h GMT são utilizados, em busca do valor máximo. A equação de ajuste linear é:

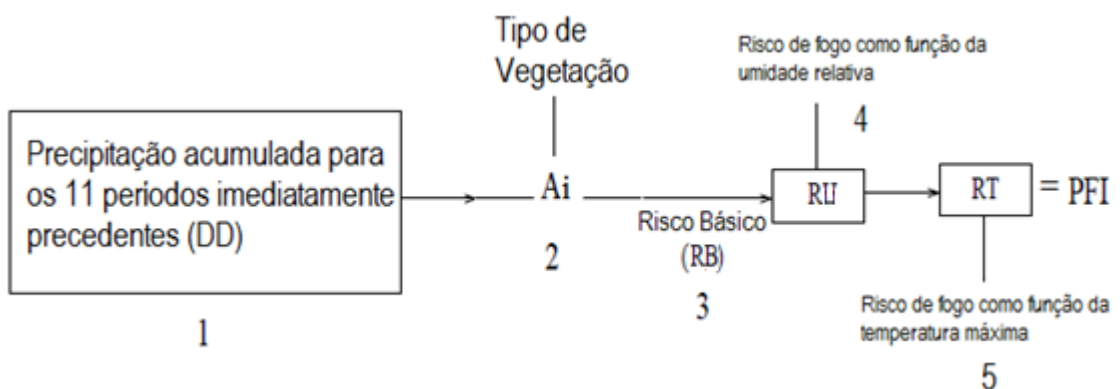
$$RT = RU(0,02 \times T_{m\acute{a}x} + 0,4) \quad (\text{Erro! Indicador não definido.})$$

O RT é o PFI propriamente dito, onde alcança valores entre 0 e 1, nas seguintes categorias:

Tabela 2. Classes de Risco de Fogo.

Nível de Risco	PFI (0 a 1)
mínimo	0 - 0,15
baixo	0,15 - 0,40
médio	0,40 - 0,70
alto	0,70 - 0,90
crítico	> 0,90

O fluxograma abaixo ilustra as etapas para o cálculo do índice potencial de fogo.



Fluxograma 1. Sequência, representada pelos números, do cálculo do PFI.

Deve notar-se que o PFI é calculado na base diária, mas os resultados aqui apresentados são mostrados com base na média mensal. O PFI tem sido amplamente utilizado na América do Sul e Cuba para avaliar a suscetibilidade atmosférica para o desenvolvimento do fogo. Sismanoglu et al. (2011) e Sismanoglu & Setzer (2005) demonstraram que de 290 mil fogos no continente em 2003, 94% ocorreram em áreas de risco alto e crítico (PFI). Entre as limitações do PFI destacam-se a ausência de relações entre a densidade humana, o desmatamento e a dinâmica de cobertura do solo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o maior número de queimadas na África ocorre nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF) na região equatorial/Sahel (10-20°N) e nos meses de Agosto, Setembro e Outubro (ASO) na região subtropical do Hemisfério Sul (Davies et al., 2004; Giglio et al., 2003), os resultados aqui mostrados estão restritos a estes meses.

A seguir, são apresentadas as análises para os dias atuais e para as condições futuras, de aquecimento global. A evolução mensal do PFI, bem como os seus componentes são mostrados.

3.1. Análise dos Dias Atuais (DA)

A Figura 4A mostra a temperatura do ar máxima média diária a 2 m da superfície do solo de dezembro a fevereiro para a simulação para os dias atuais (1980-2000). Temperaturas mais elevadas são encontradas ao longo do cinturão equatorial e na África subtropical, com valores chegando a 37°C. Os valores mais baixos são predominantes no norte da África.

Como esperado, a análise para umidade relativa demonstrou que as áreas com temperaturas elevadas, como na África subtropical, também são dominadas por baixa umidade relativa (Figura 4B). Estas condições podem intuitivamente favorecer a intensificação do fogo.

No entanto, as condições climáticas de acordo com os Dias de Seca (DD) lançam alguma luz sobre o papel da precipitação. Por exemplo, a região equatorial (5°N-15°N) apresenta valores altos de DD ou longos períodos sem chuva, enquanto a região subtropical é dominada por pequenos valores de DD, o que indica freqüente precipitação (Figura 4C).

A combinação destes três fatores (Tmax, RH e DD) associados com o padrão de vegetação permite a simulação do Potencial de Risco de Fogo. Como mostrado nas Figuras 4D, E, F a alta suscetibilidade atmosférica para fogo, ou alto PFI, situa-se entre 10°N e 20°N, principalmente na África Ocidental, região de alta temperatura e baixa UR. O impacto do DD no PFI é

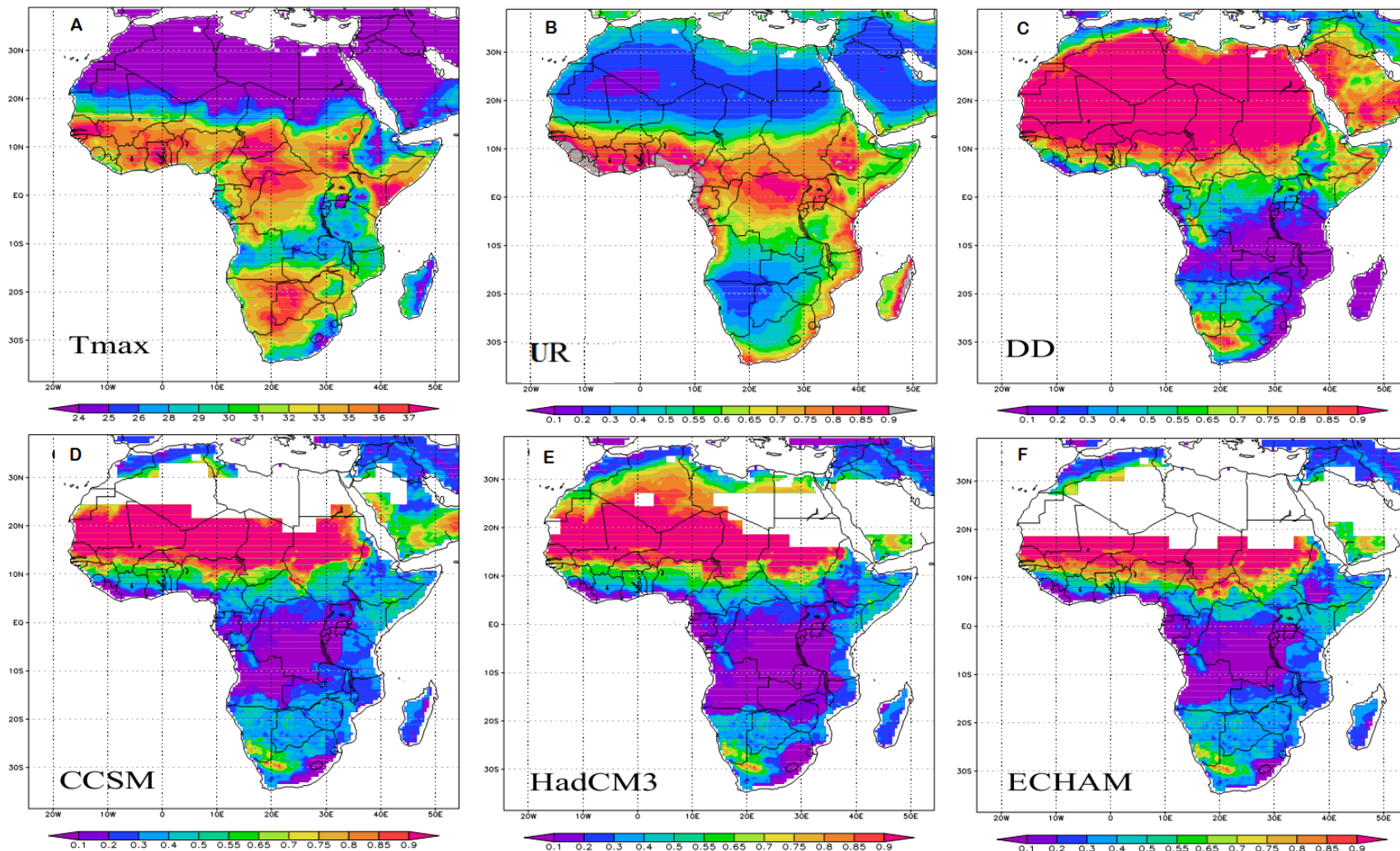


Figura 4. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para DJF. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM.

destacado pela diminuição do risco de incêndio entre latitude 0-20°S. Apesar de altas temperaturas e umidade relativa moderada, esta região não mostra PFI alto devido aos baixos valores de DD que indica precipitação frequente associada à ZCIT - Zona de Convergência Intertropical¹. Soma-se à isso o padrão de vegetação dominante na região, que são florestas ombrófilas ou semi-perenes.

É interessante notar que o padrão de vegetação mostrado por CCSM, HadCM3 e ECHAM diferem sobre a extensão do deserto do Saara, mas mostram biomas semelhantes na África Central. LPJ-DGVM forçado por CCSM e ECHAM simulam as florestas tropicais africanas mais confinadas em comparação com a simulação com a forçante HadCM3 (Figura 3A, B, C).

Como o PFI baseia-se em dados do modelo RegCM3, é importante identificar possíveis tendências/viés no modelo para os dias atuais, de Tmax, UR e DD e, conseqüentemente, para o PFI. Isto é feito através da comparação entre os dados modelados e as reanálises diárias do NCEP, para o período de 1980-2000 (NNR) (KALNAY et al., 1996). Comparando as Figuras 4A-F com a Figura 5A-F, nota-se que ambos os conjuntos de dados, apresentam muitas semelhanças, principalmente na região do Sahel e na África Austral. No entanto, sobre a porção central da África, 10°N e 10°S, o NNR é mais frio, mais úmido e não mostra secas frequentes (Figura 5A, B, C).

