

1963 | 2008

Atlas

Solarimétrico
do Ceará



**GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ**
*Secretaria da Ciência, Tecnologia
e Educação Superior
Secretaria da Infraestrutura*





Atlas Solarimétrico do Ceará

1963 - 2008

Estado do Ceará

Cid Ferreira Gomes

Governador

Secretaria da Infraestrutura - SEINFRA

Francisco Adail de Carvalho Fontenele

Secretário

Renato Walter Rolim Ribeiro

Coordenador de Energia e Comunicações

Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior - SECITECE

René Teixeira Barreira

Secretário

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME

Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins

Presidente

Luciana Cesar Torres de Melo Lima

Diretora Técnica

Sandra Maria Maia Costa

Diretora Administrativa e Financeira

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME

Atlas Solarimétrico do Ceará

1963 - 2008

Fortaleza – CE

2010

Equipe Técnica

Pela FUNCEME

Coordenação

Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins, Engenheiro Civil, PhD.

Elaboração

Otacílio Leandro de Menezes Neto, Físico, MSc.

Juliana Lima Oliveira, Física, MSc.

Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior, Físico, MSc.

Marcelo Rodrigues, Analista de Sistemas

Meiry Sayuri Sakamoto, Meteorologista, Dr.

Pela Universidade Estadual do Ceará

Orientação Científica

Alexandre Araújo Costa, Físico, PhD.

Apresentação

O uso de energias alternativas vem crescendo significativamente em todo o mundo. Além da busca por opções renováveis, a questão ambiental tem reforçado a necessidade de desenvolvimentos e investimentos nessa área. No Brasil, particularmente na região Nordeste, a exploração da radiação solar incidente, como fonte renovável de energia, encontra ótimas condições durante todo o ano.

O Estado do Ceará, que vive um processo de fortalecimento e diversificação de sua matriz energética com a inclusão de outras fontes renováveis, demandou um estudo que permitisse avaliar o potencial de geração de energia a partir da radiação solar incidente. Nesse sentido, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), em parceria com a Secretaria da Infraestrutura (SEINFRA), produziu o *Atlas Solarimétrico do Ceará* no intuito de consolidar o conhecimento sobre o potencial de energia solar do Estado e de fornecer um instrumento de apoio às políticas de planejamento público e privado e de promoção do desenvolvimento econômico e social.

O Atlas apresenta a compilação da radiação solar incidente sobre o Ceará, por meio de mapas climatológicos e anuais que permitem identificar a distribuição espacial e avaliar a variação sazonal da disponibilidade de energia solar.

A base de dados para construção deste Atlas resulta de simulações numéricas realizadas para o período de 1963 a 2008, através de uma metodologia desenvolvida e testada com sucesso no mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil.



Sumário

Lista de Figuras	1
1. Introdução	5
1.1 Panorama das Energias Renováveis no Brasil	9
1.2 Radiação Solar e Base de Dados	10
2. Metodologia	11
2.1 Estimativa de Radiação Solar	11
2.1.1 Modelagem Numérica	11
2.1.2 Validação das Simulações Numéricas	14
2.1.3 Incertezas Associadas às Estimativas do Modelo Numérico	17
3. Mapas Solarimétricos Climatológicos Mensais.....	19
4. Mapas de Espalhamento Mensais	27
5. Mapas Solarimétricos para o Quadrimestre FEV-MAR-ABR-MAI	35
6. Mapas Solarimétricos para o Semestre JUN-JUL-AGO-SET-OUT-NOV	39
7. Mapas Solarimétricos para o Bimestre DEZ-JAN	43
8. Mapas Solarimétricos Mensais para os Anos de 1963 a 2008	47
9. Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

Figura 1. Potencial hidrelétrico teórico, em TWh/ano. Fonte: Ministério de Minas e Energia.	7
Figura 2. Potencial eólico instalado de 2003 a 2009 por região. Fonte: Global Wind Energy Council (GWEC).	7
Figura 3. Produção Mundial de Biocombustíveis. Fonte: IEA World Energy Outlook 2006.	8
Figura 4. Comparativo de oferta interna de energia entre o Brasil e demais países. Fonte: Ministério de Minas e Energia.	9
Figura 5. Exemplo das grades do modelo atmosférico.	12
Figura 6. Área considerada nas simulações numéricas com as linhas da grade horizontal utilizada.	13
Figura 7. Radiação solar (W/m^2) simulada para o mês de dezembro de 1964.	14
Figura 8. Mapa com a localização das Plataformas Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) utilizadas na validação das simulações numéricas.	15
Figura 9. Radiação solar observada através das PCDs e através das simulações realizadas com o modelo RAMS para o período de agosto de 2004 a dezembro de 2008. Em vermelho, a radiação solar observada; em preto, a radiação média dos dez membros resultantes das simulações numéricas mostradas pelas demais curvas coloridas.	15
Figura 10. Gráfico da regressão linear usada para correção do viés do modelo numérico.	16
Figura 11. Radiação solar observada através das PCDs e através das simulações realizadas com o modelo RAMS para o período de agosto de 2004 a dezembro de 2008 após a aplicação da correção. Em vermelho, a radiação solar observada; em preto, a radiação média dos dez membros resultantes das simulações numéricas, mostradas pelas demais curvas coloridas.	17
Figura 12. Médias anuais de radiação solar simuladas para os anos de 1963 a 2008.	18
Figura 13. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de JANEIRO.	20
Figura 14. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de FEVEREIRO.	20
Figura 15. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de MARÇO.	21
Figura 16. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de ABRIL.	21
Figura 17. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de MAIO.	22
Figura 18. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de JUNHO.	22

Figura 19. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de JULHO.	23
Figura 20. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de AGOSTO.....	23
Figura 21. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de SETEMBRO.....	24
Figura 22. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de OUTUBRO.....	24
Figura 23. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de NOVEMBRO.	25
Figura 24. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de DEZEMBRO.....	25
Figura 25. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JANEIRO.....	28
Figura 26. Espalhamento da simulação numérica para o mês de FEVEREIRO.....	28
Figura 27. Espalhamento da simulação numérica para o mês de MARÇO.	29
Figura 28. Espalhamento da simulação numérica para o mês de ABRIL.	29
Figura 29. Espalhamento da simulação numérica para o mês de MAIO.	30
Figura 30. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JUNHO.	30
Figura 31. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JULHO.....	31
Figura 32. Espalhamento da simulação numérica para o mês de AGOSTO.	31
Figura 33. Espalhamento da simulação numérica para o mês de SETEMBRO.	32
Figura 34. Espalhamento da simulação numérica para o mês de OUTUBRO.	32
Figura 35. Espalhamento da simulação numérica para o mês de NOVEMBRO.	33
Figura 36. Espalhamento da simulação numérica para o mês de DEZEMBRO.	33
Figura 37. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEV-MAR-ABR- MAI para anos NORMAIS.	36
Figura 38. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEV-MAR-ABR- MAI para anos CHUVOSOS.....	36
Figura 39. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEV-MAR-ABR- MAI para anos SECOS.....	37
Figura 40. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET- OUT-NOV para anos NORMAIS.	40
Figura 41. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET- OUT-NOV para anos CHUVOSOS.	40
Figura 42. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET- OUT-NOV para anos SECOS.	41
Figura 43. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos NORMAIS.....	44
Figura 44. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos CHUVOSOS.	44
Figura 45. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos SECOS.	45
Figura 46. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1963.	48

Figura 84. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2001.	86
Figura 85. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2002.	87
Figura 86. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2003.	88
Figura 87. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2004.	89
Figura 88. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2005.	90
Figura 89. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2006.	91
Figura 90. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2007.	92
Figura 91. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2008.	93

1. Introdução

Os processos de produção, conversão e utilização de energia estão presentes na história da humanidade desde os tempos mais remotos. A partir do século XVIII, com a Revolução Industrial iniciada na Inglaterra, a necessidade de energia passou a acompanhar a evolução da industrialização. A produção de energia em pequena escala gradualmente deu espaço às grandes plantas de produção, que se mostraram economicamente mais viáveis, e, com o tempo, o incremento na população mundial e o avanço econômico e tecnológico incutiram complexidade a esses processos. A demanda por energia desde então é crescente, e nos dias atuais, boa parte dessa demanda vem de países em processo de desenvolvimento como o Brasil.

No momento em que os números que descrevem a necessidade por energia e o desenvolvimento tecnológico e sócio-econômico parecem propensos ao aumento, as fontes primárias tradicionais de energia começam a virar alvo de preocupação por seguir na direção contrária a esta tendência. A maior parte da economia mundial está alicerçada na exploração de fontes finitas (petróleo, gás natural, carvão mineral e urânio) que requerem uma escala de tempo da ordem de milhões de anos para a formação das reservas como as conhecemos hoje. Além disso, os impactos ambientais inerentes aos resíduos poluentes do uso dessas fontes e aos processos de produção e distribuição de energia fomentam a preocupação crescente em torno do aumento da temperatura média do planeta e das mudanças climáticas globais. Provavelmente, para uma grande parcela da população, o clima do planeta é a razão fundamental para a busca de fontes de energias limpas e renováveis e para uma urgente e saudável mudança de hábitos. A questão do uso de outras fontes de energia, entretanto, encontra sua motivação em aspectos mais elementares do que o de combater consequências: é preciso assegurar sua prospecção e abastecimento de forma viável. A busca por alternativas visa, além da ousada tarefa de mitigar os efeitos das mudanças no clima, assegurar o desenvolvimento sócio-econômico de forma sustentável.

Longe de ser uma tarefa simples, a procura por alternativas às fontes e processos tradicionais de exploração de energia, traz consigo uma série extensa de ponderações: se há disponibilidade de um dado recurso, de tecnologia apropriada para seu aproveitamento, sua viabilidade sócio-econômica, seus impactos ambientais, sua integração com a matriz energética pré-existente, etc. Pesquisas focadas no

estudo de viabilidade, análise de risco, avaliação de potencial disponível e impactos envolvidos no uso de fontes de energia renováveis são meios importantes para responder essas questões, dar suporte a futuros investimentos em tecnologia e infraestrutura.

Por outro lado, a redução na emissão de carbono vem ganhando força como o principal agente de crescimento econômico para vários países em desenvolvimento, mostrando que é possível e frutuosa uma economia baseada em energias limpas. De acordo com relatório da UNEP (*United Nation Environmental Programme*), 2008 foi o primeiro ano em que investimentos em energias limpas e renováveis ultrapassaram os investimentos em combustíveis fósseis, em torno de 30 bilhões.

No mundo, a oferta de energia hidráulica é a mais significativa entre as fontes renováveis. Até 2009, cerca de 19% da oferta mundial de energia elétrica era suprida por hidrelétricas. De forma que esta fonte provavelmente continuará sendo uma das mais importantes nos próximos anos. No Brasil, em torno de 93% da produção requerida pelo Sistema Elétrico Nacional no ano de 2005, por exemplo, foi suprida pelas Centrais Hidrelétricas. O potencial tecnicamente aproveitável de energia hidrelétrica no Brasil o coloca em terceiro lugar no ranking de países com maior potencial hidrelétrico a ser explorado, de acordo com dados de 2004 do *World Energy Council*.

Dentre as demais fontes alternativas, a energia eólica é a que vem recebendo mais investimentos, e a que apresenta maior crescimento, com capacidade instalada em torno de 121.000 MW (até 2008) no planeta.

Em 2009, o mercado de energia eólica cresceu 41.5% em relação ao ano anterior. Esse crescimento trouxe ao mundo uma capacidade instalada de 158.5 GW e estima-se que em 2020 o potencial instalado chegue a 450 GW. No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica” (PROINFA), contratou em 2009, 1800 MW distribuídos em 71 projetos de geração de energia eólica somente na região Nordeste. O atlas eólico brasileiro em sua versão mais recente aponta que o potencial eólico brasileiro é superior a 350 GW.

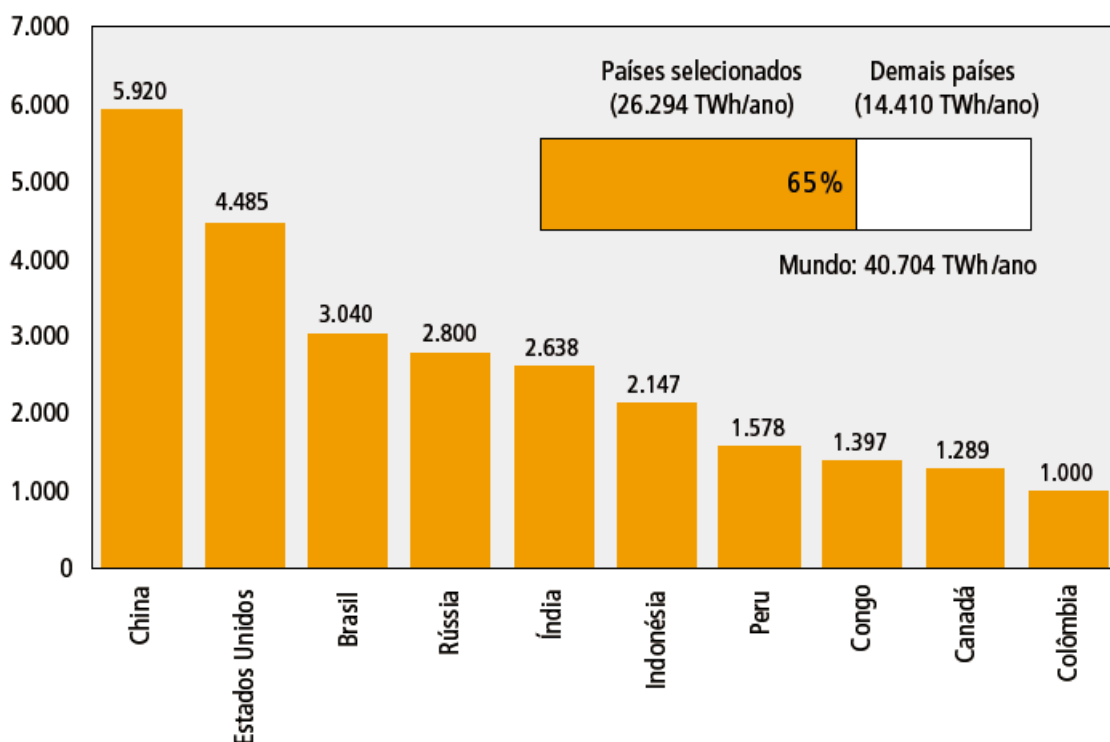


Figura 1. Potencial hidrelétrico teórico, em TWh/ano. Fonte: Ministério de Minas e Energia.

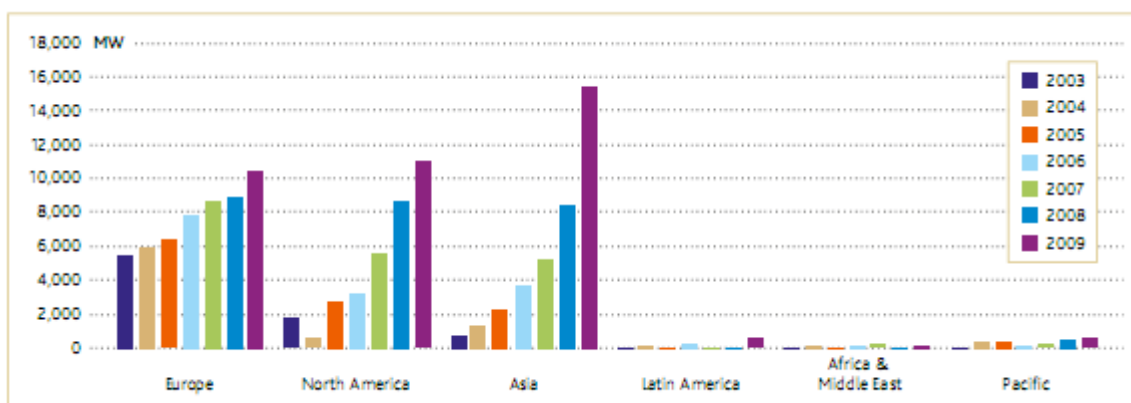


Figura 2. Potencial eólico instalado de 2003 a 2009 por região. Fonte: Global Wind Energy Council (GWEC).

Outra fonte alternativa que tem sido explorada é o uso da biomassa, que supre mais de 13% da demanda por energia no mundo. Considerando que biomassa refere-se a toda a gama de materiais orgânicos: animais, plantas e seus resíduos. O uso desse tipo de combustível tem como principal vantagem a reduzida emissão de CO₂ quando comparado aos combustíveis fósseis. As variedades de fontes, usos e processos de aproveitamento de biomassa torna difícil a sua descrição em números, porém, de acordo com relatório da IEA (*International Energy Agency*), a estimativa é de que em

2050, de 10% a 20% da demanda de energia primária possa ser suprida por biomassa, considerando-se que até lá não haja mudanças significativas nas condições necessárias à produção, como disponibilidade de água e terras aráveis. Ainda de acordo com a IEA, a geração de biocombustíveis como Etanol e biodiesel requer um crescimento em torno de 7% ao ano para que em 2030 eles atendam 4% da demanda de combustíveis para transporte. O maior desafio em relação dos biocombustíveis é a sustentabilidade da produção em larga escala. A produção de biocombustíveis de primeira geração como o Etanol e o biodiesel, pode desencadear impactos ambientais decorrentes das culturas de cana-de-açúcar (no caso do Etanol) e oleaginosos (no caso do biodiesel) e sua competição com a produção de alimento. A possível redução na oferta de alguns produtos agrícolas acarretaria uma elevação indesejável nos preços e prejudicaria a exportação de certas colheitas.