¹ 1: ZCIT - Zona de Convergência Intertropical - é uma zona de convergência em baixos níveis (divergência em altos níveis) na região de fronteira entre os hemisférios Norte e Sul. Assemelha-se a um cinturão com atividades convectivas, de 3 a 5 graus de largura, onde espalham-se Cbs. Estas nuvens agrupam-se em formações denominadas "aglomerados" (cloud clusters), que caracterizam-se pelo transporte de calor, massa e "momentum" da superfície para a alta troposfera e, daí exportados para as latitudes médias. A ZCIT tem o deslocamento para o Norte durante os meses de junho a setembro (inverno no HS) e mais para o sul, aproximando-se da linha equatorial, nos meses de dezembro a fevereiro (verão no HS).

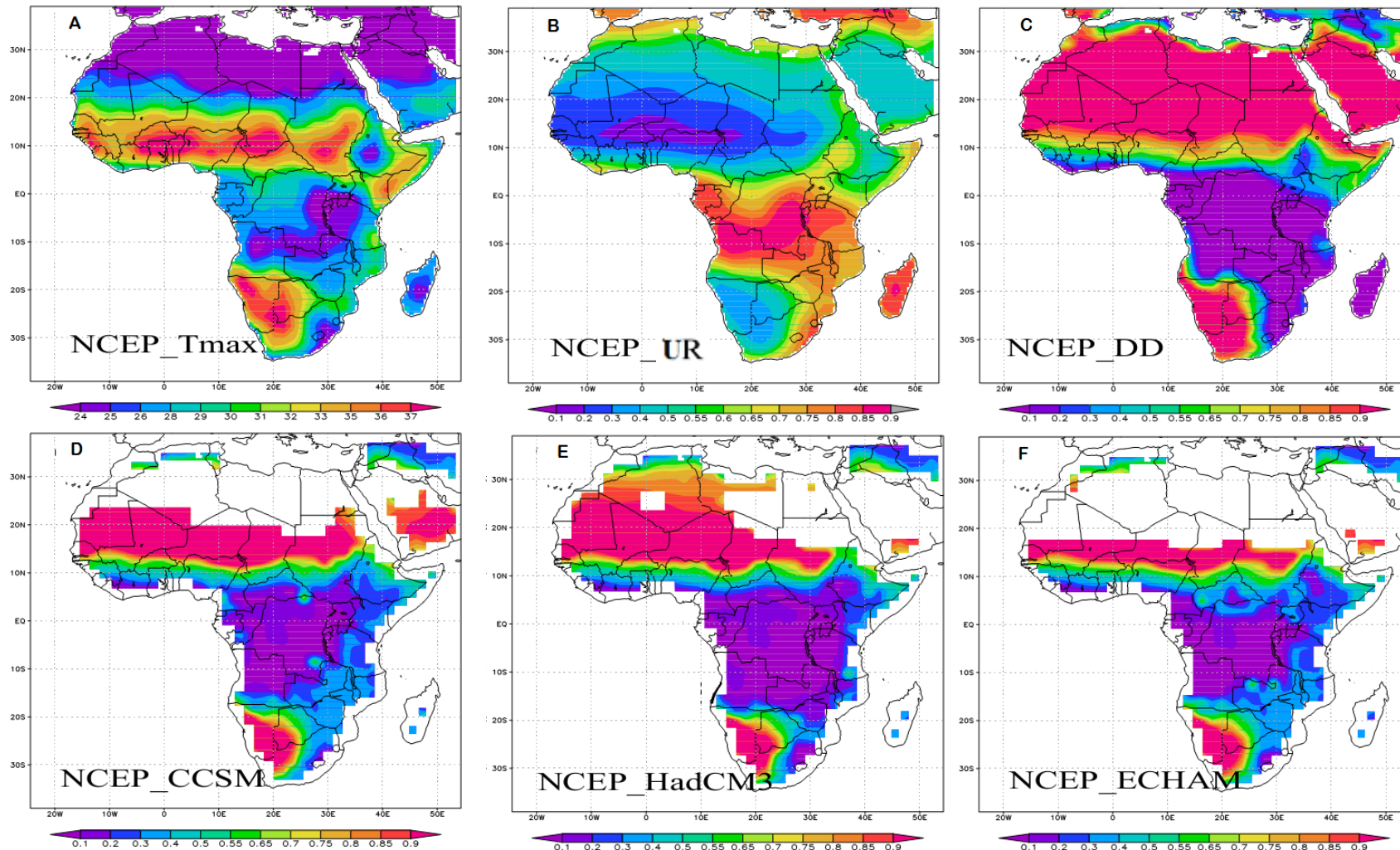


Figura 5. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para DJF. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM, para NNR.

Em relação à avaliação do PFI, apesar de em geral apresentar valores bem semelhantes, os conjuntos de dados diferem na parte sul da África. O NNR mostra maior risco de incêndio em contraste com um PFI moderado obtido a partir dos dados do RegCM3. Isso está ligado ao NNR exibir valores mais baixos de RH e mais elevados de DD, o que indica períodos mais longos sem precipitação.

Incêndios na vegetação seguem variações climáticas sazonais (Marlon et al., 2008; Markgraf et al., 2007; Whitlock et al., 2006). Durante ASO valores de temperaturas máximas são observadas na região Saariana, acompanhada por baixa umidade relativa. Contrariamente às características do clima em DJF, em ASO observam-se temperaturas moderadas e umidade relativa elevada ao longo da zona equatorial. A influência da ZCIT é observada pelo valor extremamente baixo de DD que se estende de 10°N para 5°S (Figura 6A, B, C).

Em ASO, o aumento no risco de fogo está de acordo com o início da estação seca devido ao deslocamento para o norte da ZCIT durante esse período. Durante ASO, o maior PFI ocorre no centro da África Austral, que inclui Angola, Zâmbia, Zimbabwe, Botswana e Namíbia. Isto devido à maiores temperaturas, baixa umidade relativa e dias de seca atingindo valores críticos. Valores mais baixos são encontrados na África Central (Figuras 14, 15 e 16).

Alto PFI em partes do continente africano está associado com o domínio de floresta estacional decidual e savana. De acordo com a formulação do PFI estes biomas estão associados com o aumento da suscetibilidade à atividade do fogo, devido à vulnerabilidade à seca, induzindo propriedades combustíveis.

Em comparação com as variáveis climáticas e PFI fornecidos pelo NNR (Figura 7A-F), nota-se, como observado para DJF, considerável semelhança para Tmax, UR e DD sobre grande parte da África. Contudo, no sul da África, os valores críticos do PFI nas reanálises se estendem por uma área maior que no RegCM3 (Figuras 6D-F e 7D-F).

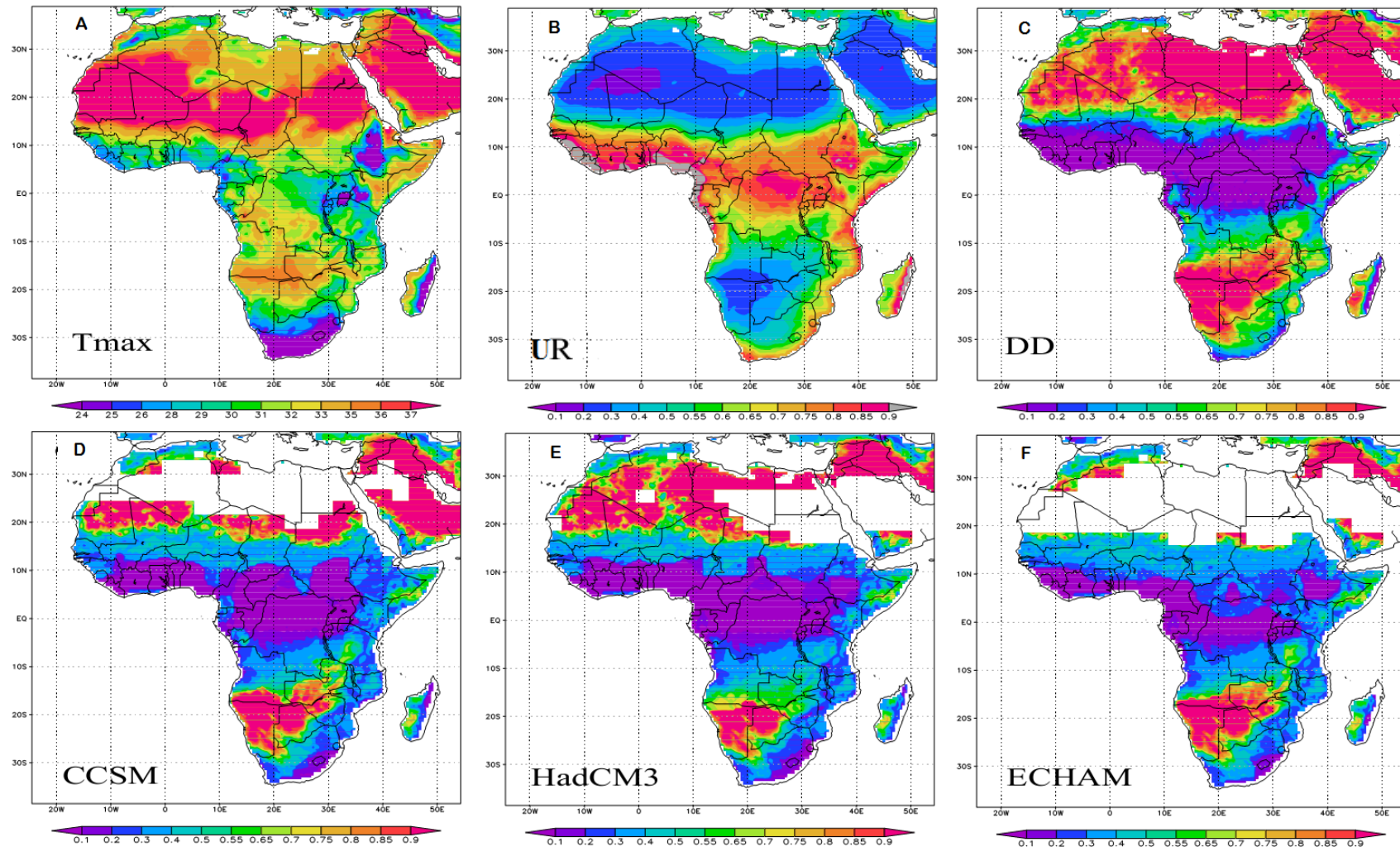


Figura 6. Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). Cálculo da média para os dias atuais para ASO. D, E e F representam o potencial de fogo (PFI) com base na vegetação forçada, respectivamente por CCSM, HadCM3 e ECHAM.

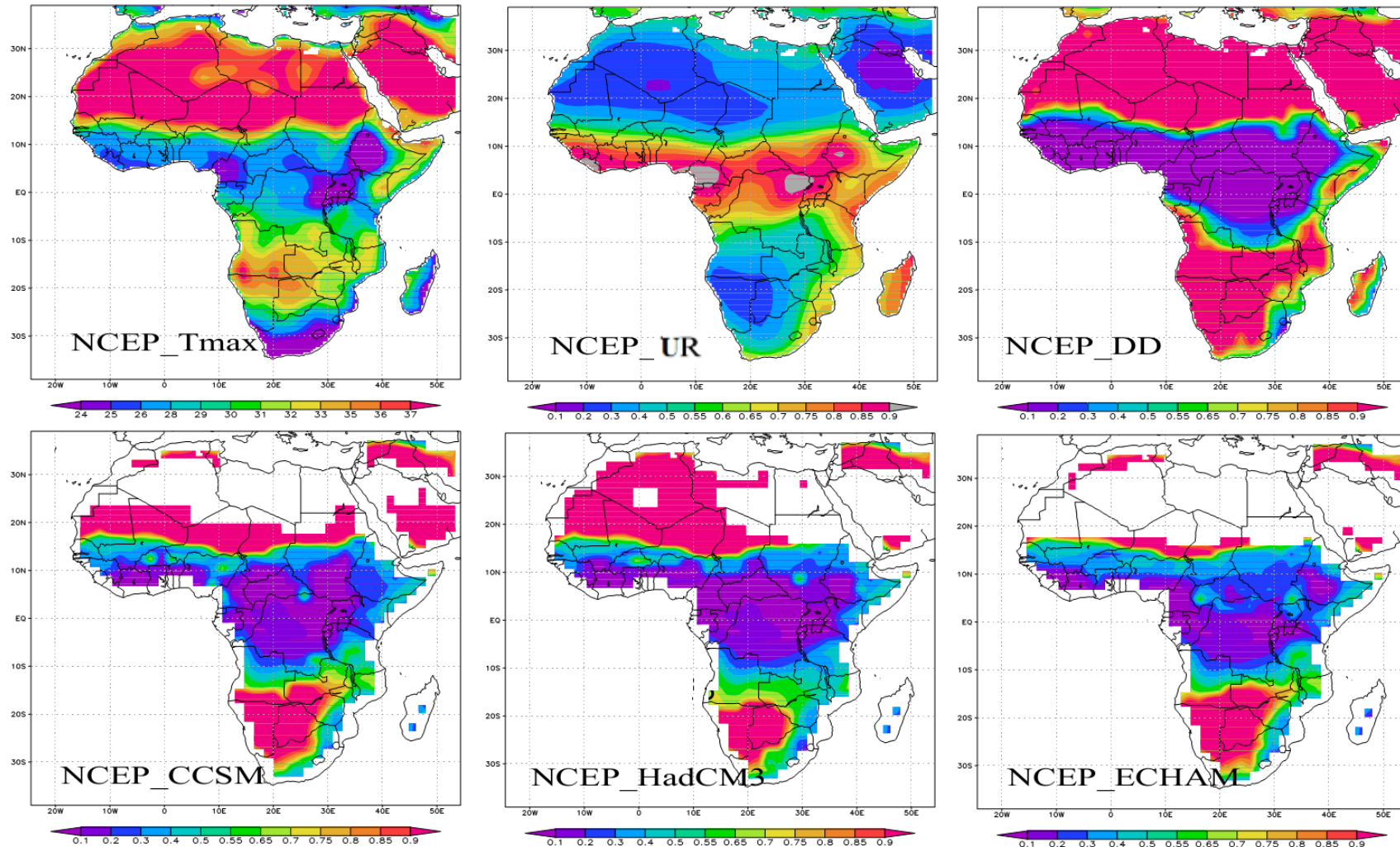


Figura 7. Cálculo da média para os dias atuais para ASO de temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e número de dias de seca (C). D, E e F representam o PFI com base na vegetação forçada para NNR.

Em comparação com exercícios anteriores de modelagem baseados em modelos com maior complexidade (por exemplo SCHEITER & HIGGINS, 2009; KLOSTER et al., 2010), nota-se que o PFI é capaz de reproduzir áreas dominadas pela atividade freqüente do fogo. De acordo com Scheiter & Higgins (2009), a atividade de fogo moderado é mostrado na África Central, enquanto que a maior incidência está localizada no Sahel e África do Sul, semelhante aos resultados propostos no presente estudo.

A fim de validar o PFI, a Figura 8 mostra dados de satélite baseado em pontos quentes/fogo do World Fire Atlas. Estes dados formam uma série de tempo longa e única da localização global do fogo (<http://dup.esrin.esa.int/ionia/wfa/index.asp>) e podem ser comparados com dados de satélites obtidos do MODIS (DAVIES et al., 2004; GIGLIO et al., 2003) (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/>).

Isto pode ser usado para representar a atividade do fogo durante DJF e ASO, pois o fogo é detectado quando a temperatura de brilho é maior que 308K. A Figura 8 inclui toda a atividade do fogo durante DJF e ASO detectado em 2004 e 2008. O ano de 2004 foi caracterizado por um fraco El Niño e 2008 experimentou uma recuperação a partir das condições de La Niña, que pode favorecer incêndios de vegetação induzidos pelas condições climáticas.

Deve notar-se que não há nenhuma modificação interanual substancial na área de incidência de fogo, uma vez que a distribuição de savanas, arbustos e campos devem estar suficientemente secos para inflamar (Figura 8). Como este estudo visa identificar as áreas com risco de incêndio, a comparação do PFI com pontos quentes é uma suposição razoável. A estreita correspondência entre o maior PFI (0,7-0,9) e os incêndios detectados é notável. Ressalta-se, contudo, que o PFI apresentado é nivelado utilizando-se a média sazonal, em contraste com o mostrado para os incêndios que se acumulam em uma base diária.