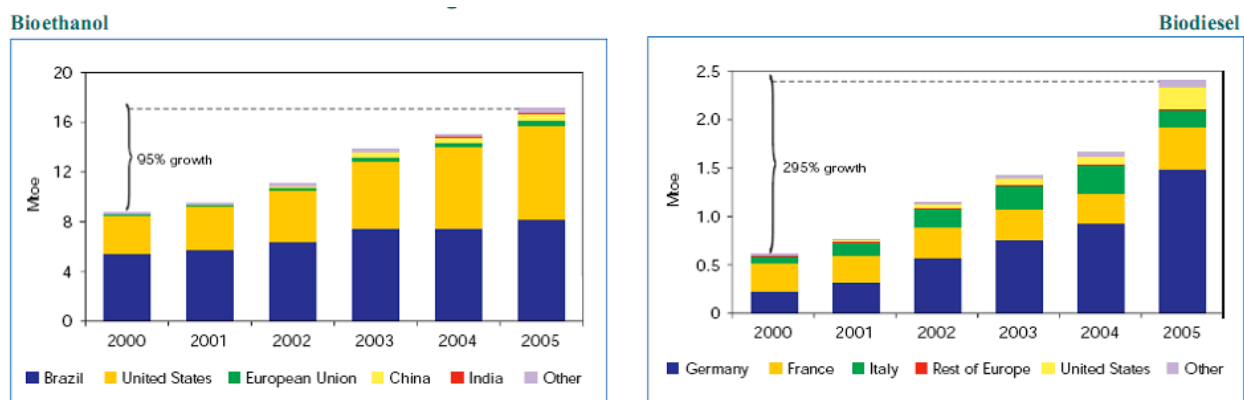


Figura 3. Produção Mundial de Biocombustíveis. Fonte: IEA World Energy Outlook 2006.

A energia solar é a fonte primária para todas as outras fontes de energia. O potencial solar disponível no mundo é da ordem de milhares de vezes maior que o consumo mundial de eletricidade. Contudo tanto a geração termosolar, quanto a fotovoltaica esbarram na questão de seus custos, que são altos o suficiente para não tornar essas fontes competitivas no mercado, tais como energia hidrelétrica, biomassa e eólica. Apesar disso, o aproveitamento de energia solar fotovoltaica apresenta boas perspectivas de crescimento havendo incentivos para sua produção. Em 2009, a capacidade mundial instalada de energia fotovoltaica atingiu a casa de 7.0 GW, cerca de 20% a mais do que em 2008. Estima-se que nos últimos 15 anos, os preços associados à produção de energia fotovoltaica tenham caído 4,0% ao ano.

Por sua localização geográfica, o Brasil dispõe de uma larga área que pode ser aproveitada para fins de exploração da radiação solar incidente em ótimas condições

durante praticamente todo o ano, como é o caso da região Nordeste. Localizado aproximadamente entre as latitudes 1°S e 18°S, em uma área de 1.548.675 km², o Nordeste Brasileiro possui em média 2500 horas/ano de insolação.

1.1 Panorama das Energias Renováveis no Brasil

O Brasil desponta como o maior mercado de energias renováveis do mundo. Considerando dados de 2008, 45.4% da matriz energética nacional correspondem à biomassa, energia hidráulica e outras fontes, nas quais se encontram a energia solar e eólica. Esse valor é consideravelmente alto, uma vez que a oferta interna de energias renováveis em outros países fica, em média, em torno de 12.9%.

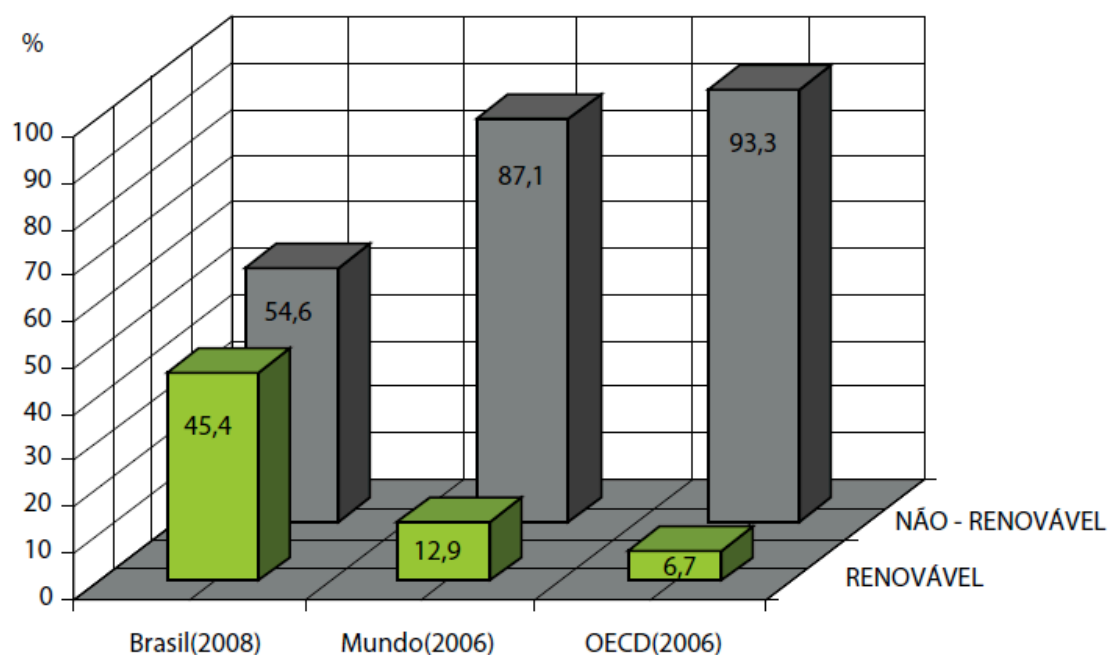


Figura 4. Comparativo de oferta interna de energia entre o Brasil e demais países. Fonte: Ministério de Minas e Energia.

A extensão e localização do território brasileiro oferecem condições extremamente favoráveis ao aproveitamento do potencial eólico e solar. Com base nisso, diversos programas de incentivo às fontes alternativas de energia tem estimulado a diversificação da matriz energética, visando assegurar o abastecimento, a redução de emissões de CO₂ e desenvolver o potencial de cada região. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica PROINFA (Decreto nº 5.025, de 2004) visa o incentivo à participação de fontes alternativas, eólica, biomassa e Pequenas

Centrais Hidrelétricas (PCHs) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), atingindo, através da contratação dos projetos de aproveitamento dessas fontes, 3.299,40 MW de capacidade instalada. As PCHs serão responsáveis por: 1.191,24 MW, 1.422,92 MW de usinas eólicas, e 685,24 MW de biomassa.

Os incentivos ao desenvolvimento do potencial de energias renováveis no Brasil variam por região e em função do potencial disponível, de forma que estudos de avaliação de potencial e viabilidade tornam-se recursos indispensáveis para tomadas de decisão. O uso de equipamentos de medição na região de interesse é a principal fonte de informação sobre a disponibilidade de um dado recurso. Entretanto, outras ferramentas e metodologias podem ser empregadas a fim de obter informações mais detalhadas, para validação dos dados obtidos e para contornar intermitências numa série de dados. Toda uma gama de aplicações pode ser derivada do esforço inicial de obtenção destes dados, de aplicações voltadas ao tempo e clima até estudos de viabilidade e riscos para investimentos em energias.

Nesta publicação, apresentamos a compilação de dados de radiação solar incidente resultante de modelagem numérica e medições sobre o estado do Ceará, a fim de representar geograficamente sua distribuição ao longo do ano, incluindo as variações sazonais.

1.2 Radiação Solar e Base de Dados

A base de dados para construção deste Atlas resulta de simulações numéricas realizadas para o período de 1963 a 2008, através de uma metodologia desenvolvida e testada com sucesso no mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil (Menezes Neto, 2007; Menezes Neto et al., 2009).

O modelo regional RAMS 6.0 (Regional Atmospheric Modeling System Versão 6.0) foi inicializado com dados de entrada do modelo global ECHAM do IRI (*International Research Institute for Climate and Society*). Foram utilizadas dez condições iniciais diferentes (chamados de membros) para este estudo. Embora esses membros difiram entre si por suas condições iniciais, todos são forçados pelo mesmo campo de Temperatura da Superfície do Mar observada (TSM).

2. Metodologia

2.1 Estimativa de Radiação Solar

Os mapas apresentados neste Atlas são resultantes de simulações numéricas realizadas com o modelo atmosférico RAMS 6.0 (Regional Atmospheric Modeling System Versão 6.0), que possui dentre suas variáveis a radiação solar incidente na superfície, também conhecida como irradiância.

A metodologia foi testada com sucesso no mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil

2.1.1 Modelagem Numérica

Os modelos numéricos tem sido frequentemente utilizados para a simulação das condições atmosféricas passadas e também para prognósticos futuros. Geralmente, as variáveis atmosféricas são representadas em pontos de grade horizontais e verticais, como mostrado no exemplo da Figura 5. Variáveis, tais como temperatura, fluxos de energia e precipitação, por exemplo, são calculadas ao nível do solo enquanto as demais, como vento, umidade relativa, fração de cobertura de nuvens são calculadas ao longo da coluna vertical para cada caixa de grade. Como sugere a figura, todas essas grandezas calculadas para uma caixa de grade influenciam na estimativa das caixas vizinhas.

O modelo RAMS desenvolvido pela Universidade do Estado do Colorado (CSU – Colorado State University) (Cotton et al., 2003) foi essencialmente concebido como uma ferramenta de pesquisa. No Brasil, o RAMS foi introduzido por pesquisadores da Universidade de São Paulo no final dos anos 80. O modelo utiliza um conjunto de equações tridimensionais que descrevem a dinâmica, a termodinâmica e a conservação da água em suas três fases. Este conjunto de equações é complementado por parametrizações de processos como a difusão turbulenta, radiação solar e terrestre, formação de nuvens e precipitação, efeitos do terreno (solo-vegetação), convecção e troca de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera.

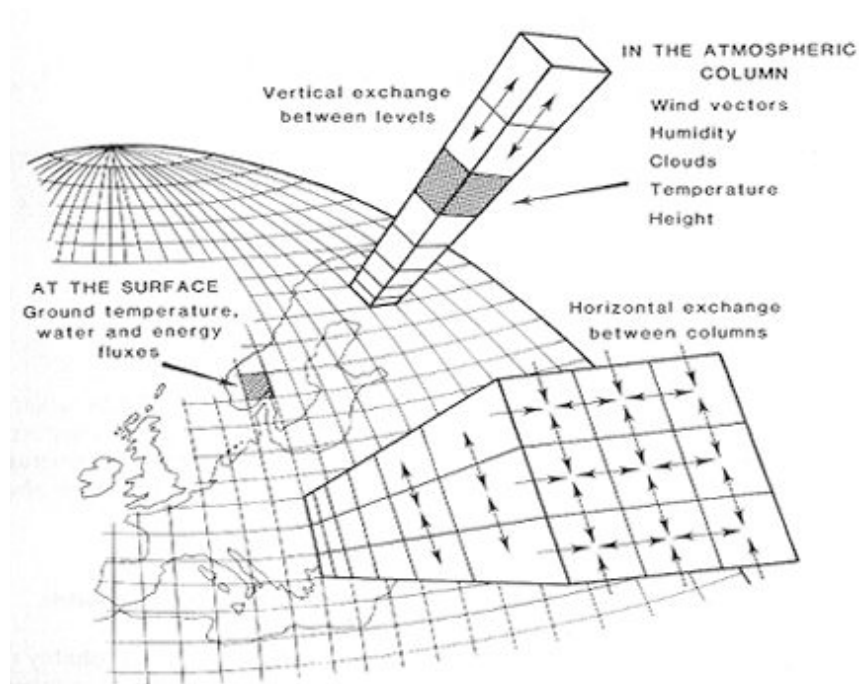


Figura 5. Exemplo das grades do modelo atmosférico.

Nas simulações desenvolvidas para a elaboração deste Atlas, o modelo RAMS foi ajustado para que seus resultados fossem armazenados a cada hora. Algumas configurações importantes adotadas neste modelo são as seguintes:

- Grade horizontal com 100 pontos com 30 km de espaçamento nas direções X e Y, centrada nas coordenadas 8°S e 40°W (Figura 6);
- Grade vertical com 50 pontos alcançando até a altitude de 21 km aproximadamente;
- Esquema de parametrização de radiação de Chen & Cotton (1983) - para ondas curtas e longas; este esquema é utilizado a cada 20 minutos nas simulações;
- Esquema de parametrização de convecção de Kuo - utilizado a cada 20 minutos devido ao alto custo computacional;
- Esquema de parametrização de turbulência de Mellor-Yamada;
- Esquema de parametrização de microfísica ativada.

A parametrização de radiação de Chen & Cotton (1983) propicia o tratamento de diversos processos radiativos de ondas curtas, como espalhamento, absorção, transmissão e reflexão por nuvens. Esta parametrização possibilita que o conteúdo de água líquida e o vapor presentes na atmosfera, influenciem os fluxos de radiação solar e terrestre.

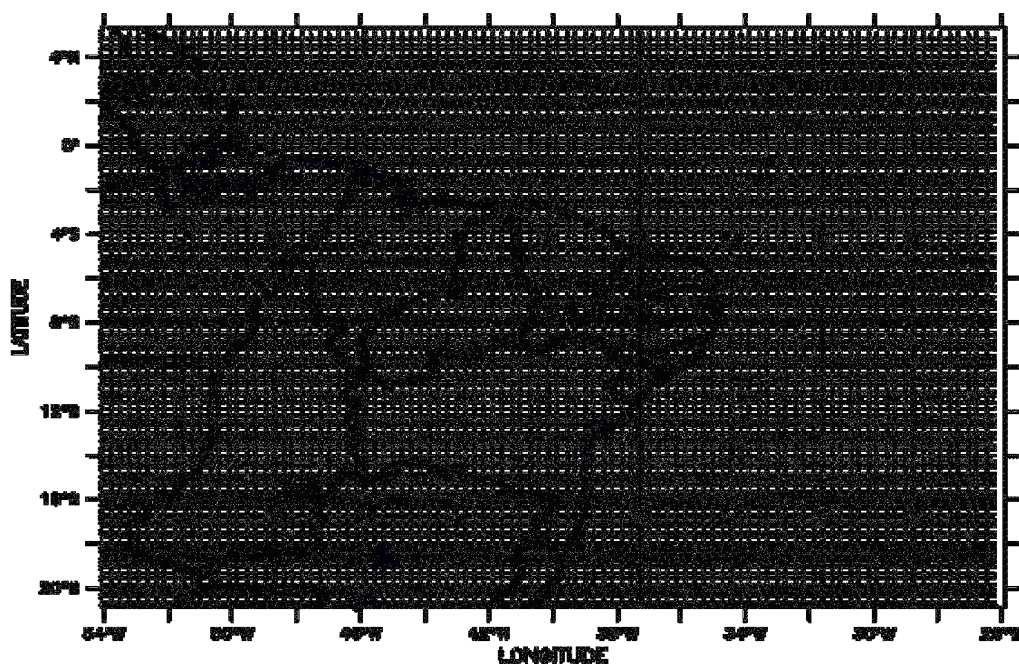


Figura 6. Área considerada nas simulações numéricas com as linhas da grade horizontal utilizada.

O modelo foi processado para cada ano individualmente totalizando 450 simulações (10 membros com 45 anos cada), e sobre essas simulações foi aplicada uma média ponderada, cujo resultado, para atender a esta aplicação, é mais representativo do que cada membro individualmente

Como exemplo, a Figura 7 mostra o campo de radiação solar incidente em W/m^2 simulada para o mês de dezembro de 1964. Na Figura 7 observa-se no sul do Ceará, valores de radiação incidente alcançando até cerca de $250 W/m^2$, o que corresponde a aproximadamente $670 MJ/m^2$, isto equivale a dizer que com esta disponibilidade, e tomando-se placas solares com aproveitamento ideal poderia-se gerar no Cariri, neste mês de dezembro, em particular, em torno de $186 kWh/m^2$ de energia.

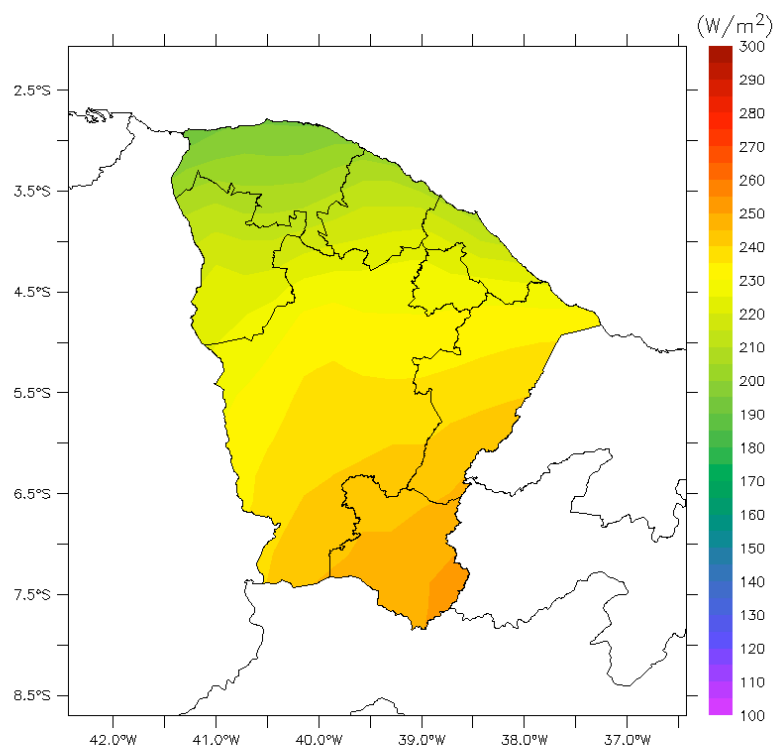


Figura 7. Radiação solar (W/m^2) simulada para o mês de dezembro de 1964.