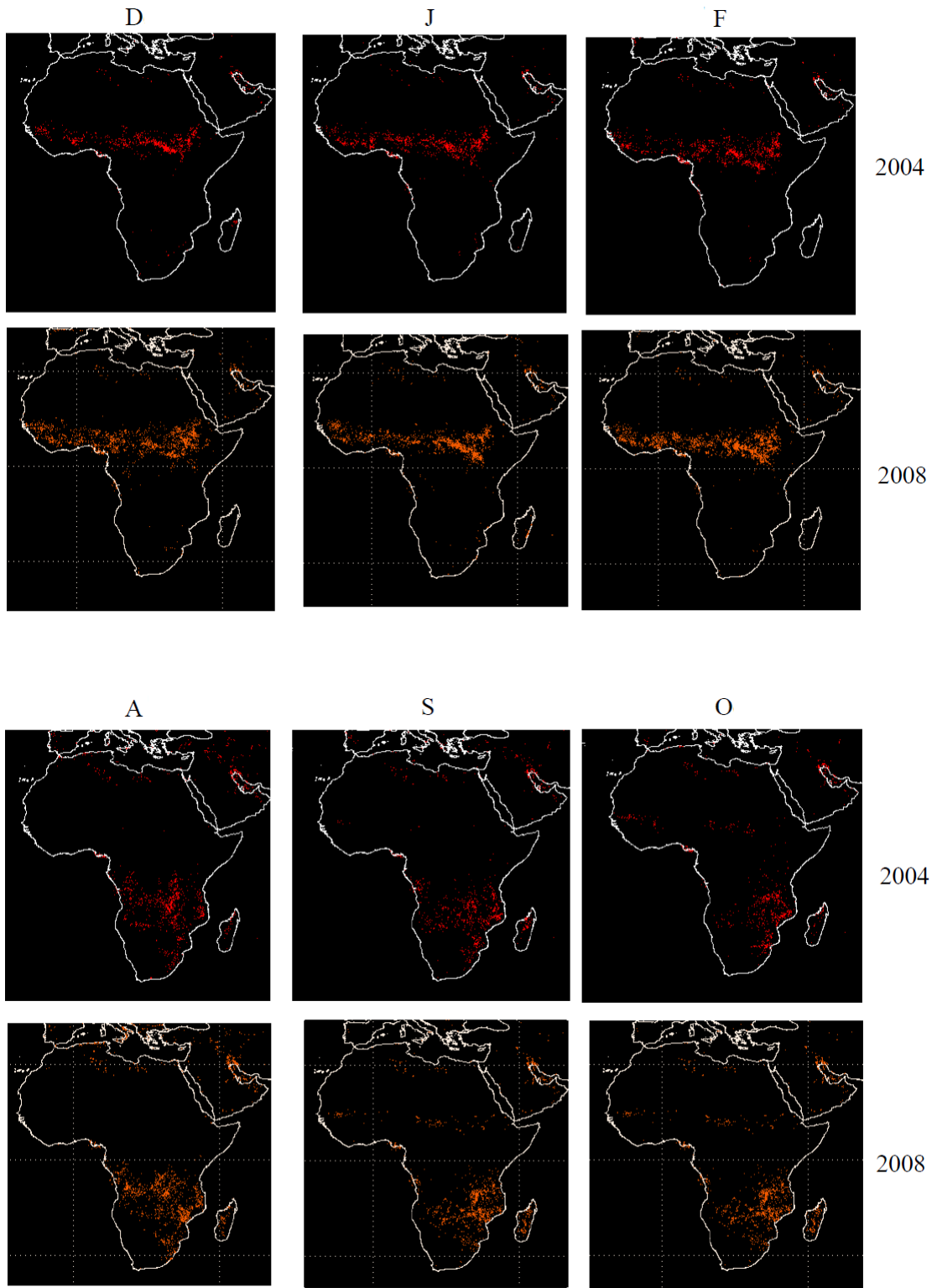


Figura 8. Pontos quentes detectados por satélite com temperatura de brilho maior do que 308K nos anos de 2004 e 2008, durante dezembro-janeiro-fevereiro e agosto-setembro-outubro.
 Fonte: <http://dup.esrin.esa.int/ionia/wfa/index.asp>

Os incêndios florestais baseados em satélite revelam o elevado número de incêndios na região do Sahel, que são mais recorrentes em DJF, e na região subtropical da África, que ocorrem principalmente durante ASO. Incêndios que ocorrem na costa leste não são inteiramente suportados pelo índice uma vez que os países que se encontram nessa região mostram PFI baixo, exceto em Madagascar, onde o PFI é médio. Por outro lado, incêndios identificados na África do Sul estão em áreas dominadas por alto PFI, em particular com base nos resultados NNR. A alta concordância entre o índice de fogo e os focos de calor baseados em satélite em Angola, Zâmbia, Zimbabwe e Namíbia deve ser destacado. Dois fatores podem estar associados com as diferenças entre o PFI e os incêndios detectados por satélite: (1) O PFI mostra dados suavizados, tomando a média sazonal ao passo que os incêndios ocorrerem diariamente. (2) Tendências no clima simulado para os dias atuais, como baixas temperaturas e maior precipitação também podem ter sido fonte para quaisquer sub-estimativas do PFI.

Deve ser enfatizado que fatores antrópicos contribuem para a discrepância entre o PFI e incêndios ativos observados. Por exemplo, em ASO na Namíbia (Figura 9) as condições climáticas (e PFI) aparecem propícias à queima de biomassa (Figura 6). No entanto, os incêndios ativos observados são bastante escassos (Figura 8). Isso pode estar associado às baixas cargas de combustível, que não é capaz de sustentar um fogo sob condições reais. Em segundo lugar, esta área é pouco povoada e assim menos afetada com queima antropogênica. Van der Werf et al. (2009) embora tenham encontrado relação entre a precipitação (extensão da seca) e os incêndios ativos observados sobre partes da África, sugerem que outros fatores (tais como gerenciamento da terra e quantidade de precipitação na estação chuvosa) podem desempenhar um papel importante. Deve notar-se que apesar destes inconvenientes, o PFI é capaz e adequado para reproduzir a área mais suscetível ao desenvolvimento de incêndio de vegetação em resposta ao clima.

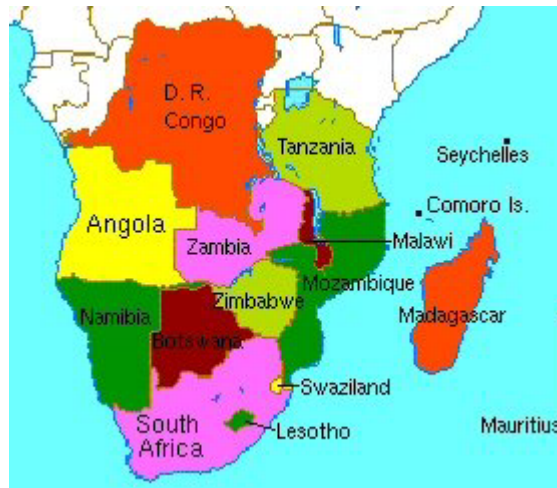


Figura 9. Localização dos países da África Austral.

O PFI estima a vulnerabilidade de ocorrência de incêndios naturais com base em fatores climáticos como uma indicação da suscetibilidade atmosférica ao fogo. É crucial avaliar o potencial para o desenvolvimento do fogo, a fim de evitar a ocorrência de incêndios florestais de grandes proporções que podem causar mudanças substanciais para a comunidade de plantas, habitats de animais e a saúde humana. Obteve-se sucesso aplicando a metodologia do PFI no Brasil para tomadas de decisões políticas e econômicas, a fim de reduzir os riscos.

3.2. Análise para Aquecimento Global (AG)

No que segue a resposta do PFI às mudanças no clima e na vegetação são avaliadas. Como discutido anteriormente, forçando o modelo de vegetação com saídas fornecidas pelos modelos ECHAM, HadCM3 e CCSM há a uma redução na floresta ombrófila e alargamento das regiões dominadas por savanas, para o final do século XXI. Alterações acentuadas ocorrem quando o modelo de vegetação é forçado com dados de entrada do HadCM3 (Figura 3E).

Estas modificações têm um papel importante na definição do nível de risco de fogo. A Figura 10 mostra as anomalias climáticas entre os experimentos para o aquecimento global e para os dias atuais para Tmax, Rhmín e DD médios para DJF. Anomalias positivas de Tmax de 5° são

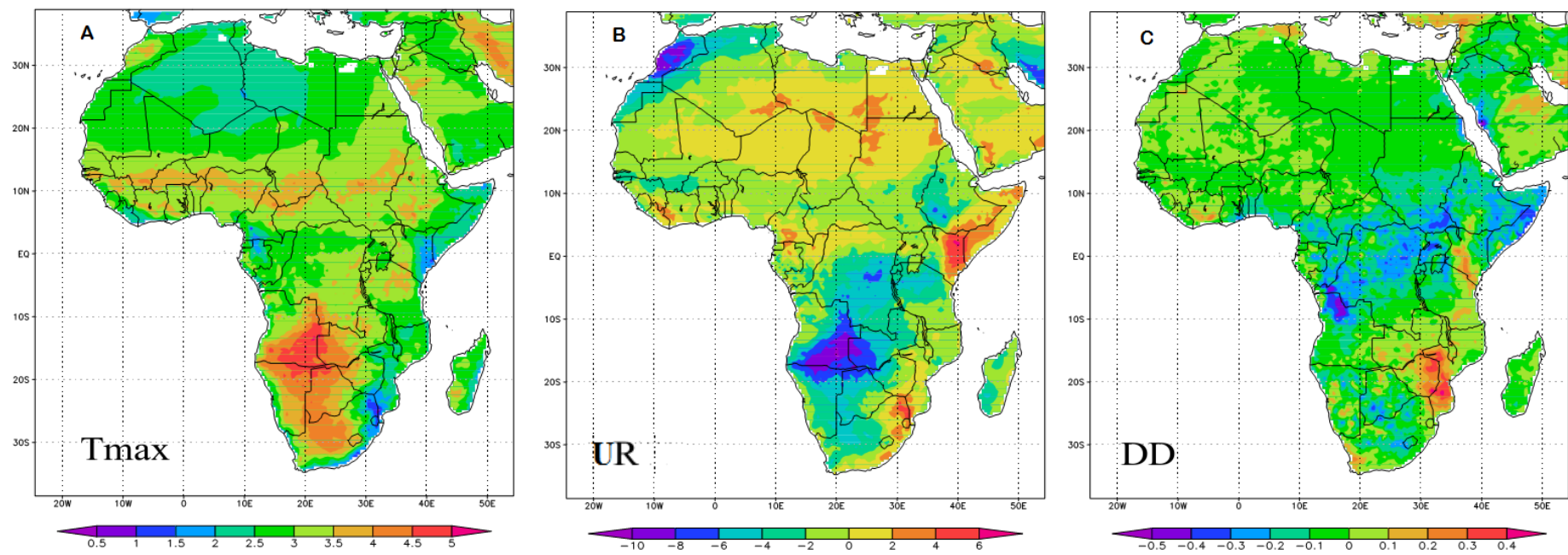


Figura 10. Anomalias do aquecimento global em comparação com os dias atuais, em DJF. Temperatura máxima (A,°C), umidade relativa (B,%) e dias de seca (C).

evidentes no sul da África e ao longo da latitude de 10°N. Esta região também apresenta menor umidade relativa do ar, em até 10%, quando comparado aos valores propostos pelos dias atuais.