2.1.2 Validação das Simulações Numéricas

Os resultados das simulações numéricas foram comparados com os dados coletados através dos sensores de radiação solar (piranômetros modelo SP-LITE) instalados em Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) operadas pela FUNCEME em todo o estado do Ceará.

A localização das sessenta e três PCDs utilizadas na validação é mostrada na Figura 8. A metodologia empregada considerou a comparação entre a radiação média mensal observada no estado do Ceará e os resultados dos dez membros das simulações. A Figura 9 mostra a curva de radiação solar observada e simulada no período de agosto de 2004 a dezembro de 2008. A análise das curvas mostra um padrão semelhante entre elas, refletindo o ciclo anual, com mínimos de radiação solar sendo observados durante o período de maior nebulosidade, na primeira metade do ano. No entanto, apesar da similaridade, quando comparado aos dados observados, os resultados do modelo numérico sugerem uma tendência a superestimar sistematicamente os valores da radiação solar.

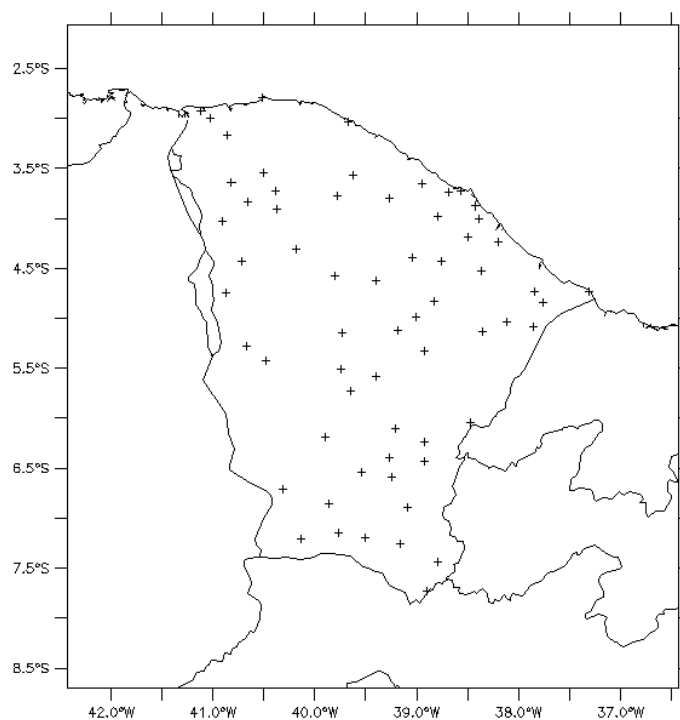


Figura 8. Mapa com a localização das Plataformas Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) utilizadas na validação das simulações numéricas.

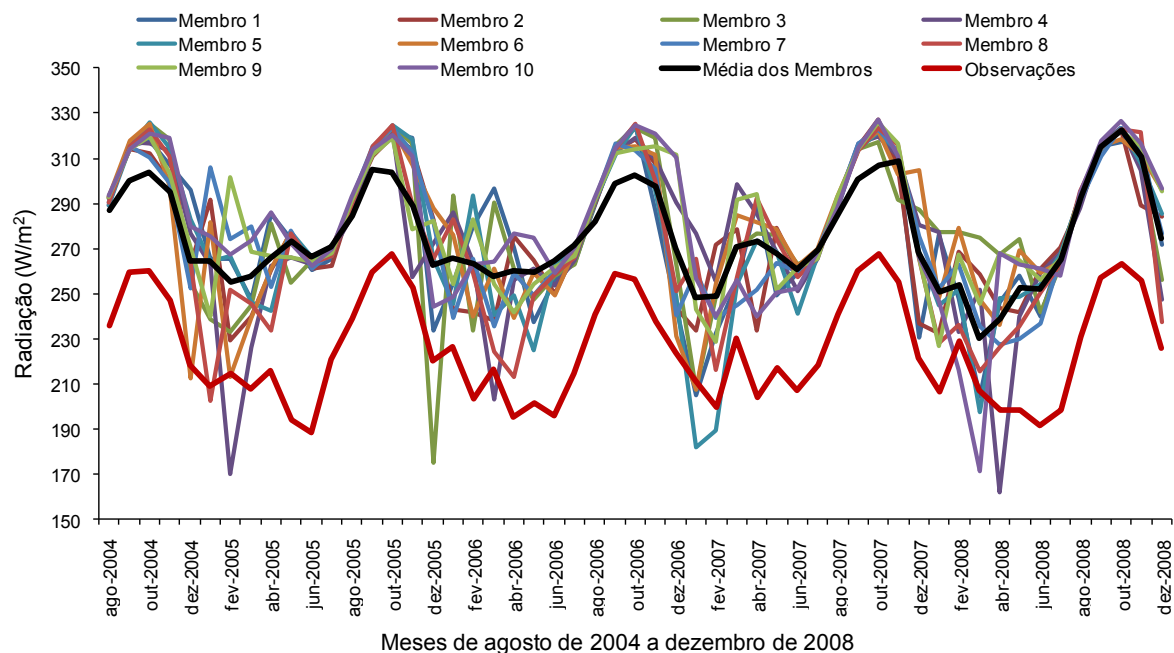


Figura 9. Radiação solar observada através das PCDs e através das simulações realizadas com o modelo RAMS para o período de agosto de 2004 a dezembro de 2008. Em vermelho, a radiação solar observada; em preto, a radiação média dos dez membros resultantes das simulações numéricas mostradas pelas demais curvas coloridas.

A fim de corrigir este viés do modelo numérico foi aplicado um ajuste através de regressão linear baseada na curva ajustada mostrada na Figura 10 e cuja equação de regressão é dada por:

$$Observação = 0,8035 * Modelo + 3,0396$$

A equação da regressão linear foi aplicada em cada membro individualmente e para a média entre os membros.

A Figura 11 mostra que após a correção, a diferença entre a média dos membros e os valores observados diminui significativamente. A correlação encontrada entre a radiação observada e a simulada foi de 0,9101, o que indica um excelente ajuste.

A partir destes resultados, a correção foi aplicada para todo o período simulado (1963 a 2008).

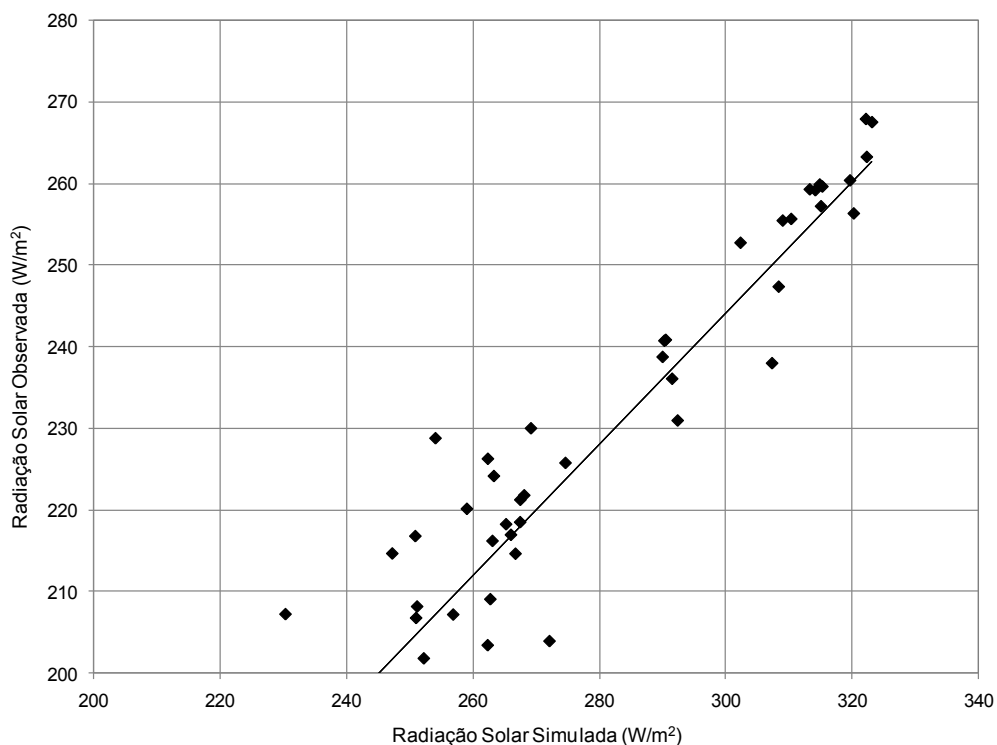


Figura 10. Gráfico da regressão linear usada para correção do viés do modelo numérico.

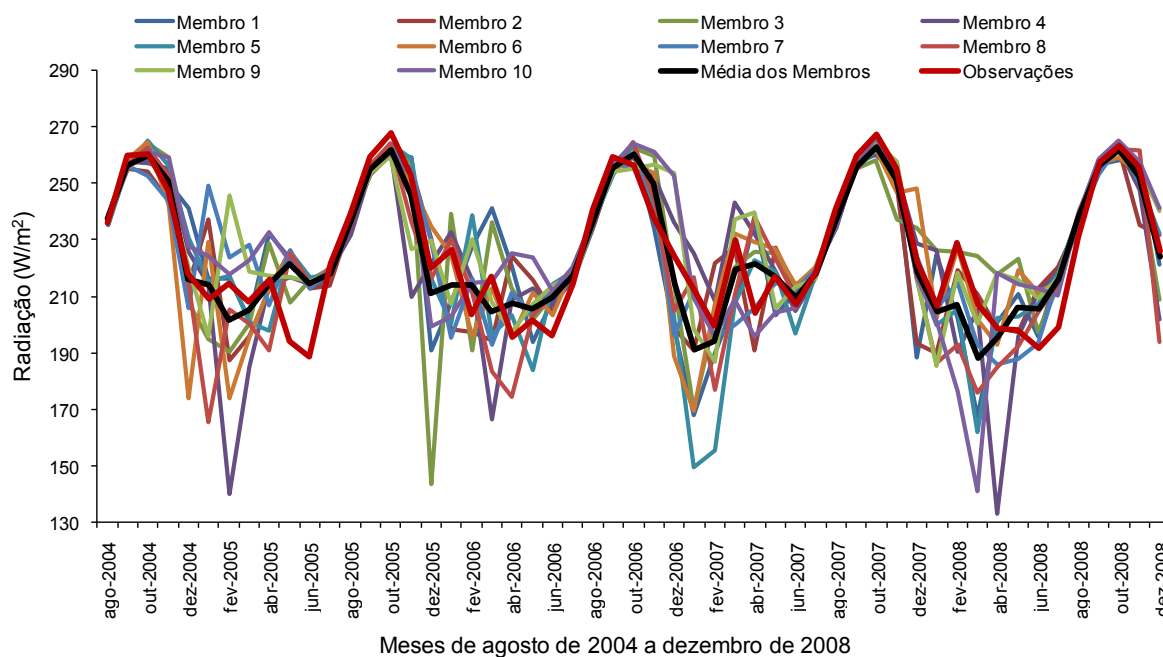


Figura 11. Radiação solar observada através das PCDs e através das simulações realizadas com o modelo RAMS para o período de agosto de 2004 a dezembro de 2008 após a aplicação da correção. Em vermelho, a radiação solar observada; em preto, a radiação média dos dez membros resultantes das simulações numéricas, mostradas pelas demais curvas coloridas.

2.1.3 Incertezas Associadas às Estimativas do Modelo Numérico

A confiabilidade do modelo numérico pode ser avaliada em função do espalhamento das simulações resultante do conjunto dos membros. O espalhamento, por sua vez, pode ser definido como o desvio padrão das previsões de cada um desses membros em relação à simulação média. Assim, considerando que os membros das simulações sejam consistentes, quando o espalhamento é pequeno pode-se atribuir maior confiabilidade à previsão e, onde os resultados das simulações apresentam-se mais afastados, ou seja, onde o espalhamento é maior, a confiabilidade é menor.

Portanto, através do espalhamento pode-se estimar a incerteza associada à previsão de um determinado padrão atmosférico. A região Nordeste do Brasil, principalmente o setor norte, que inclui o estado do Ceará tem a qualidade da estação chuvosa fortemente influenciada pela presença do fenômeno El Niño, que se caracteriza pelo aquecimento das águas do oceano Pacífico equatorial próximo à costa do Perú. Assim, sob influência do El Niño, observa-se uma tendência de redução das chuvas no Nordeste. Desde que os membros do modelo global utilizados para inicializar os

diversos membros do modelo RAMS são forçados pelos campos de temperatura da superfície do mar (TSM), todas as simulações apresentam uma convergência para a mesma solução nos casos em que as forçantes de grande escala, tais como El Niño, são bem definidas, assim o desvio, ou seja, o espalhamento entre os resultados de cada membro é menor. Isto é mostrado na Figura 12, que traz as médias anuais de radiação solar resultantes das simulações, onde fica evidente, por exemplo, que entre 1982 e 1985, o espalhamento é relativamente menor do que nos demais períodos. De fato, as observações meteorológicas mostraram que em 1983 houve um evento severo de El Niño, e em 1985, estabeleceu-se um padrão oceânico com características de La Niña (águas mais frias no Pacífico equatorial leste).

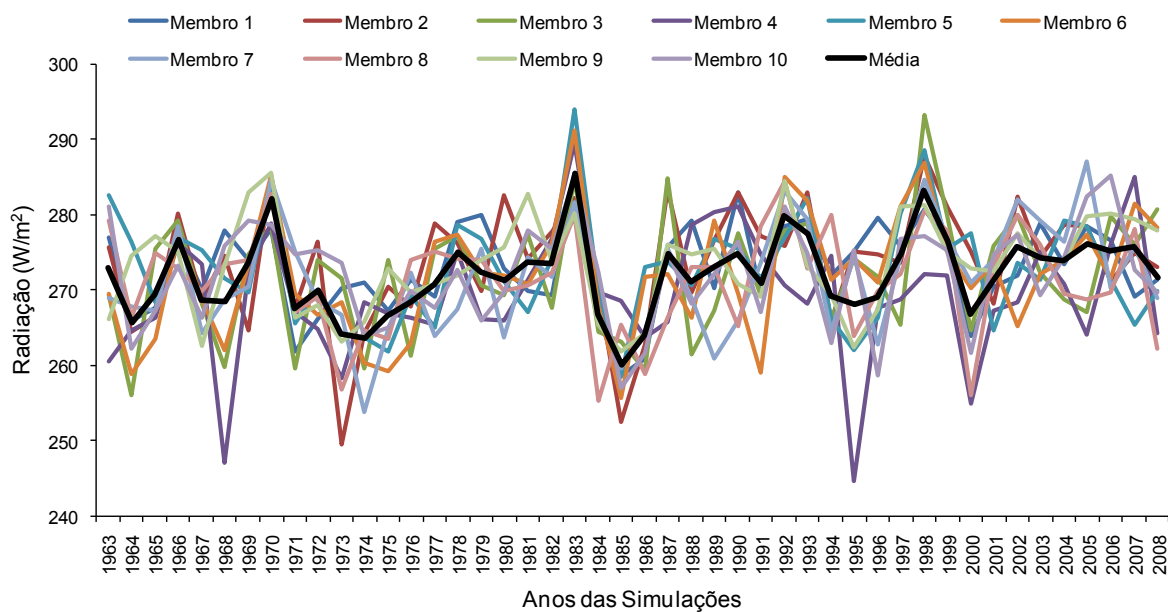


Figura 12. Médias anuais de radiação solar simuladas para os anos de 1963 a 2008.

3. Mapas Solarimétricos Climatológicos Mensais

A seguir é apresentada a climatologia mensal da radiação solar calculada para o período de 1963 a 2008 a partir da simulação numérica média, ajustada através da correção imposta pela equação de regressão linear.

A análise das Figuras 13 a 24 indica que há uma grande variação na radiação solar incidente no Ceará ao longo do ano. Valores menores são observados durante os períodos de maior nebulosidade, ou seja, desde a pré-estação (dezembro e janeiro) até o final da quadra chuvosa, que engloba os meses de fevereiro a maio. Durante estes seis meses, o setor norte do estado é a região que apresenta os menores valores de radiação solar incidente, visto que sofre influência direta e mais freqüente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistema meteorológico atuante nos meses da estação chuvosa, e um dos responsáveis pela qualidade da mesma.

Nos meses de junho e julho, a radiação solar incidente ainda é relativamente baixa, porém, os mínimos se deslocam para o setor sul e leste do estado. Isto ocorre porque durante esta época do ano observa-se a atuação dos distúrbios ondulatórios de leste, também conhecidos como ondas de leste, que são responsáveis pelas chuvas no setor leste da região Nordeste do Brasil e que vez por outra podem também atingir o estado do Ceará. Além disso, sistemas frontais também podem alcançar o sul do Ceará e provocar chuvas, por isso, a ocorrência de índices de radiação solar mais baixos nessa área.