É interessante observar que em termos dos períodos de dias secos não são previstas alterações notáveis, entre os dois períodos de estudo. Isto demonstra que no RegCM3 a frequência diária de precipitação não é tão diferente entre os dois regimes de clima. Estes resultados estão de acordo com investigações anteriores para o sul do continente africano (LYON, 2009; ROCHA et al., 2008; TADROSS et al., 2005). Pode ser notado, no entanto, que partes da África equatorial na simulação para o aquecimento global experimenta menor DD em comparação com a simulação para os dias atuais. Nesta região o número de dias secos já era bastante reduzido para o presente. Ressalta-se que na costa sul de Moçambique não há atualmente um número reduzido de dias secos, mas deverá aumentar substancialmente nos cenários futuros (Figura 10C).

A Figura 11 ilustra o risco de incêndio (PFI), em resposta às mudanças climáticas futuras. Ao longo de todo o continente africano o PFI aumenta como resultado do clima mais quente previsto para o final do século XXI.

Durante DJF a área dominante de alta suscetibilidade à atividade de incêndios é a região do Sahel, o que corrobora com a análise da simulação para os dias atuais (Figura 11). Na parte central da África apenas pequenas mudanças estão previstas para ocorrer, apesar de uma diminuição na área coberta por florestas ombrófilas (Figuras 3D, E e F). Esta característica é plausível, já que o DD desempenha um papel preponderante na definição do risco de incêndio e, como anteriormente mostrado, não experimenta grandes alterações entre os dois tempos (Figura 10C).

É interessante salientar que sob condições de aquecimento global, o PFI em DJF mostra uma região adicional com alta vulnerabilidade a incêndios localizada entre 10-30°S (Figura 11). Isto não foi identificado nas condições atuais (DA). Esta característica está intimamente ligada ao aumento de temperatura do ar e queda da umidade relativa em

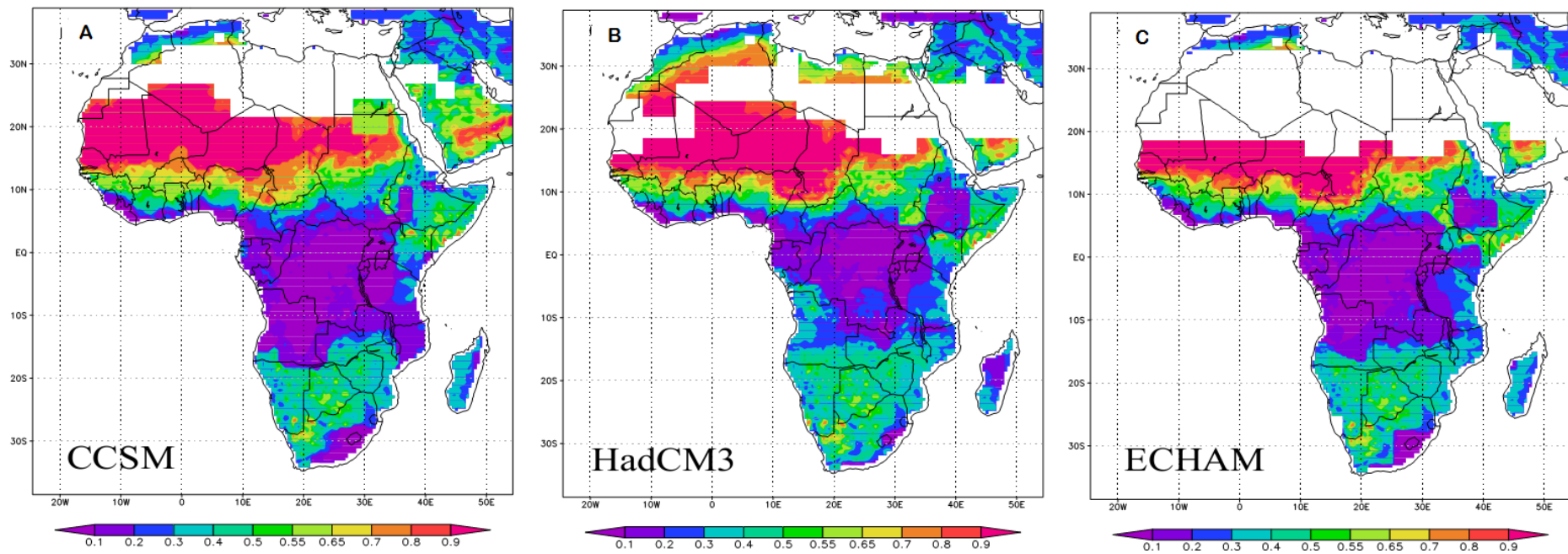


Figura 11. A, B e C mostram o PFI estimado a partir da simulação do efeito estufa com base na vegetação forçada pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para DJF.

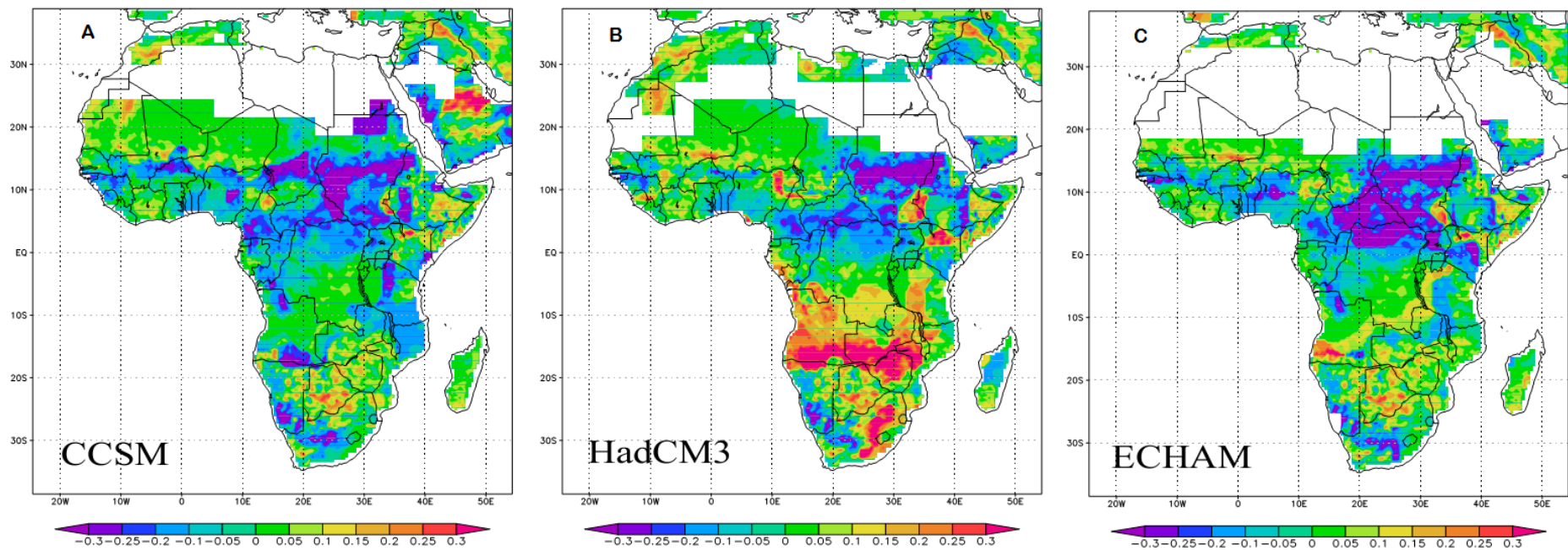


Figura 12. A, B e C mostram as anomalias do PFI em comparação com os dias atuais forçadas pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF).

comparação com os dias atuais (Figuras 10A e B). No entanto, o papel da vegetação destaca-se claramente quando se comparam as vegetações simuladas para o cenário futuro pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM (Figuras 3D, E e F) e seus correspondentes PFI mostrados pela diferença entre as simulações para Dias Atuais e para Aquecimento Global (Figura 12). Como a forçante HadCM3 simula mudanças mais rigorosas na vegetação (Figura 3E), a configuração do PFI resultante está também associada com valores maiores, em comparação com as anomalias fornecidas por ECHAM e CCSM. O efeito da mudança climática, no entanto, reduz o risco de incêndio em áreas que experimentam precipitação cada vez mais freqüentes, como na maioria da África equatorial (0-10°N). Como exemplo, é esperado para o Sudão, que exhibe número substancial de incêndios sob condições de Dias Atuais, uma diminuição no futuro.

Quanto à avaliação do PFI em ASO, sob condições do presente a região mais suscetível ao desenvolvimento do fogo é encontrada ao sul da África (Figuras 6D, E e F). Na simulação para o aquecimento global existe um alargamento da região, bem como alto risco de incêndio em regiões situadas entre 10-20°N e na ilha de Madagascar (Figura 14). Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Pechony e Shindell (2010) que tem demonstrado um aumento projetado das atividades de incêndio no Sahel, na África Oriental e na África do Sul e uma redução na África Central. Também é esperado um aumento do risco de incêndio na costa oeste do equador, no entorno da latitude 20°S. Isto é mais evidente a partir dos resultados propostos pelo HadCM3 (Figura 15B).