De agosto a novembro, prevalece o período mais seco do ano no Ceará, o que reflete os valores de radiação solar incidente que mostram um pico no mês de outubro.

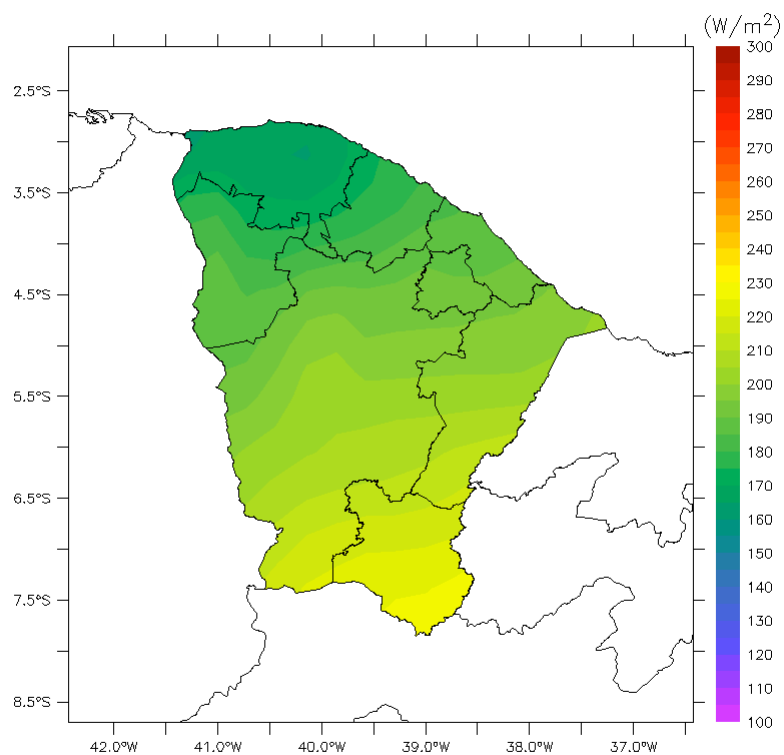


Figura 13. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de JANEIRO.

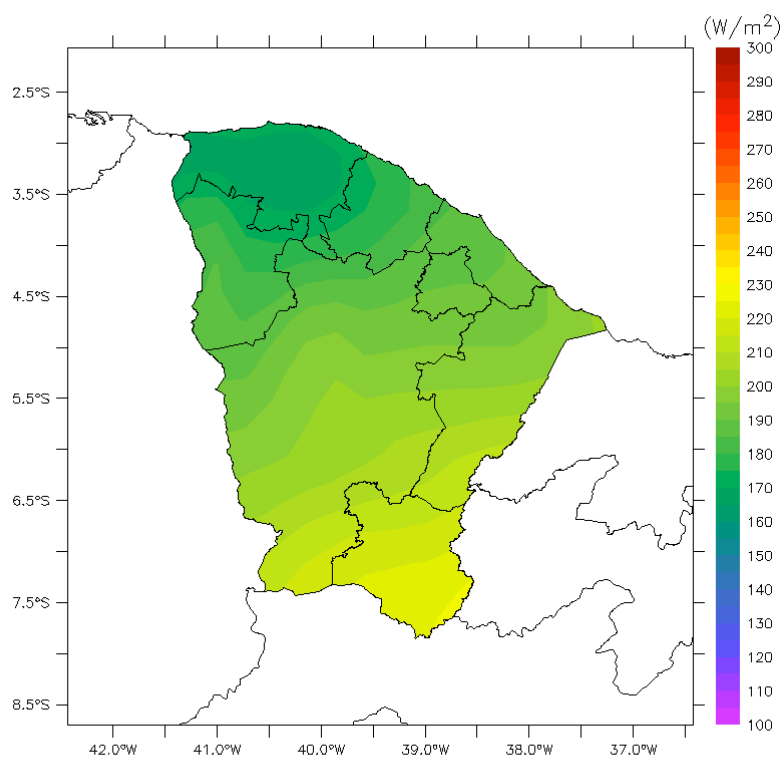


Figura 14. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de FEVEREIRO.

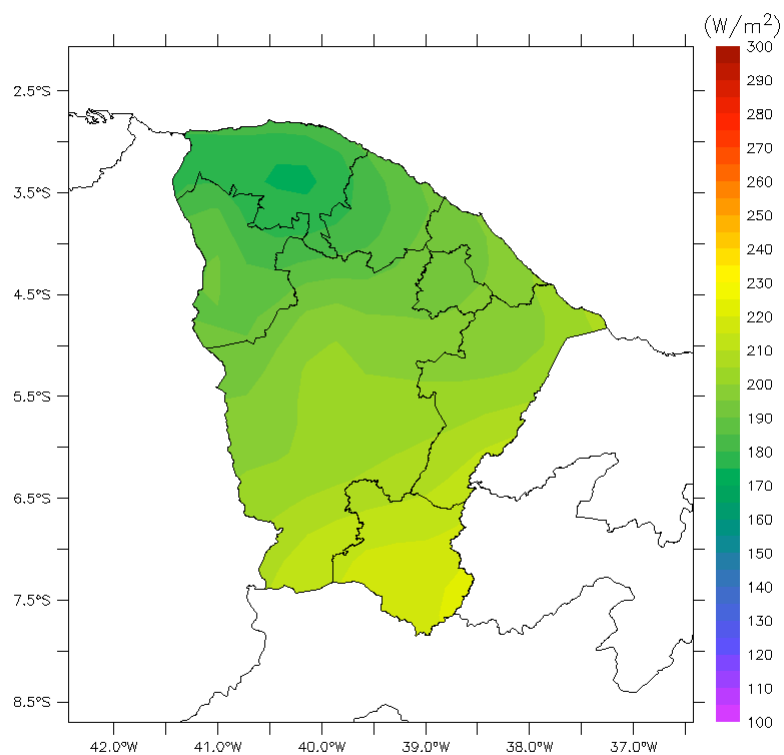


Figura 15. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de MARÇO.

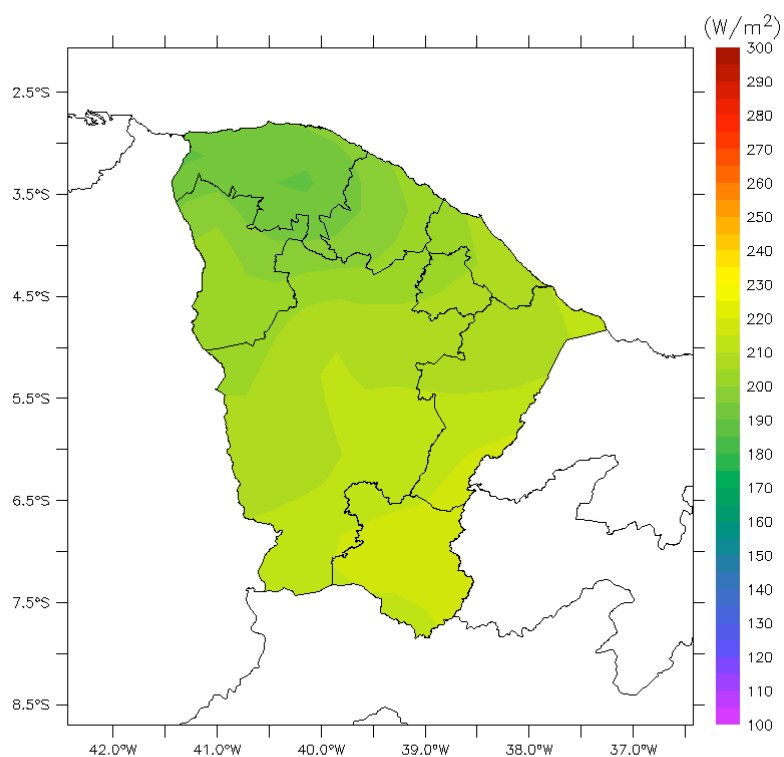


Figura 16. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de ABRIL.

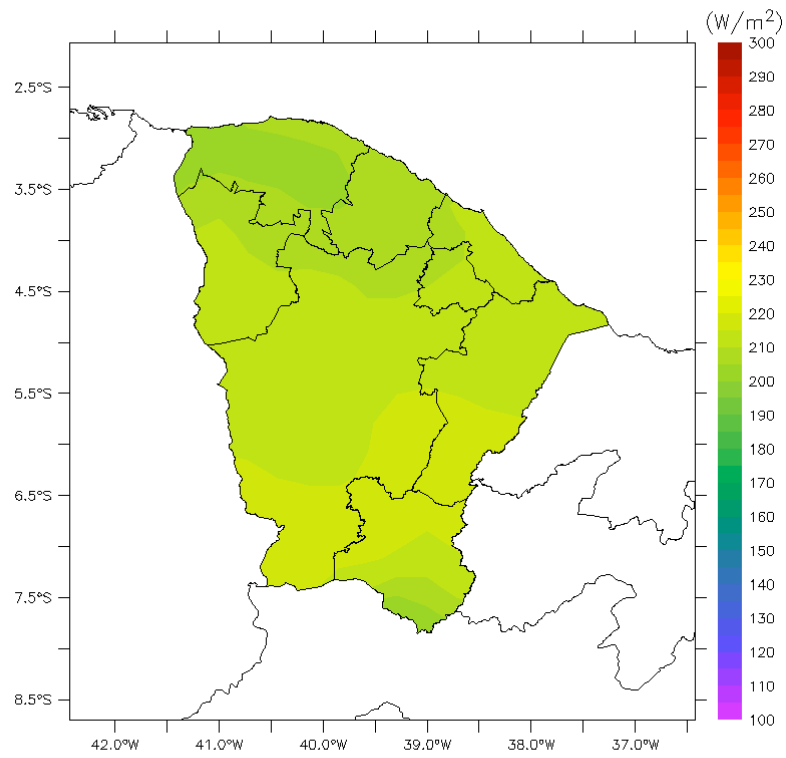


Figura 17. Climatologia da radiação solar (W/m²) para o mês de MAIO.

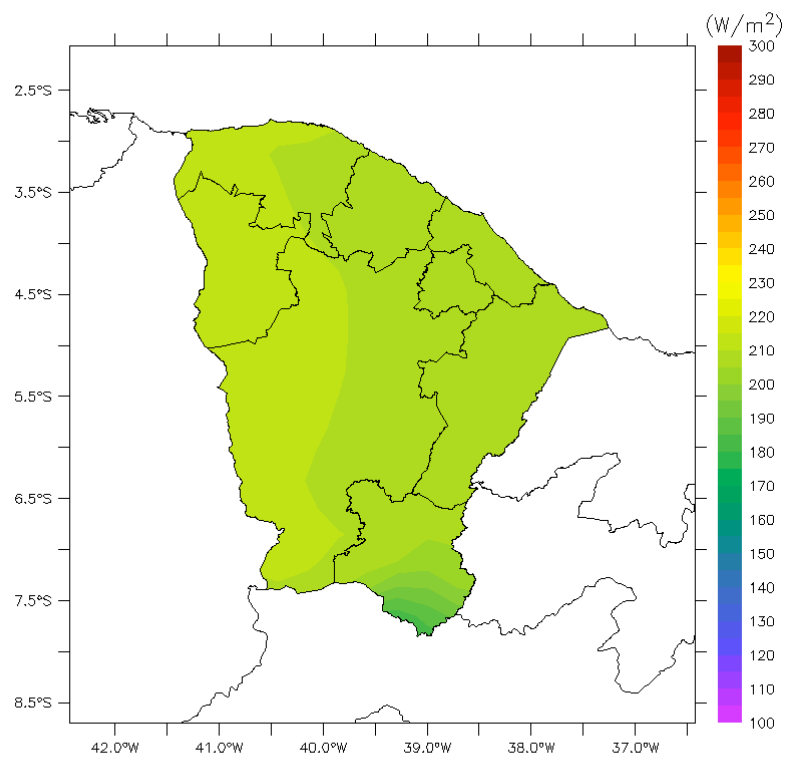


Figura 18. Climatologia da radiação solar (W/m²) para o mês de JUNHO.

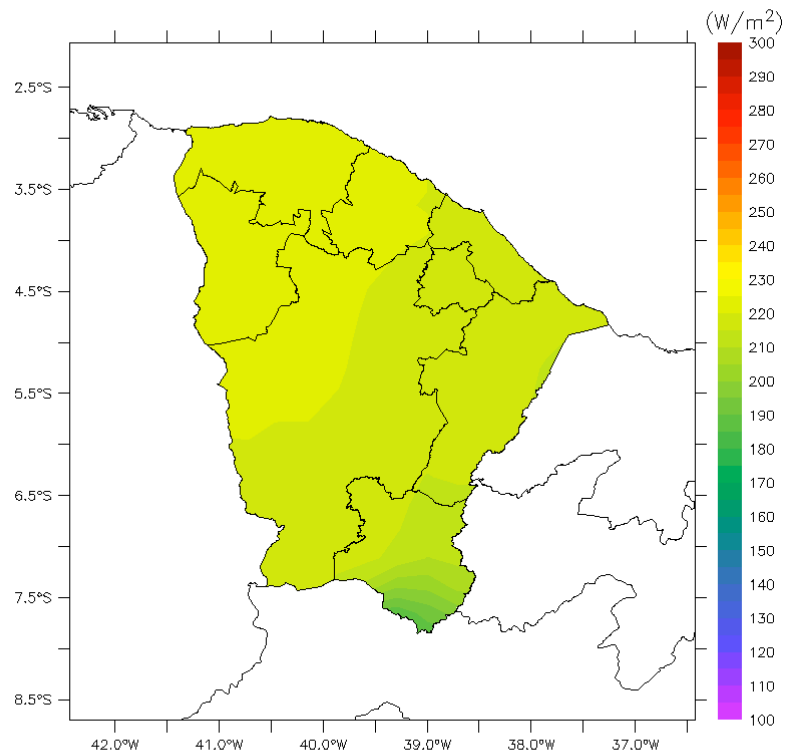


Figura 19. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de JULHO.

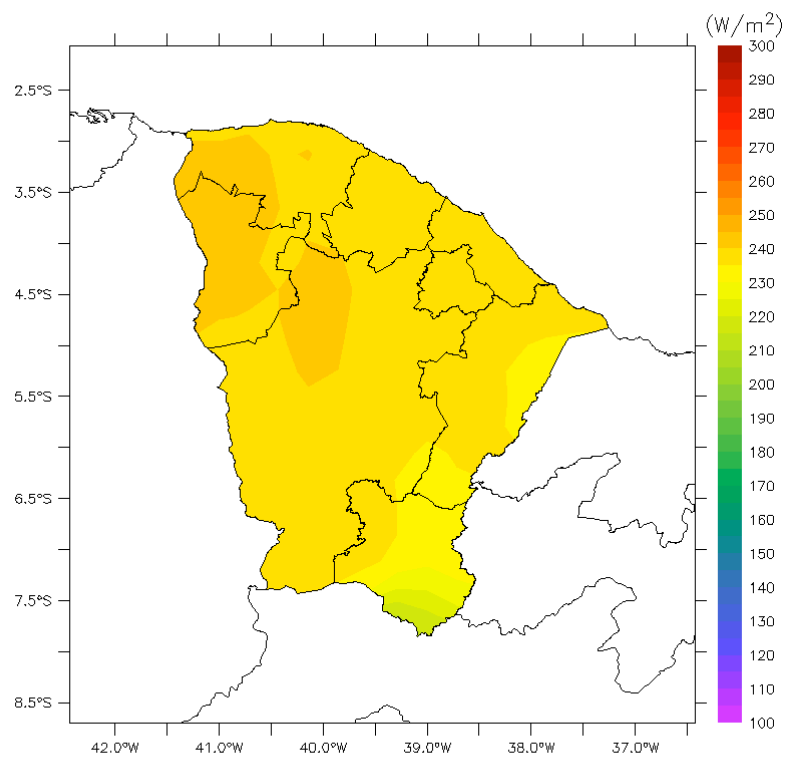


Figura 20. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de AGOSTO.

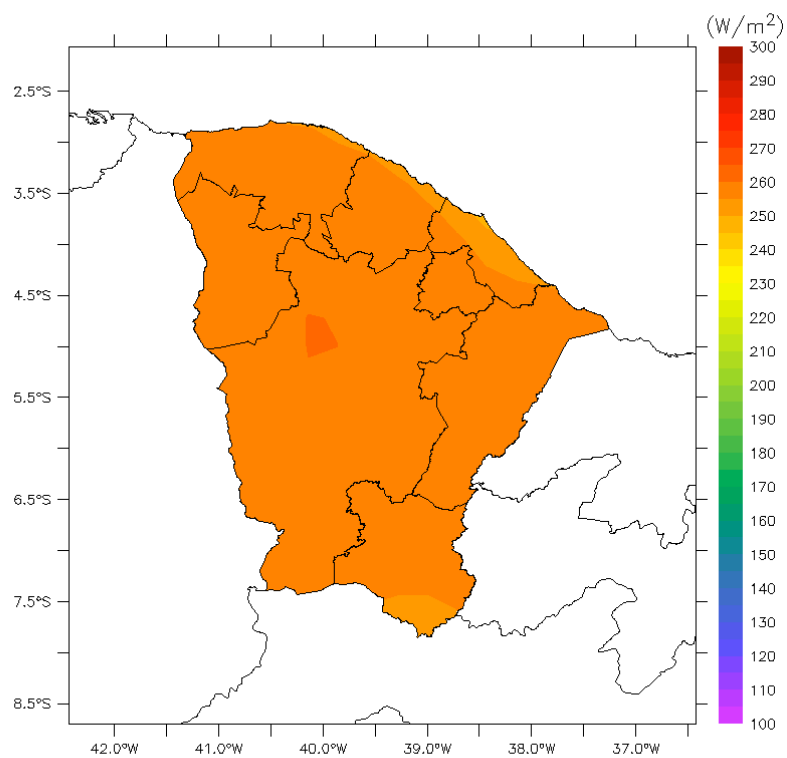


Figura 21. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de SETEMBRO.

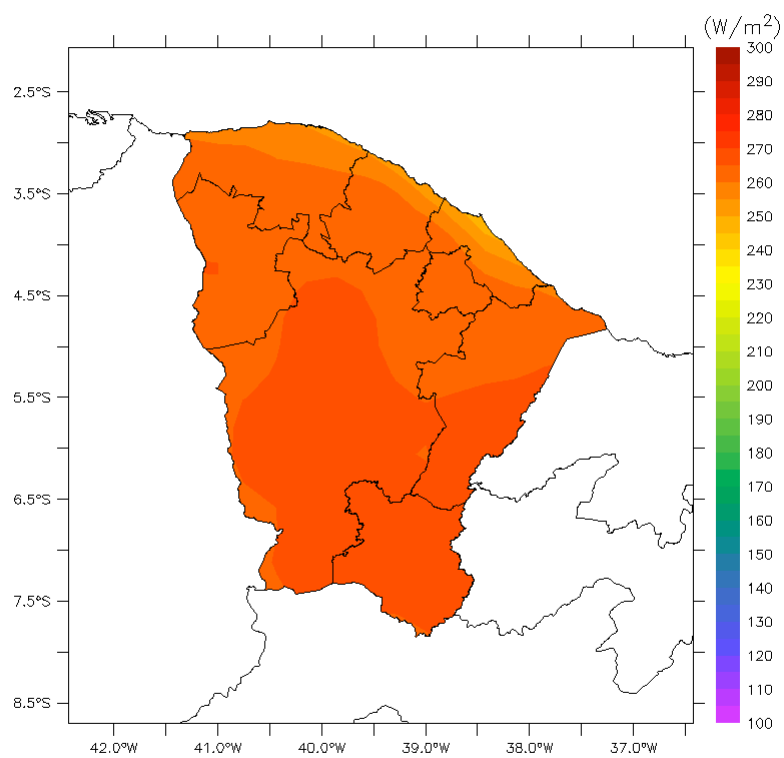


Figura 22. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o mês de OUTUBRO.

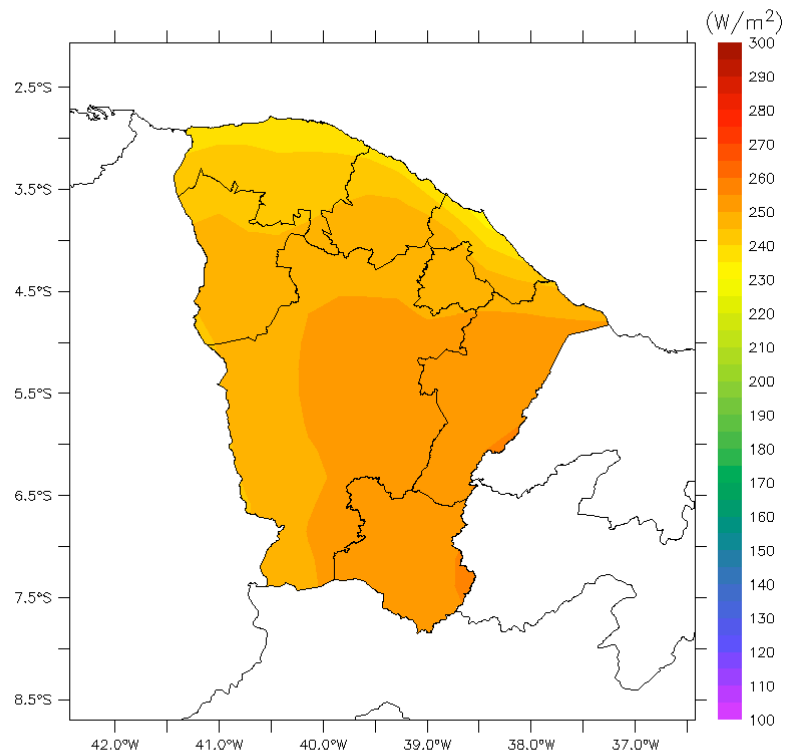


Figura 23. Climatologia da radiação solar (W/m²) para o mês de NOVEMBRO.

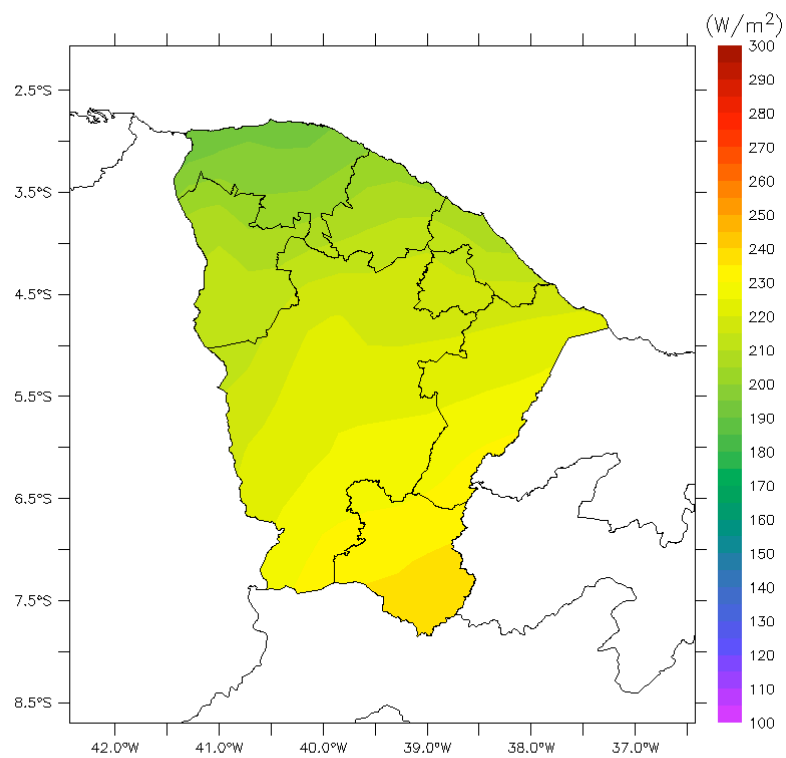


Figura 24. Climatologia da radiação solar (W/m²) para o mês de DEZEMBRO.

4. Mapas de Espalhamento Mensais

A climatologia da radiação solar apresentada na Seção 3 baseia-se na simulação média dos dez membros processados. Conforme foi mencionado, o desvio padrão (espalhamento) dos resultados de cada um desses membros está relacionado à incerteza associada ao prognóstico de um determinado padrão atmosférico. Portanto, quanto maiores forem estas incertezas, maior será o espalhamento.

Assim, as Figuras 25 a 36, que trazem os mapas médios mensais de espalhamento das simulações de radiação solar, mostram que o espalhamento é maior entre os meses de dezembro a maio, justamente entre a pré-estação e o final da quadra chuvosa, período mais propenso a ocorrência de precipitação. Desde que o prognóstico dos sistemas meteorológicos causadores de chuva possui um grau de incerteza, é de esperar que o desvio padrão, ou seja, o espalhamento dos membros das simulações seja maior. Nos meses subsequentes, o espalhamento diminui, tornando a aumentar em novembro, às vésperas da pré-estação chuvosa.

Deste modo, os mapas de espalhamento indicam que durante o período mais seco do ano, quando também se observam os maiores índices de radiação solar, a incerteza em relação às simulações é menor, ou seja, a informação é mais confiável.

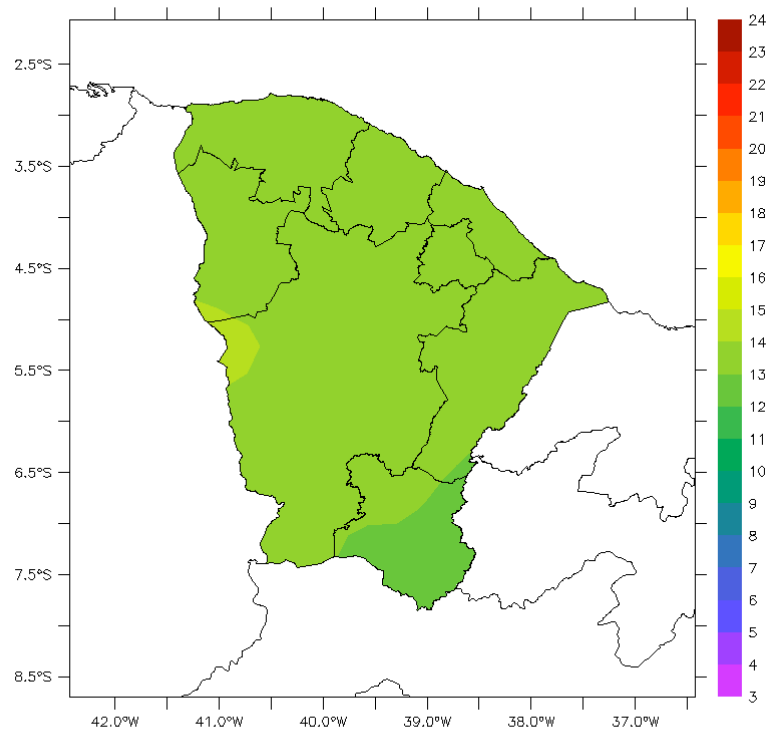


Figura 25. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JANEIRO.

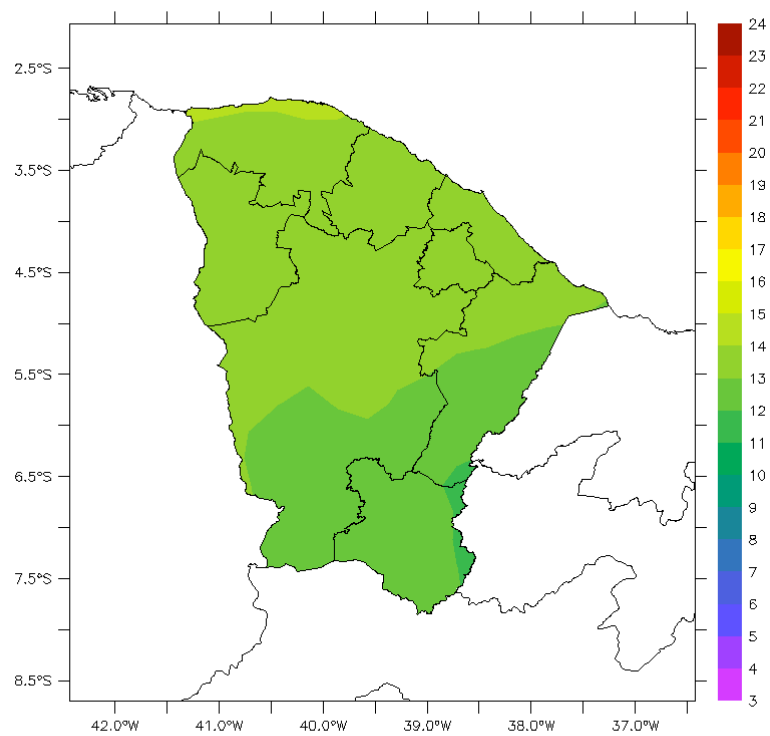


Figura 26. Espalhamento da simulação numérica para o mês de FEVEREIRO.

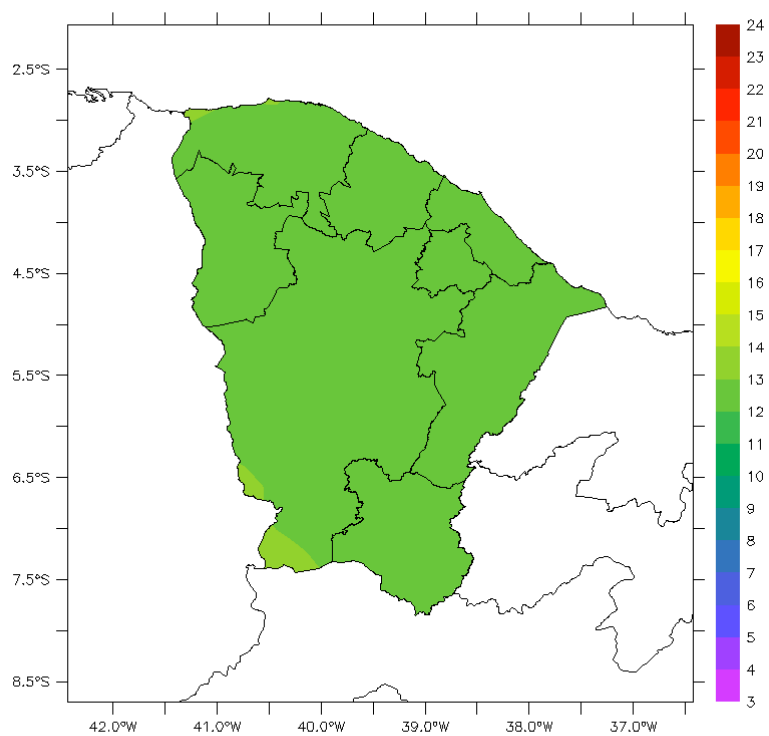


Figura 27. Espalhamento da simulação numérica para o mês de MARÇO.

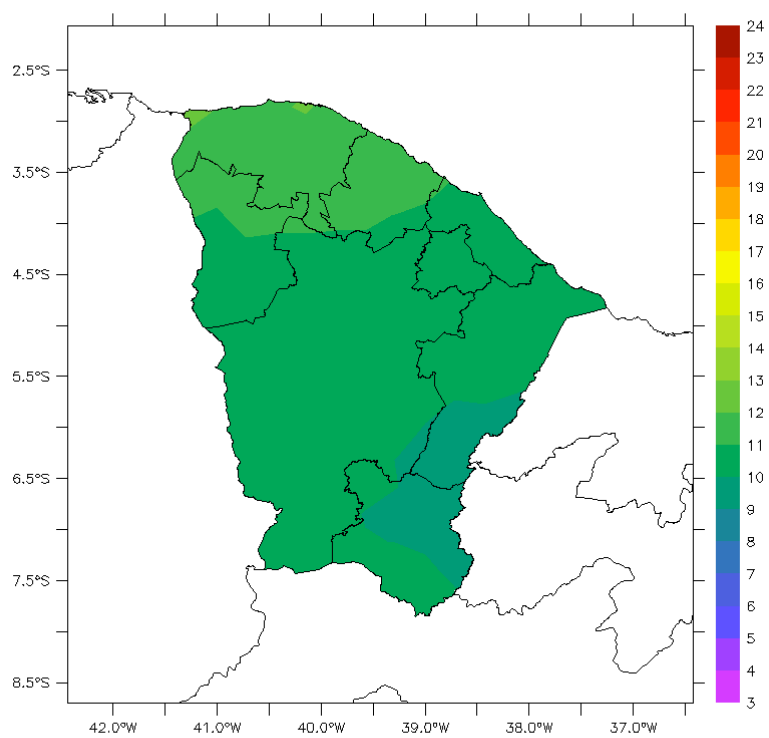


Figura 28. Espalhamento da simulação numérica para o mês de ABRIL.

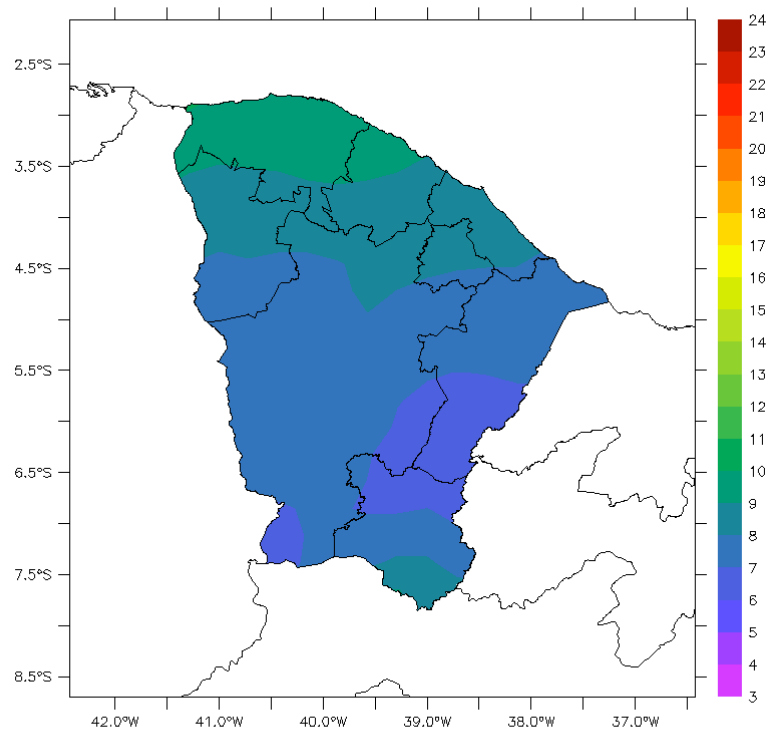


Figura 29. Espalhamento da simulação numérica para o mês de MAIO.