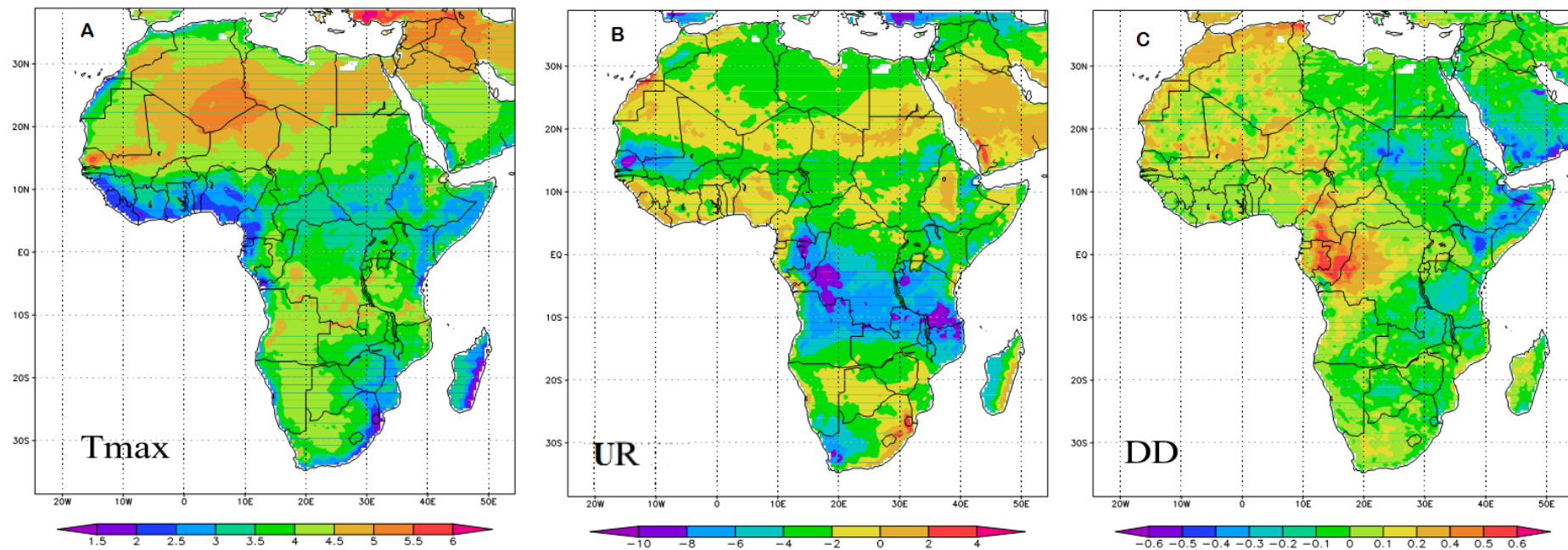


Figura 13. Anomalias do aquecimento global em comparação com os dias atuais, em Agosto, Setembro e Outubro (ASO). Temperatura máxima (A, °C), umidade relativa (B, %) e dias de seca (C).

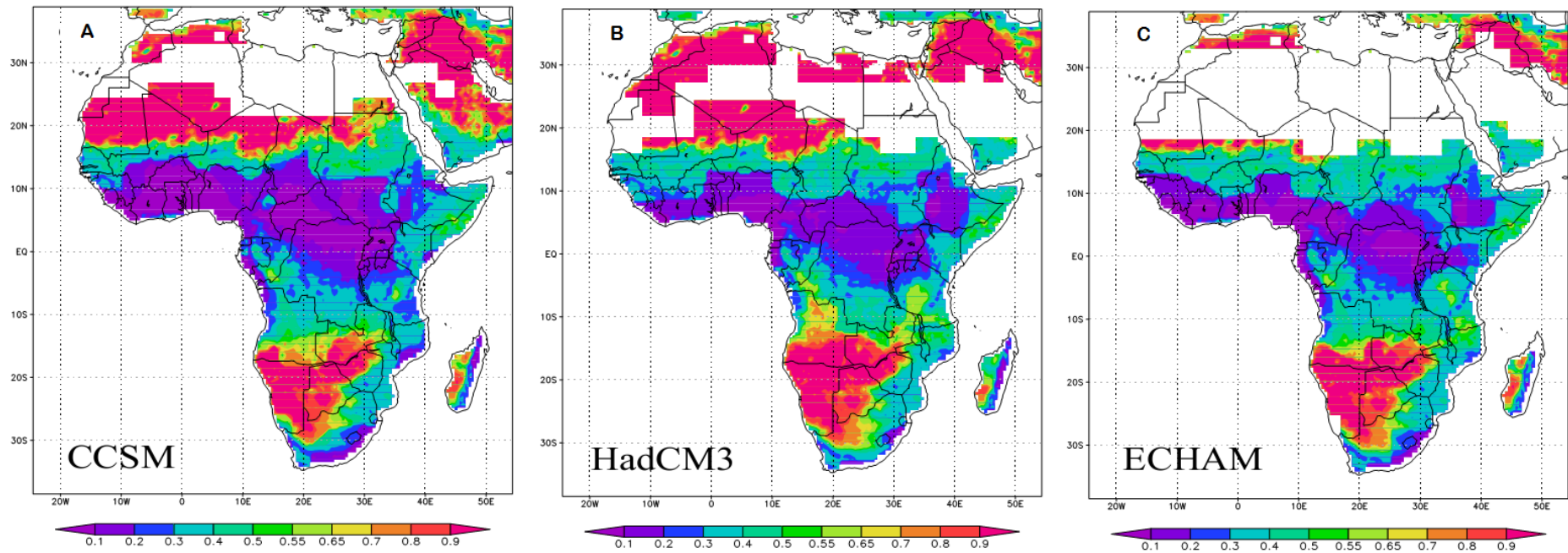


Figura 14. A, B e C mostram o PFI estimado a partir da simulação do efeito estufa com base na vegetação forçada pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Agosto, Setembro e Outubro (ASO).

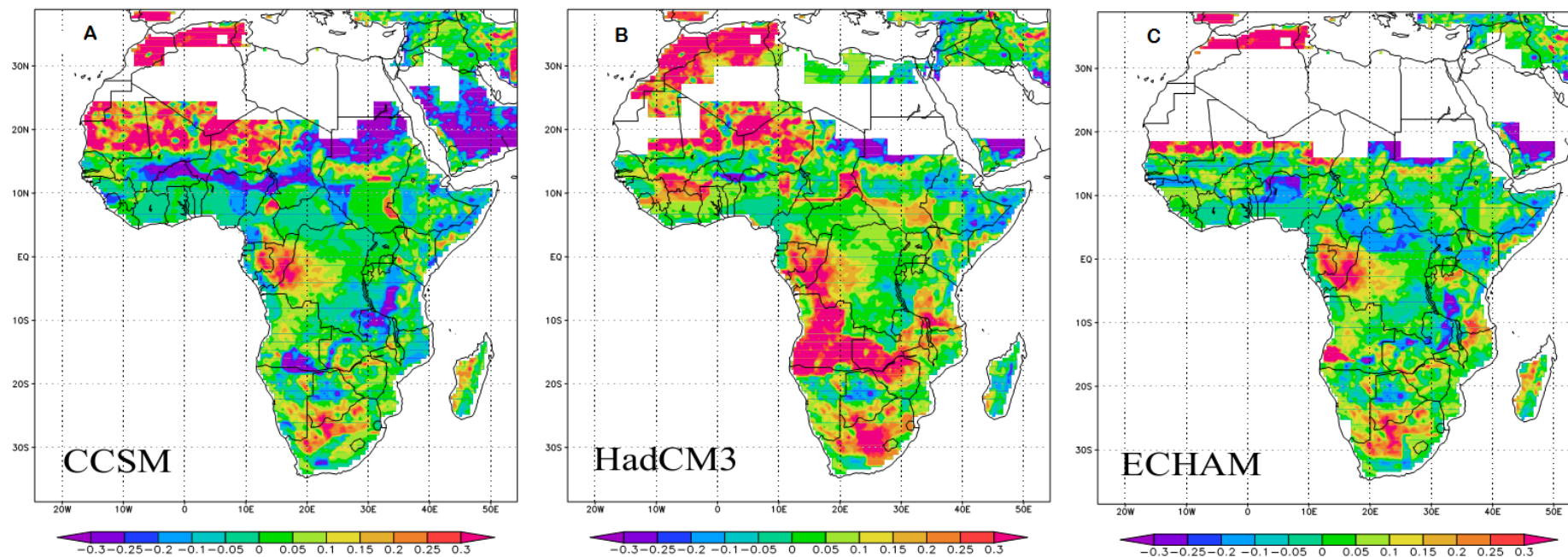


Figura 15. A, B e C mostram as anomalias do PFI em comparação com os dias atuais forçadas pelo CCSM, HadCM3 e ECHAM, para Agosto, Setembro e Outubro (ASO).

Para melhor avaliar o risco de incêndio na África, a Figura 16 mostra a média zonal do PFI calculado entre as latitudes 5°N-20°N, 10°S-5°N, 25°S-10°S e 40°S-25°S ao longo do ano. Isso ajuda na identificação de alterações na amplitude do ciclo sazonal sob ambos os regimes de clima e na determinação do mês individual com o risco mais elevado de incêndio.

A região entre 10°S-20°N mostra maiores valores do risco em Março e gradualmente atinge o seu mínimo risco de incêndio, em Novembro. Isso está intimamente ligado com a migração meridional da ZCIT e sua precipitação associada sobre a região. Entre estas bandas de latitude, há um aumento no risco de incêndio em 10 de 12 meses, quando as condições futuras do clima e da vegetação são aplicadas. A distribuição da vegetação, conforme prevista para ocorrer pelo HadCM3, leva aos maiores valores do PFI. Além disso, sob condições atuais, o menor valor do PFI é encontrado associado com o modelo HadCM3 (Figuras 16A, B).

Uma avaliação semelhante para a região entre 40°S-10°S (Figuras 16C, D) mostra que, em comparação com as condições atuais, o risco de incêndio no futuro aumenta substancialmente e é alto de Julho a Outubro, especialmente entre 25°S-10°S (Figura 16C). Sob condições de Dias Atuais o PFI é crítico apenas em Setembro.