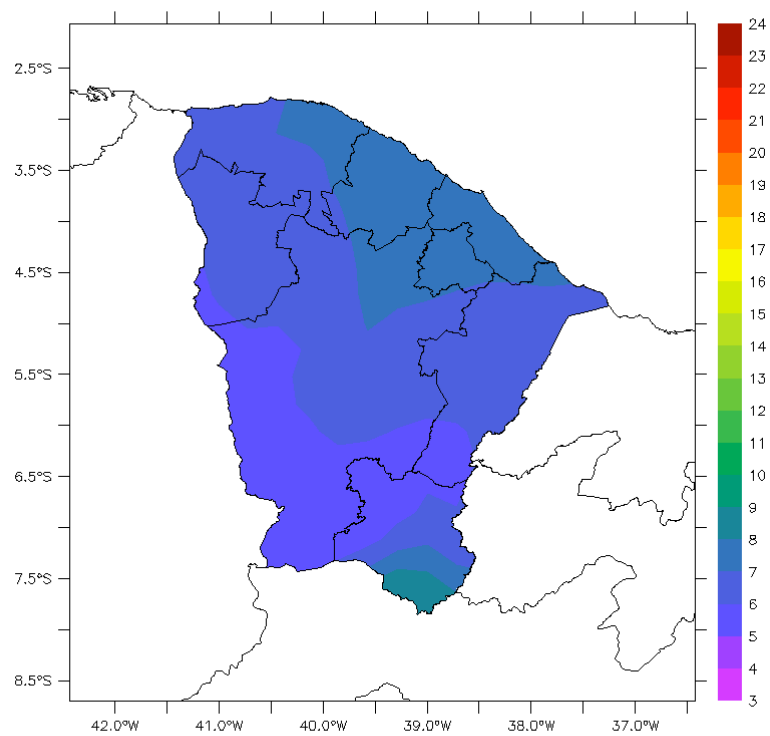


Figura 30. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JUNHO.

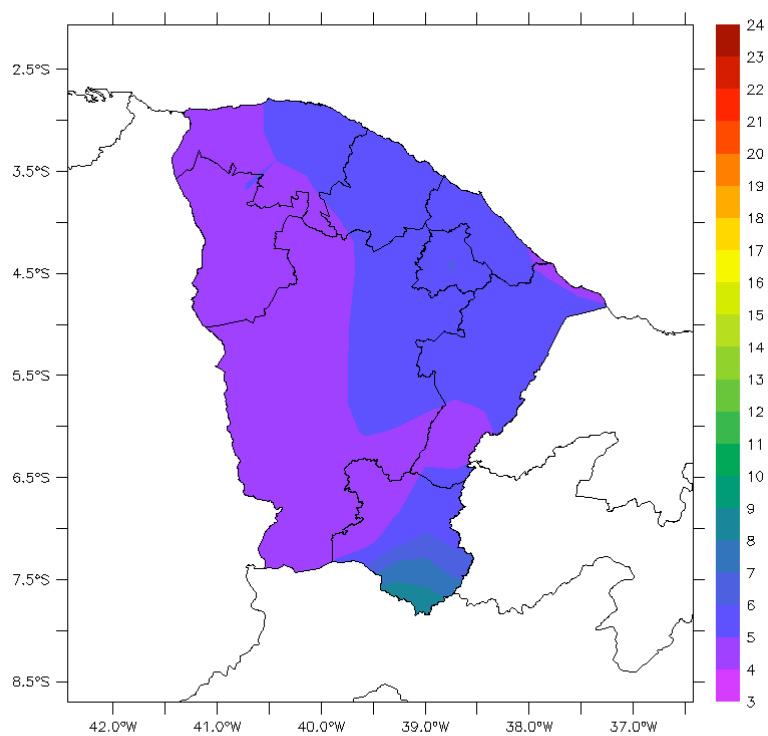


Figura 31. Espalhamento da simulação numérica para o mês de JULHO.

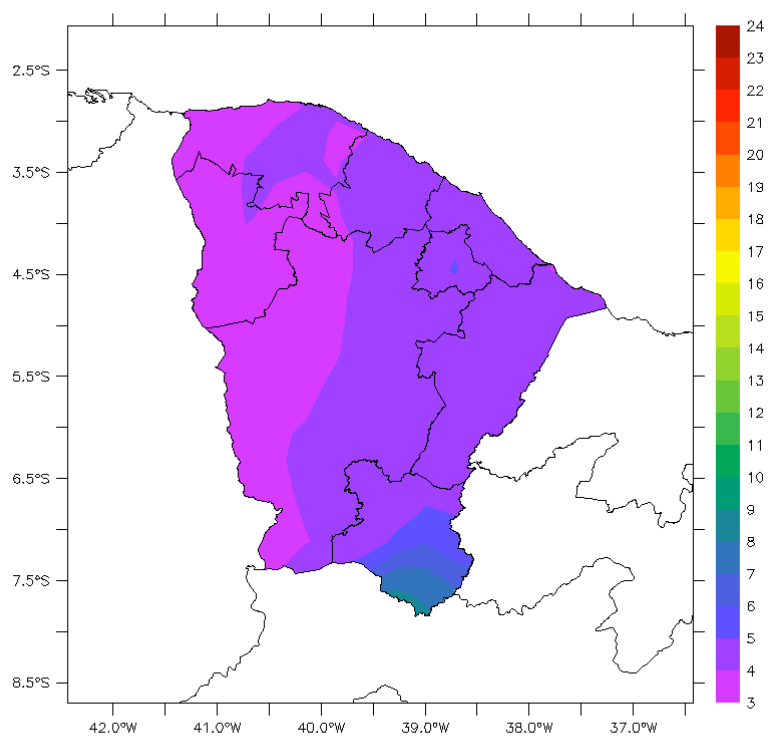


Figura 32. Espalhamento da simulação numérica para o mês de AGOSTO.

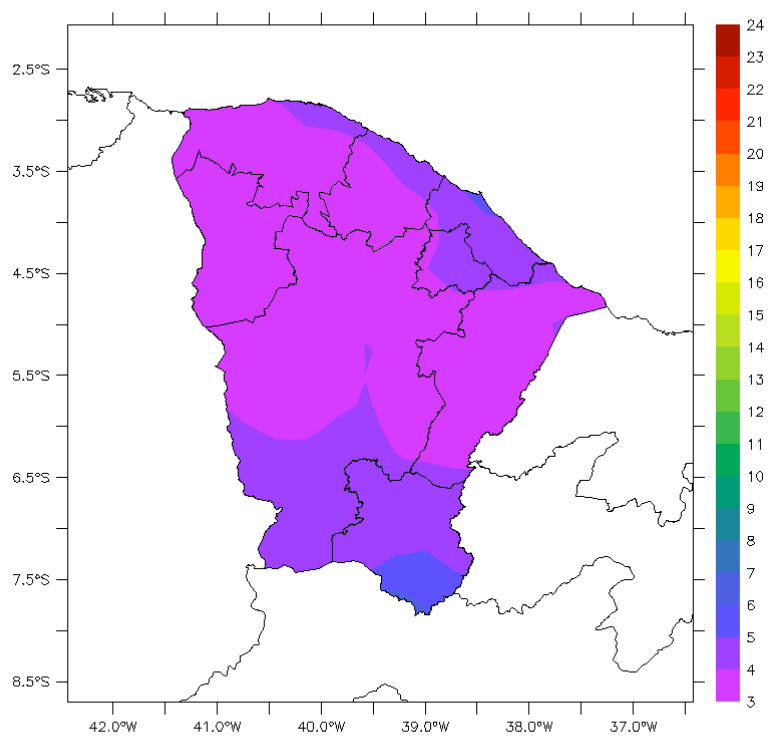


Figura 33. Espalhamento da simulação numérica para o mês de SETEMBRO.

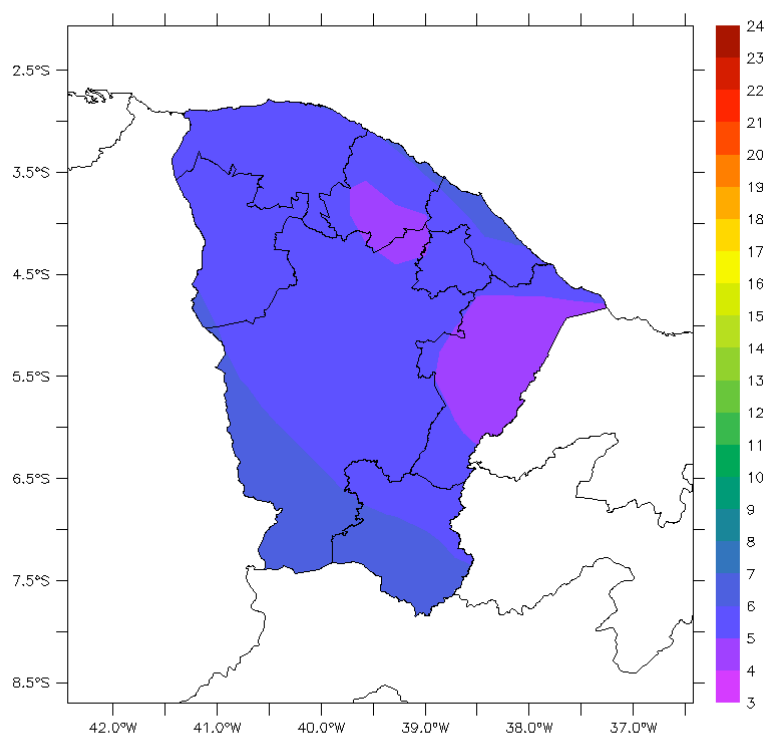


Figura 34. Espalhamento da simulação numérica para o mês de OUTUBRO.

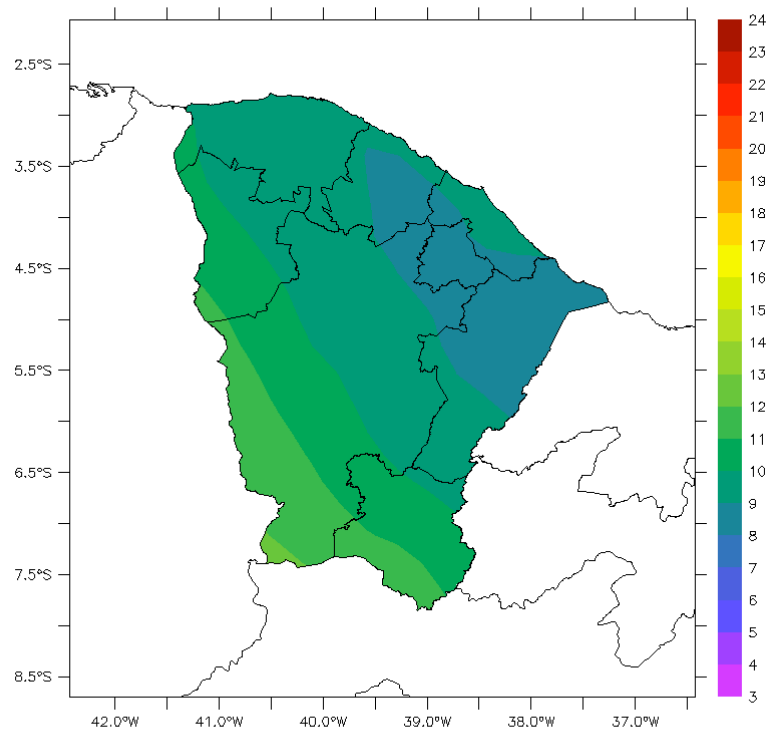


Figura 35. Espalhamento da simulação numérica para o mês de NOVEMBRO.

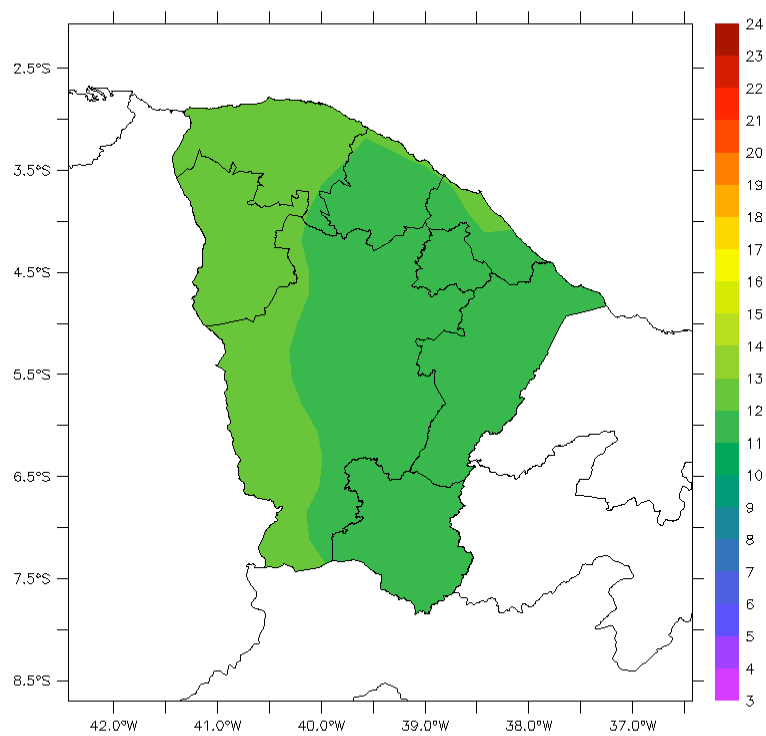


Figura 36. Espalhamento da simulação numérica para o mês de DEZEMBRO.

5. Mapas Solarimétricos para o Quadrimestre FEV-MAR-ABR-MAI

A radiação solar é profundamente afetada pela presença de nuvens, e conforme indicam as climatologias mensais apresentadas na Seção 3, o período chuvoso tende a apresentar valores menores de radiação solar, comparativamente ao restante do ano.

A questão que exploramos nesta seção, é justamente, se a qualidade da quadra chuvosa poderia afetar a radiação solar incidente no Ceará, por exemplo, anos mais chuvosos apresentariam menor incidência de radiação solar do que anos mais secos?

Desta forma, foram elaboradas as médias de radiação solar para o quadrimestre fevereiro, março, abril e maio, que corresponde à estação chuvosa no estado do Ceará, para todos os anos do período de 1963 a 2008. E, a partir das informações de precipitação da FUNCEME, estes anos foram separados conforme a qualidade da estação chuvosa no estado do Ceará, em anos:

NORMAIS (precipitação em torno da média climatológica): 1969, 1971, 1976, 1977, 1978, 1991, 1994, 1997, 1999, 2000, 2003, 2004, 2006, 2007.

CHUVOSOS (precipitação acima da média climatológica): 1963, 1964, 1965, 1967, 1968, 1973, 1974, 1975, 1984, 1985, 1986, 1988, 1989, 1995, 1996, 2008.

SECOS (precipitação abaixo da média climatológica): 1966, 1970, 1972, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1987, 1990, 1992, 1993, 1998, 2001, 2002, 2005.

A avaliação das Figuras 37, 38 e 39 a seguir mostra que, de fato, os anos que apresentam estação chuvosa classificada como SECA, ou seja, com precipitação abaixo da média, tendem a apresentar maior incidência de radiação (Figura 39) quando comparados aos anos NORMAIS (Figura 37) e CHUVOSOS (Figura 38).

Logo, estas informações poderiam ser utilizadas para o planejamento, já que, quando combinadas com a previsão climática gerada anualmente, permitem estimar a potencial incidência de radiação solar durante a estação chuvosa.

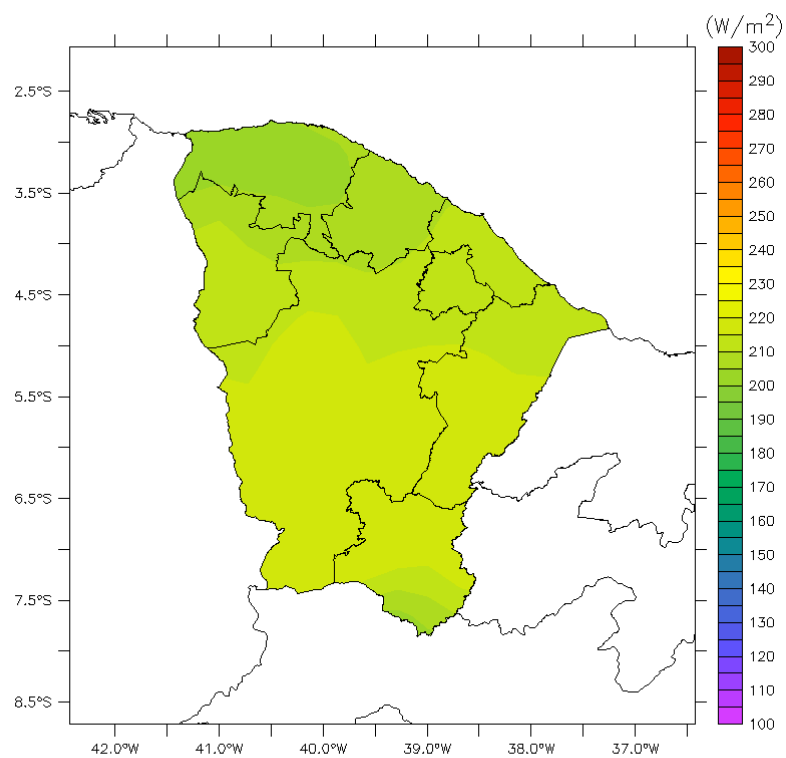


Figura 37. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEV-MAR-ABR-MAI para anos NORMAIS.

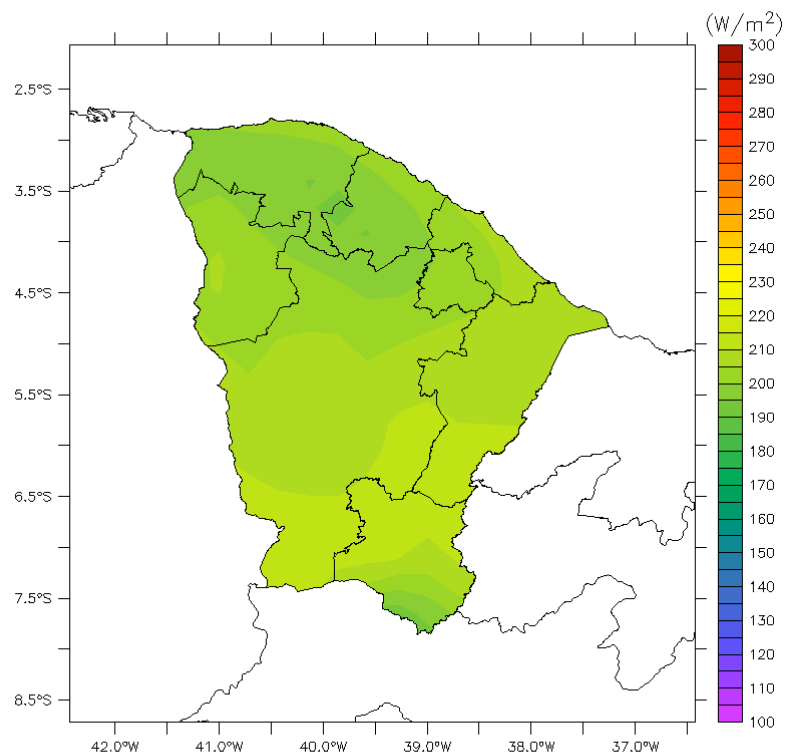


Figura 38. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEV-MAR-ABR-MAI para anos CHUVOSOS.

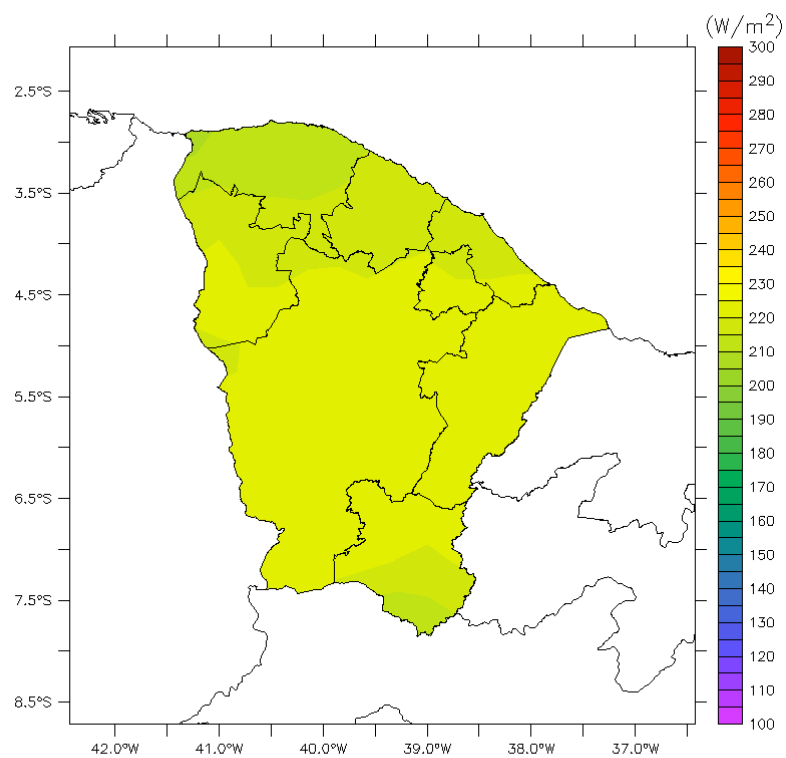


Figura 39. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o quadrimestre FEB-MAR-ABR-MAI para anos SECOS.

6. Mapas Solarimétricos para o Semestre JUN-JUL-AGO-SET-OUT-NOV

O semestre junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro corresponde ao período da pós-estação chuvosa e se configura como a época mais seca do ano. Embora os meses de junho e julho, principalmente, possam apresentar precipitações consideráveis devido a influências de distúrbios ondulatórios de leste, que costumam ocasionar chuvas no setor leste da região Nordeste do Brasil, conforme apresentado na Seção 3, este é o período em que a incidência de radiação solar é maior.

Ao elaborar as médias para este semestre e classificá-los em função da qualidade da estação chuvosa (fevereiro, março, abril e maio) conforme utilizada na seção 5, o que se pretende é verificar se o comportamento da estação chuvosa poderia afetar a incidência da radiação solar durante o período mais seco do ano.

O que se nota é que a incidência da radiação solar no semestre independe da condição observada na quadra chuvosa, assim, as Figuras 40, 41 e 42 mostram variações mínimas entre si, prevalecendo valores de radiação solar superiores aos observados na estação chuvosa.

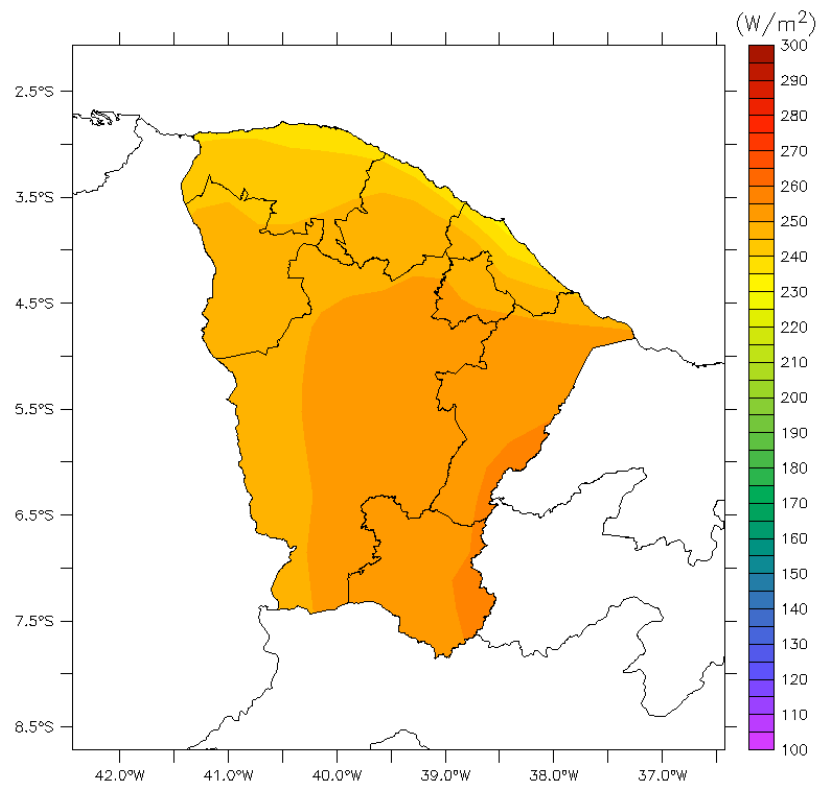


Figura 40. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET-OUT-NOV para anos NORMAIS.

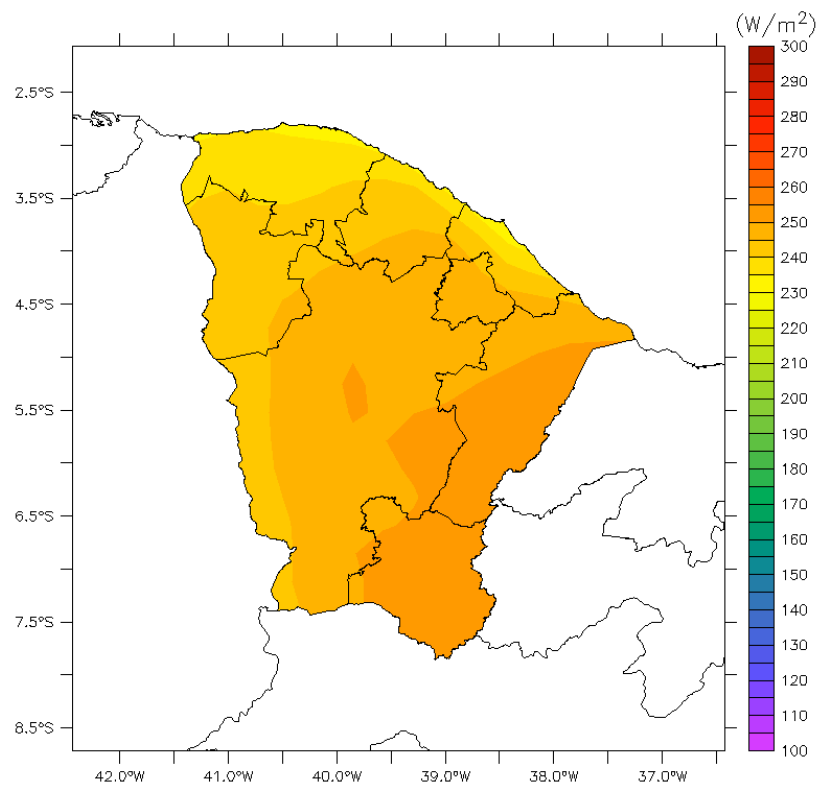


Figura 41. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET-OUT-NOV para anos CHUVOSOS.

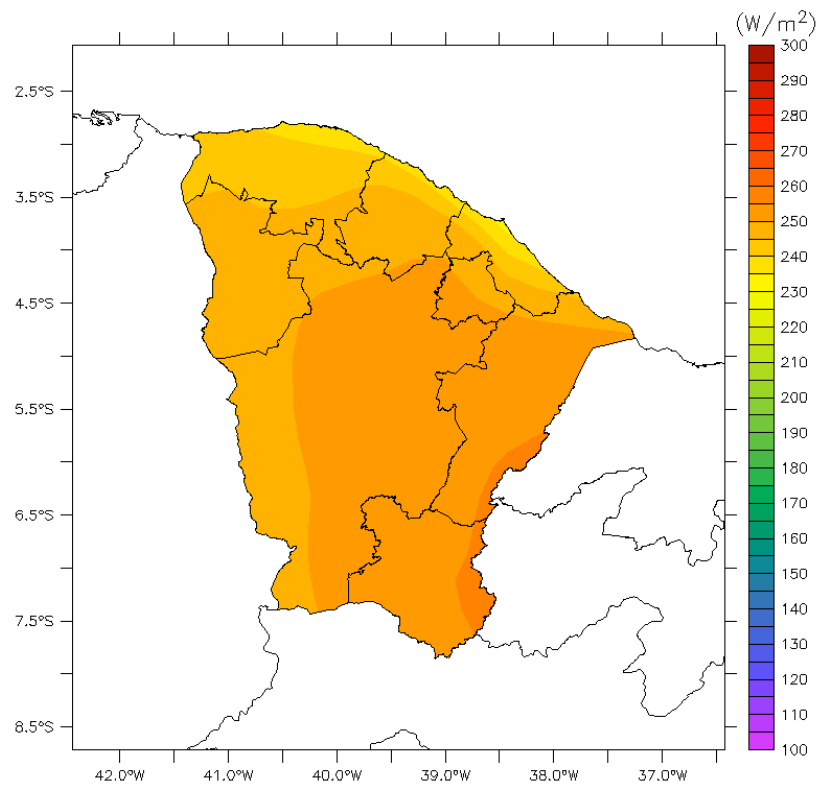


Figura 42. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o semestre JUN-JUL-AGO-SET-OUT-NOV para anos SECOS.

7. Mapas Solarimétricos para o Bimestre DEZ-JAN

Dando continuidade à avaliação da influência da qualidade da estação chuvosa, separamos o bimestre dezembro e janeiro que corresponde ao período da pré-estação chuvosa, e segue um padrão semelhante ao da quadra chuvosa, com menor incidência de radiação solar, principalmente, no setor norte do estado.

As figuras desta seção foram elaboradas em função da classificação da qualidade da estação chuvosa (fevereiro, março, abril e maio) já utilizada na seção 5.

A análise mostra que o comportamento da radiação solar neste bimestre e na quadra chuvosa são independentes. Assim, as Figuras 43, 44 e 45 mostram variações mínimas entre si, prevalecendo apenas o padrão geral de mínimos de radiação solar no setor norte do estado.

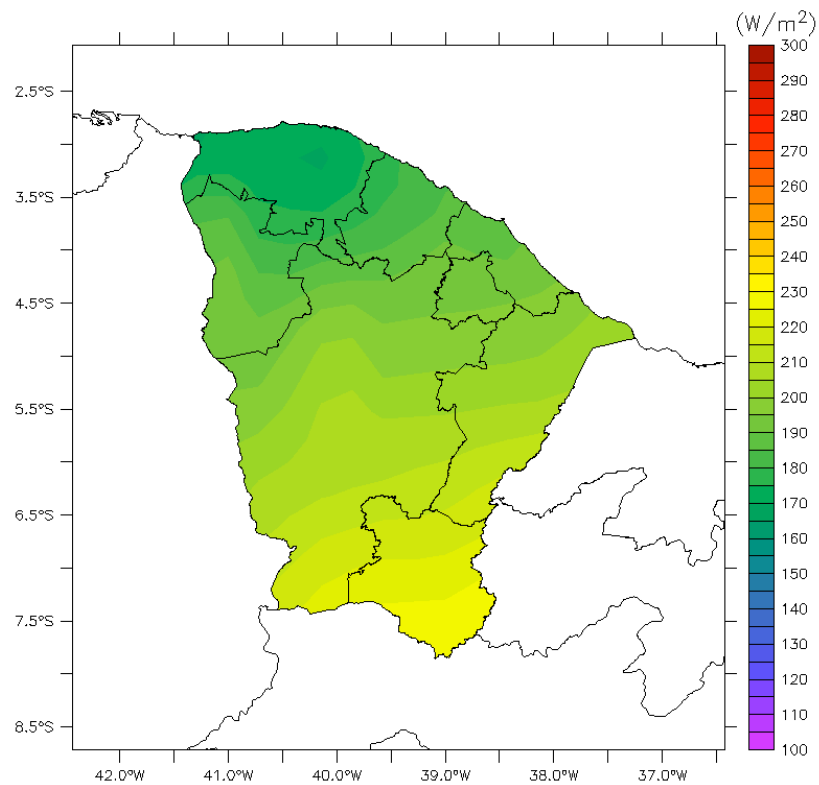


Figura 43. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos NORMAIS.

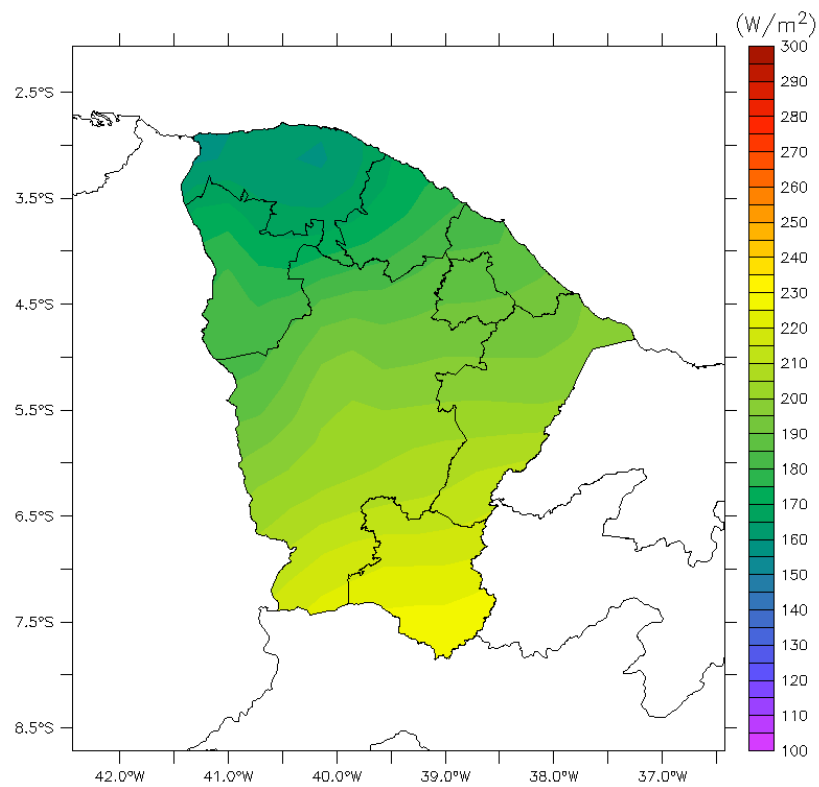


Figura 44. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos CHUVOSOS.