Isto demonstra que um aumento na duração do período de incêndios na África Sub-saariana é muito provável no futuro. O mesmo também está previsto para a região amazônica (JUSTINO et al., 2010; HIROTA et al., 2010). Além disso, na África subtropical (Figura 16D) os aumentos no PFI foram de baixo, na simulação DA, a moderado, na simulação AG.

A investigação de risco de incêndio sob condições climáticas futuras, mas com vegetação atual (Figura não mostrada) não altera o PFI em comparação com a análise para o presente (Figuras 4D, E, F e 6D, E, F). Neste sentido, a inclusão somente de um clima quente e seco, como previsto para ocorrer no futuro, não altera substancialmente o risco de incêndio, porque o risco já se encontra no nível crítico em ambas situações Dias Atuais e Aquecimento Global. Isso revela o papel fundamental das

mudanças na vegetação para a determinação da suscetibilidade ambiental para a ocorrência do fogo.

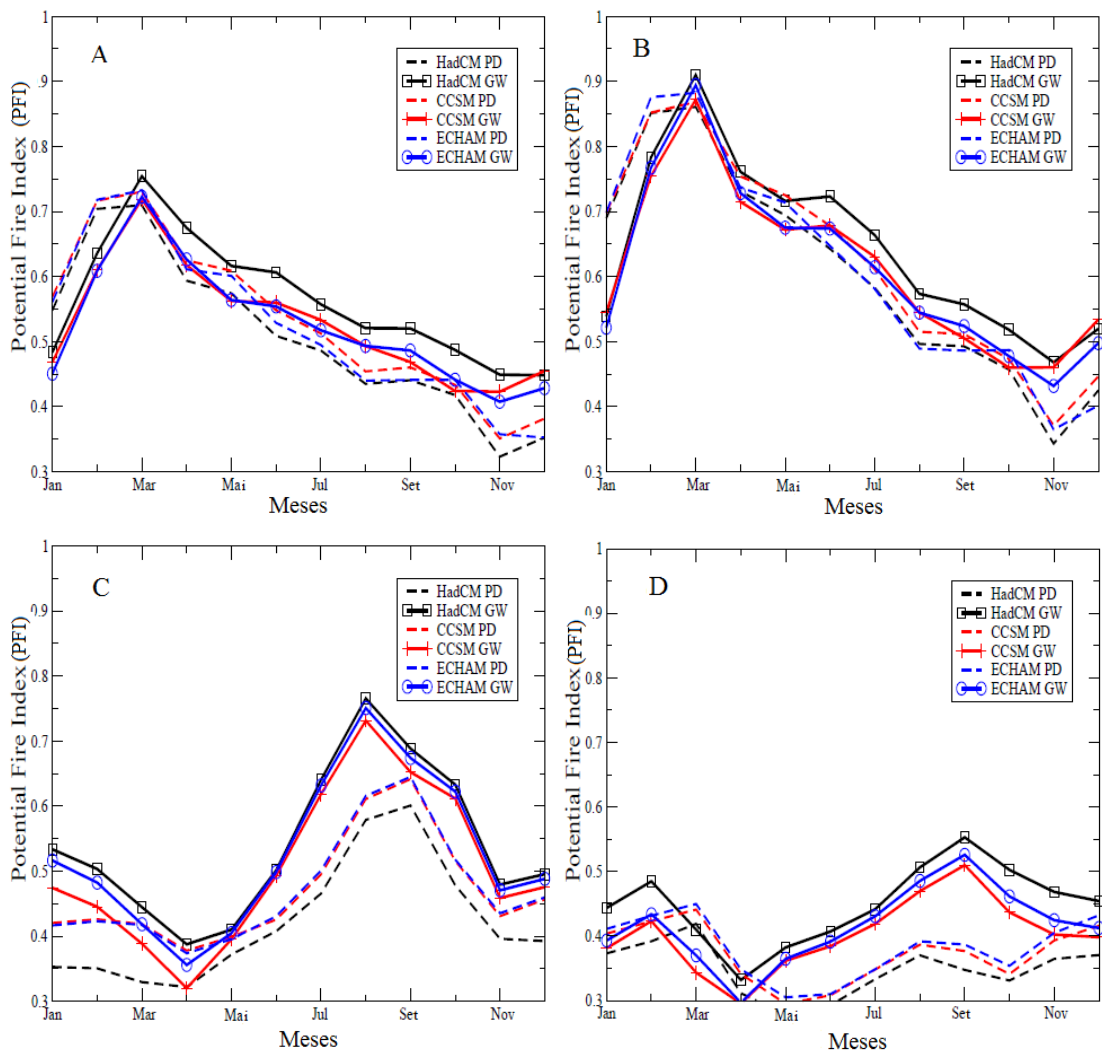


Figura 16. Média zonal mensal do PFI atual e futuro para (A) 5°N-20°N, (B) 10°S-5°N, (C) 25°S-10°S e (D) 40°S-25°S.

4. CONCLUSÕES

Apesar dos avanços na compreensão do clima e da sua ligação com as atividades de incêndio, os estudos que avaliaram a associação das variáveis climáticas com ocorrência de incêndio ainda são escassos, especialmente para cenários climáticos futuros. Com base no Índice de Potencial de Fogo calculado a partir de simulações climáticas regionais realizados pelo RegCM3, este estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas sobre a vegetação fogo-riscos na África sob condições atuais e futuros do aquecimento global.

Com base nos resultados foi demonstrado que o PFI é capaz de identificar as principais áreas de risco de incêndio que estão concentradas na região do Sahel, de dezembro a março, e na África subtropical, de julho a outubro. Através da aplicação de três cenários de vegetação diferentes para as condições atuais e aquelas propostas para um cenário de aquecimento global, verificou-se que o PFI futuro é extremamente sensível às condições impostas pela vegetação. Por exemplo, quando a floresta foi substituída por savana um maior risco de incêndio foi projetado. Isto é mais intensificado na situação demonstrada pelo HadCM3, que mostra uma previsão de maior savanização, em comparação com o CCSM e o ECHAM. Neste sentido, os cálculos do PFI indicam que de acordo com as condições atmosféricas anômalas previstas para o futuro, associadas com a distribuição de vegetação renunciada, a África será mais exposta a queimadas em grande escala.

A limitação da nossa abordagem de modelação pode ser notada uma vez que o PFI depende fortemente do número de dias secos e, assim, da precipitação. A previsão de precipitação é uma variável de muita controvérsia nas previsões climáticas futuras e nos dias atuais, e difere significativamente entre as previsões de diferentes modelos climáticos. Não é improvável que a utilização de um outro modelo de clima global como condição de contorno irá conduzir uma alteração diferente no risco de fogo sobre a África. Tendo em conta a gama de previsões climáticas futuras, os dados de RegCM3 utilizados neste estudo oferecem resultados muito

próximos, como previsto para ocorrer pelas reanálises do NCEP sob o clima atual.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALO, C. A.; WANG, G. Potential future changes of the terrestrial ecosystem based on climate projections by eight general circulation models, *Journal of Geophysical Research*, volume 113, 2008.

ANDREAE, M. O. Biomass Burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: Levine, J. S. (Ed.). *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, The MIT Press, Cambridge, MA, p. 2-21, 1991.

ANDREAE, M. O. et al. Smoking rain clouds over the Amazon, *Science*, volume 303, p. 1342-1345, 2004.

BROWN, I. F.; SCHROEDER, W.; W. SETZER, A.; MALDONADO, M. D. L. R.; PANTOJA, N.; DUARTE, A.; MARENGO J. Monitoring fires in southwestern Amazonia rain forests, *EOS transactions*, pp. 253–264, 2006.

COCHRANE, M.A.. Fire science for rainforests. *Nature*, volume 42: 913-919, 2003.

COOK, K. H. Large-Scale Atmospheric Dynamics and Sahelian Precipitation. *J. Climate*, volume 10, 1137–1152, 1997.

COOK, K. H. A Southern Hemisphere Wave Response to ENSO with Implications for Southern Africa Precipitation. *J. Climate*, volume 58, 2146–2162, 2001.

DAVIES, D.; KUMAR, S.; DESCLOITRES, J. Global fire monitoring using MODIS near-real-time satellite data, *GIM International*, volume 18 , 41–43, 2004.

DWYER, E.; PINNOCK, S.; GREGOIRE, J.-M; Pereira, J. Global spatial and temporal distribution of vegetation as determined from satellite

observations, *International Journal for Remote Sensing* , volume 21, 1289–1302,2000.

FAO. 2001. *Global forest fire assessment 1990-2000*. FRA Working Paper www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp.

FAO. *Emergencies: Protect, restore, enhance: FAO's role in emergencies*. 2008

GALANTER, M.; LEVY II, H.; CARMICHAEL, G. R. Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x and O₃. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. D5, p. 6633-6653, 2000.

GIGLIO, L.; DESCLOITRES, J.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, volume 87, 2003.

GIANNINI, A.; BIASUTTI, M.; VERSTRAETE, M. M. A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change. *Global and Planetary Change*, volume 64, 119–128, 2008.

GIGLIO, L.; DESCLOITRES J.; JUSTICE C. O.; KAUFMAN Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* , volume 87, 2003.

GIORGI, F.; BATES, G.T. The climatological skill of a regional climate model over complex terrain. *Monthly Weather Review*, volume117, p. 2325-2347, 1989.

GOLDAMMER, J. G., *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric and Climatic Importance of Vegetation Fires*, volume 13, Wiley and Sons, 298-314, 1993.

GOUVEIA, C., et al , Post fire vegetation recovery in portugal based on spot-vegetation data, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, volume 10, 673–684, 2010.

HELD, I.; DELWORTH, T. L.; LU, J.; FINDELL, K. L.; KNUTSON, T. R.: Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 102, 17891–17896, 2005.

HIROTA, M.; Nobre, C.; Oyama, M. D.; Bustamante, M. M. The climatic sensitivity of the forest, savanna and forest-savanna transition in tropical South America. *New Phytologist*, Volume 187, Issue 3, pages 707–719, 2010.

HOFFMANN, W. A.; SCHOEDER, W.; JACKSON, R. Positive feedbacks of fire, climate, and vegetation and the conversion of tropical savanna, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 29, 2052, 4 PP., 2002.

HOUGHTON, E.J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.; NOGUER, M.; LINDEN, P.V.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. Climate Change. *The scientific basis*. Cambridge Univ. Press., Cambridge, U.K., pps. 881 pp, 2001.

JUNGCLAUS, J.H et all. Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *Journal of Climate*, v. 19, pp. 3952-3972, 2006.

JUSTINO, F.; de MELO, A. S.; SETZER, A.; SISMANOGLU, R.; SEDIYAMA, G. C.; G. A. RIBEIRO, ; J. P. MACHADO,; STERL, A. Greenhouse gas induced changes in fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model, *Climatic Changes*, 2010.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R., COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOLLEN, J.; ZHU, Y.; LETMAN, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MOO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R;

JOSEPF, D. The NCEP- NCAR 40 Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, volume 77, 437–471. 1996.

KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A.; WARD, D.; TANRE, D.; HOLBEN ,B. N.; MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R. Biomass burning airborne and apaceborne experiment in the Amazonas (BASE-A), *Journal of Geophysical Research*, 1992.

KLOSTER, S.; MAHOWALD, N. M.; RANDERSON, J. T.; THORNTON, P. E.; HOFFMAN, F. M.; LEVIS, S.; LAWRENCE, P. J.; FEDDEMA, J. J.; OLESON, K. W.; LAWRENCE D. M. Fire dynamics during the 20th century simulated by the community land model. *Biogeosciences*, volume 7, 1877–1902, 2010.

KOMAREK, EV. Fire ecology: Grasslands and man. Proceedings, Tall Timbers Fire, *Ecology Conference*, volume 4, 169-220, 1965.

LANGMANN, B.; DUNCAN, B.; TEXTOR, C.; TRENTMANN, J.; VAN DER WERF G. R., Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate, *Atmospheric Environment*, Volume 43, 107–116, 2009.

LEVIS, S.; BONAN, G. B.; VERTENSTEIN, M.; OLESON, K. W.: The Community Land Models dynamic vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and users guide. *National Center for Atmospheric Research NCAR Tech.*, 50 pp., 2004.

LYNCH, A. H.; BERINGER, J.; KERSHAW, P.; MARSHALL, A.; MOONEY, S.; TAPPER, N.; TURNEY, C.; KAARS S. V. D. Using the Paleorecord to Evaluate Climate and Fire Interactions in Australia, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 35: 215-239, 2007.

LYON, B. Southern africa summer drought and heat waves: Observations and coupled model behavior. *Journal of Climate*, 22, 6033–6046, 2009.

MARIOTTI, L.; COPPOLA, E.; SYLLA, M.; GIORGI, F.; PIANI, C. Regional climate model simulation of projected 21st century climate change over an all-Africa domain: Comparison analysis of nested and driving model results. *Journal of Geophysical Research*, 2011.

MARLON, J. R.; BARTLEIN P. J.; Carcaillet C.; Gavin D. G.; Harrison S. P.; Higuera P. E.; Joos F.; Power M. J.; Prentice I. C.: Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, 1, 697–702, 2008.

MÉLO, A. S. Suscetibilidade do ambiente a ocorrência de queimadas sob condições climáticas atuais e de aquecimento global. 77f. Dissertação - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2009.

NAKICENOVIC, N.; SWART R. Special report on emissions scenarios. Technical report, *Cambridge Univ. Press, Cambridge*, UK. 2000.

NASA. 2012. Disponível em http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MOD14A1_M_FIRE#. Acessado em 17 de maio de 2012.

NEARY, D. G. et al. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 122, n. 1-2, p. 51-71, 1999.

NICHOLSON, S.; SELATO, J. C.: The influence of La Nina events on African rainfall, *International Journal of Climatology*, 20, 1761–1777, 2000.

OSTRO, B.D. The Effects of IR Pollution on Work Loss and Morbidity, *Journal of Environmental Economics and Management*, 10, 1983.

PAL, J. S.; GIROGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N.; SOLMON, F.; GAO, X., RAUSCHER, S.A.; FRANCISCO, R.; ZAKAY, A.; WINTER, J.; ASHFAQ, M.; SYED, F.S.; BELL, J.L.; DIFFENBAUGH, N.S.; KARMACHARYA, J.; KONARE, A.; MARTINEZ, D.; ROCHA, R.P.; SLOAN, L.C.; STEINER, A.L.

Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of American Meteorological Society. Soc.*, 88, 1395–1409. 2007.

PEDROSO D.; FERRAZ S. E. T. Simulações Do Modelo RegCM3 Com Diferentes Condições De Contorno Para O Rio Grande Do Sul – Uma Análise De Enos. 2012.

PHILANDER, G. El Niño Southern Oscillation (ENSO) Models. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pp. 827-832, 2001.

PRODON R.; FONS R.; ATHIAS-BINCHE F. The impact of fire on animal communities in Mediterranean area, *The role of fire in ecological systems. SPB Acad Publ*, The Hague, pp.121-157, 1987.

RAISON, R.J.; KHANNA, P.K.; Woods, P.V.; Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 15, 132-140. 1985.

RAMANKUTTY, N. & FOLEY, J. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992, *Global Biogeochemical Cycles*, 1998.

REASON, C. J. C.; ROUAULT, M.: Links between the Antarctic Oscillation and winter rainfall over western South Africa. *geophysical research letters*, vol. 32, I07705, 4 pp., 2005.

ROCHA, P.; MELO-GONALVES, A.; MARQUES, C.; FERREIRA, J.; CASTANHEIRA, J. M. High frequency precipitation changes in southeastern Africa due to anthropogenic forcing. *International Journal of Climatology* , 2007.

ROECKNER, E.; BÄUML, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M. ; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U. Tompkins, A. The atmospheric general

circulation model ECHAM5. Part I: Model description. *Max Planck Institute for Meteorology Rep.* 349, 127 pp., 2003.

SANTOS J.G. M.; LIMA K. C.; BEZERRA D. S.; NORA E. L. D. Impacto na qualidade do ar devido à emissão de material particulado no Estado do Mato Grosso e sua consequência à saúde humana. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.7214; 2011.

SARAIVA, O.F.; COGO, N.P.; MIELNICZUK, J. Erosividade das chuvas e perdas por erosão em diferentes manejos de solo e coberturas vegetais em solo laterítico bruno avermelhado distrófico (São Jerônimo), *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Rio de Janeiro, v.16, n.1, p.121-128, 1981.

SEROA da MOTTA, R; MENDES, A.P.; *Custos de Saúde Associados à Poluição do Ar no Brasil. Pesquisa e Planejamento Econômico*, 25, p: 165-198, 1995.

SETZER, A.; PEREIRA, M.C.; PEREIRA Jr A.C. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. *Climanálise*, v. 7, n 8, pp. 40-53, 2002.

SCHEITER, S.; HIGGINS S. I. Impacts of climate change on the vegetation of africa: an adaptive dynamic vegetation modelling approach. *Global Change Biology* , 15, 2224–2246, 2009.

SISMANOGLU, R. A.; SETZER, A. W.; LOPES A. L.; SEDENO E. M. Risco de Fogo para a vegetação de Cuba: comparação entre duas versões para 2010 utilizando dados do Satelite TRMM e SYNOP. *Anais XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2011.

SISMANOGLU, R. A.; SETZER, A. W.; JUSTINO, F.; LIMA, W. F. A. Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no CPTEC. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2002.

SISMANOGLU, R. A.; SETZER, A. W. Risco de fogo da vegetação na América do Sul: comparação de três versões na estiagem de 2004. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), Goiânia. *Anais* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3349-3356. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12726-PRE/8016), 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.33>>.

SITCH, S.; SMITH, B.; PRENTICE, I. C.; ARNETH, A. ; BONDEAU, A.; KAPLAN, W. C. J. O.; LEVIS, S.; LUCHT, W.; SYKES, M. T.; THONICKE, K.; VENEVSKY, S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology* , 161–185, 2003.

TADROSS, M.; JACK, C; HEWITSO, B. On RCM-based projections of change in southern African summer climate. *Geophysical research letters*, vol. 32, l23713, 4 pp., 2005.

TORRES, P; HONRUBIA, M. Changes and effects of a natural fire on ectomycorrhizal inoculum potential of soil in a *Pinus halepensis* forest. *For Ecol Manage* 96: 189-196,1997.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; GOBRON, N.; DOLMAN, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*, VOL. 22, 13 PP., 2008.

WHITLOCK, C.; BIANCHI, M. M.; BARTLEIN, P. J.; MARKGRAF, V.; MARLON, J., WALSH, M.; MCCOY, N. Postglacial vegetation, climate, and fire history along the east side of the Andes (lat 41-42.5S), Argentina. *Quaternary Research*, 66, 187–201, 2006.

WHITMORE, T.C. An introduction to tropical rain forests. Oxford *University Press*, New York, 266 pp, 1990.