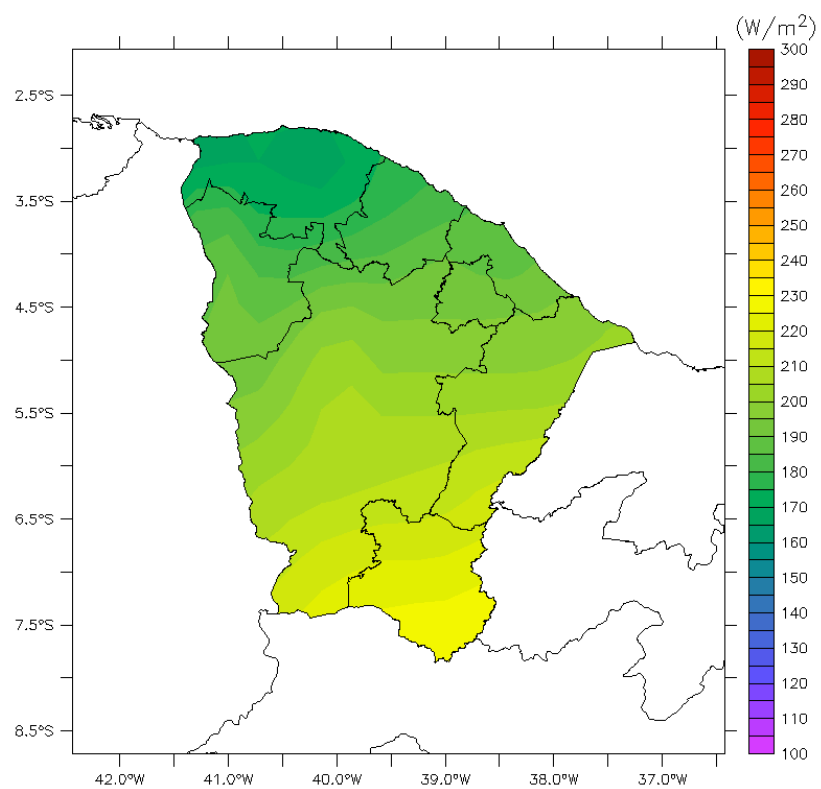


Figura 45. Climatologia da radiação solar (W/m^2) para o bimestre DEZ-JAN para anos SECOS.

8. Mapas Solarimétricos Mensais para os Anos de 1963 a 2008

Embora a climatologia apresentada na Seção 3 ilustre o comportamento da incidência de radiação solar ao longo do ano, é evidente que cada ano apresenta suas particularidades, mesmo que sua estação chuvosa tenha sido classificada dentro de um mesmo grupo (normal, chuvoso ou seco).

Assim, a seguir são apresentados mapas solarimétricos mensais para cada um dos anos do período das simulações. Nas figuras, a ordem dos mapas é a seguinte:

JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO
ABRIL	MAIO	JUNHO
JULHO	AGOSTO	SETEMBRO
OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO

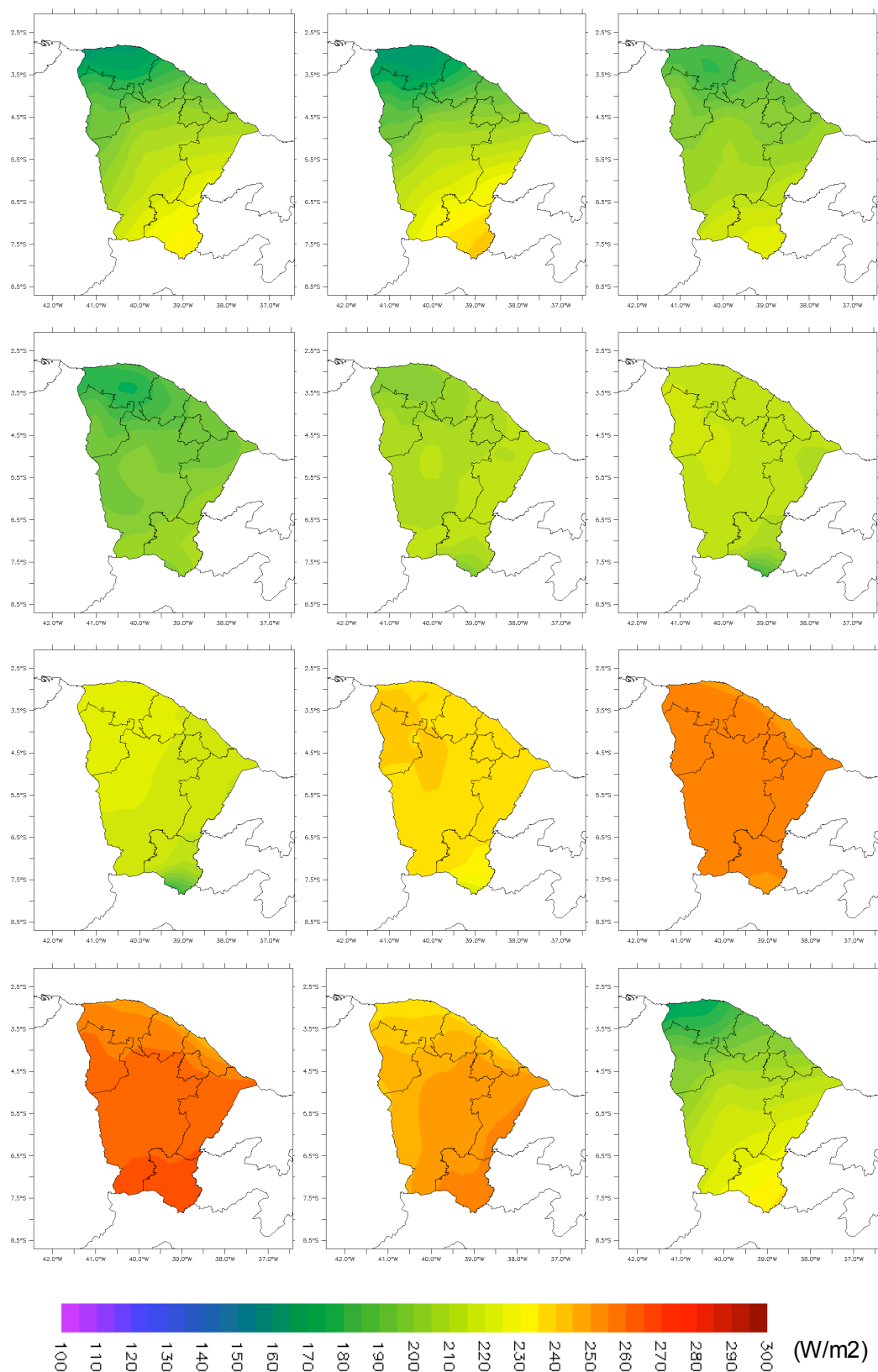


Figura 46. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1963.

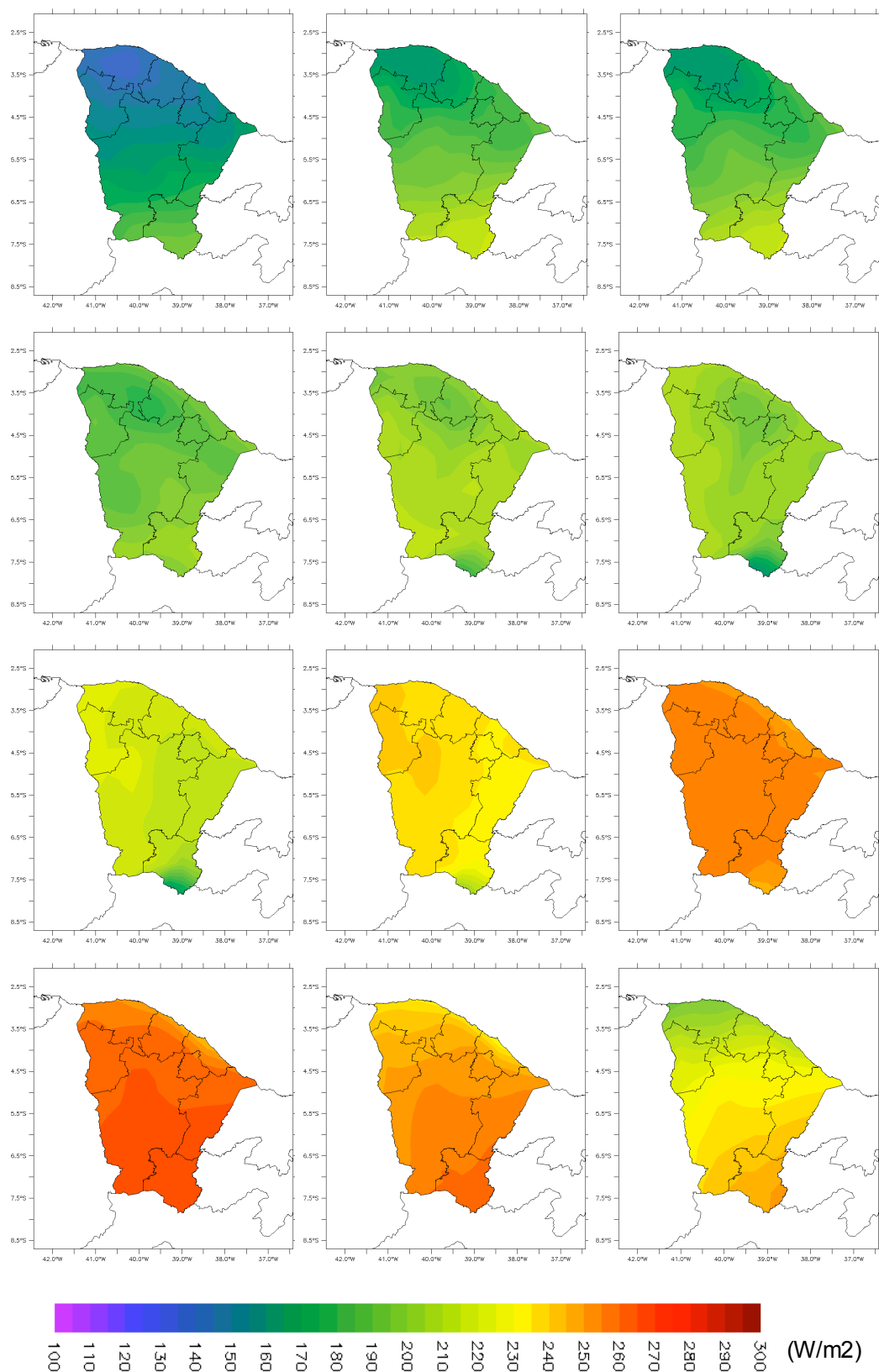


Figura 47. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1964.

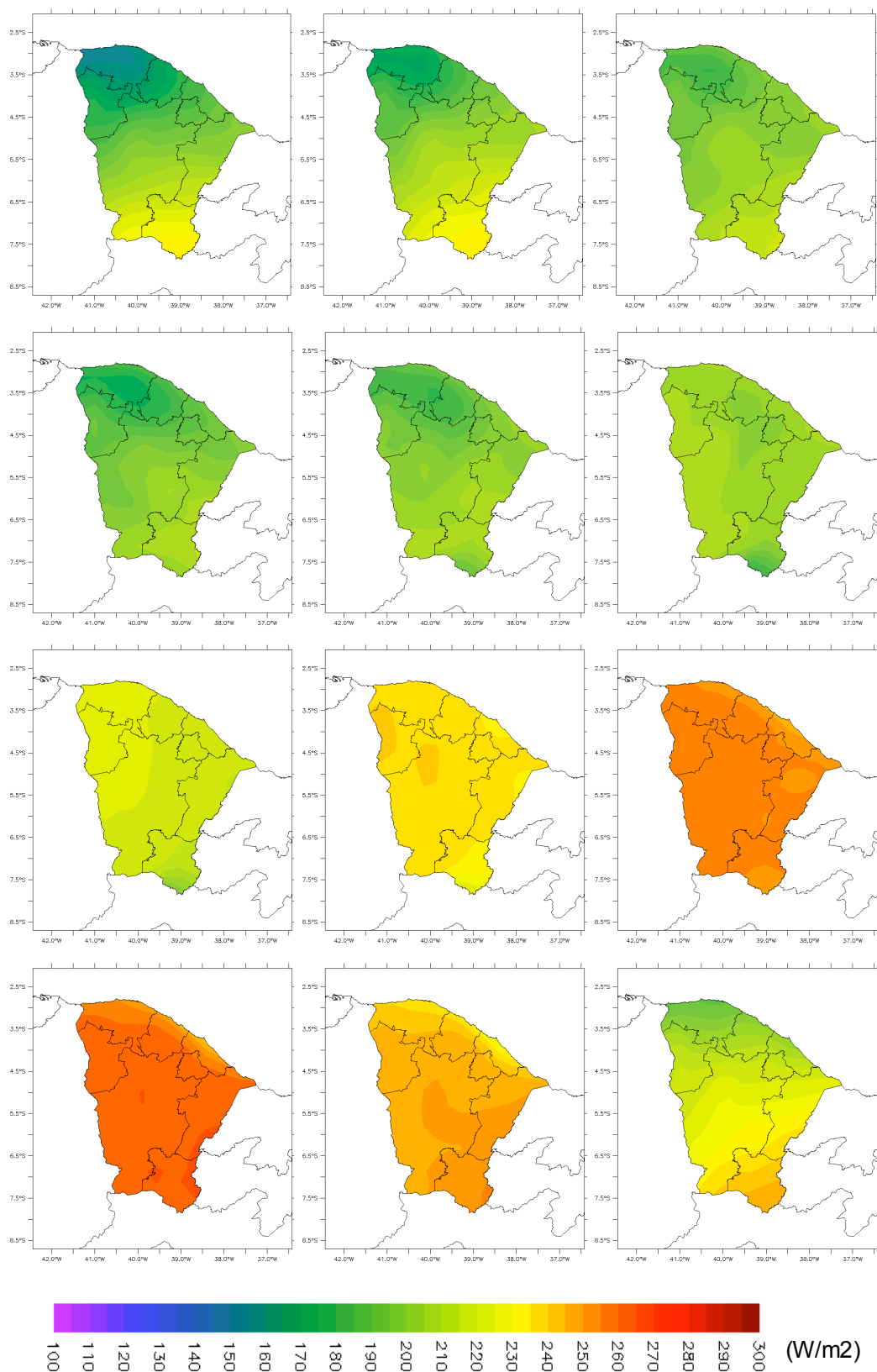


Figura 48. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1965.

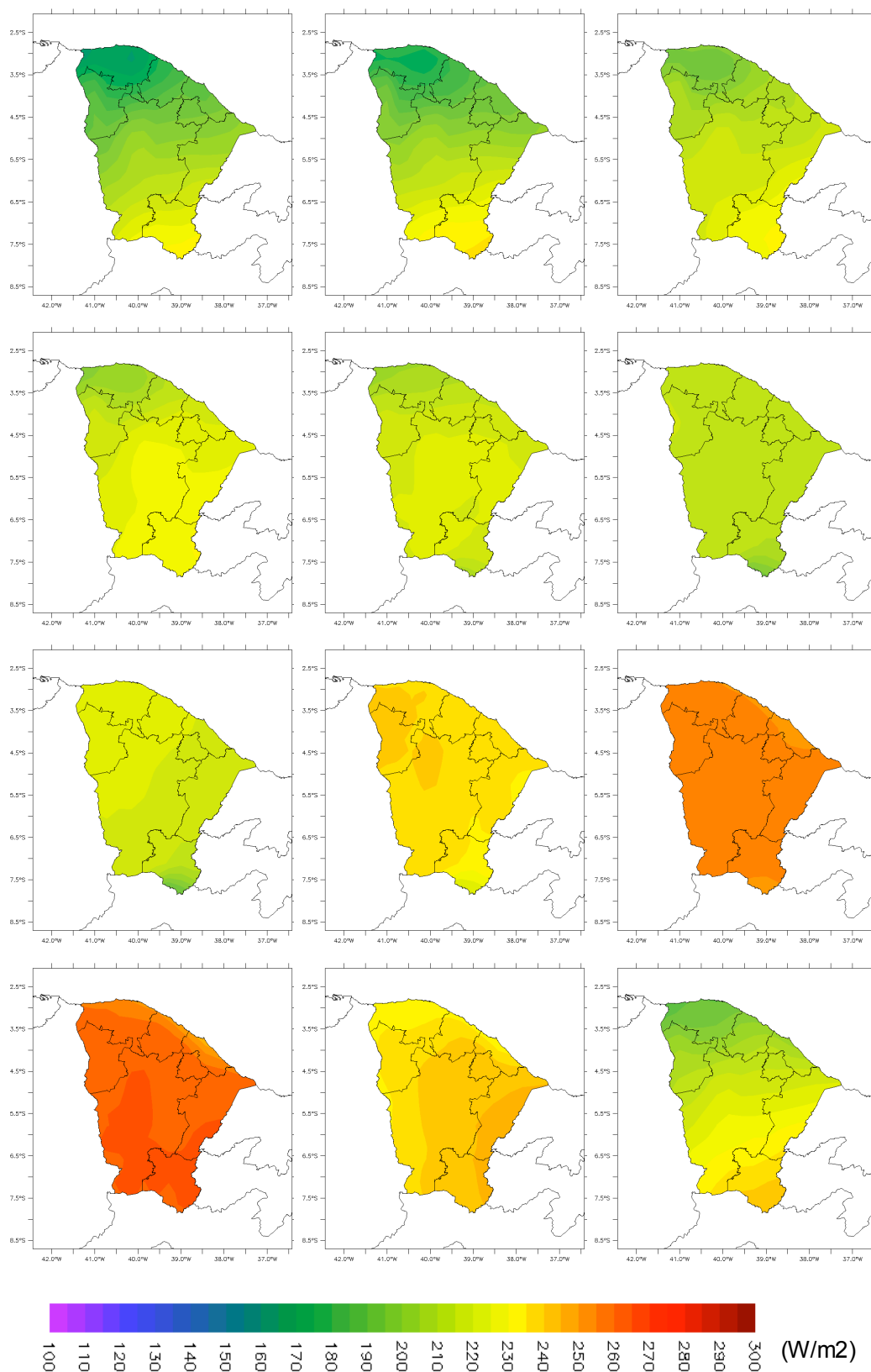


Figura 49. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1966.

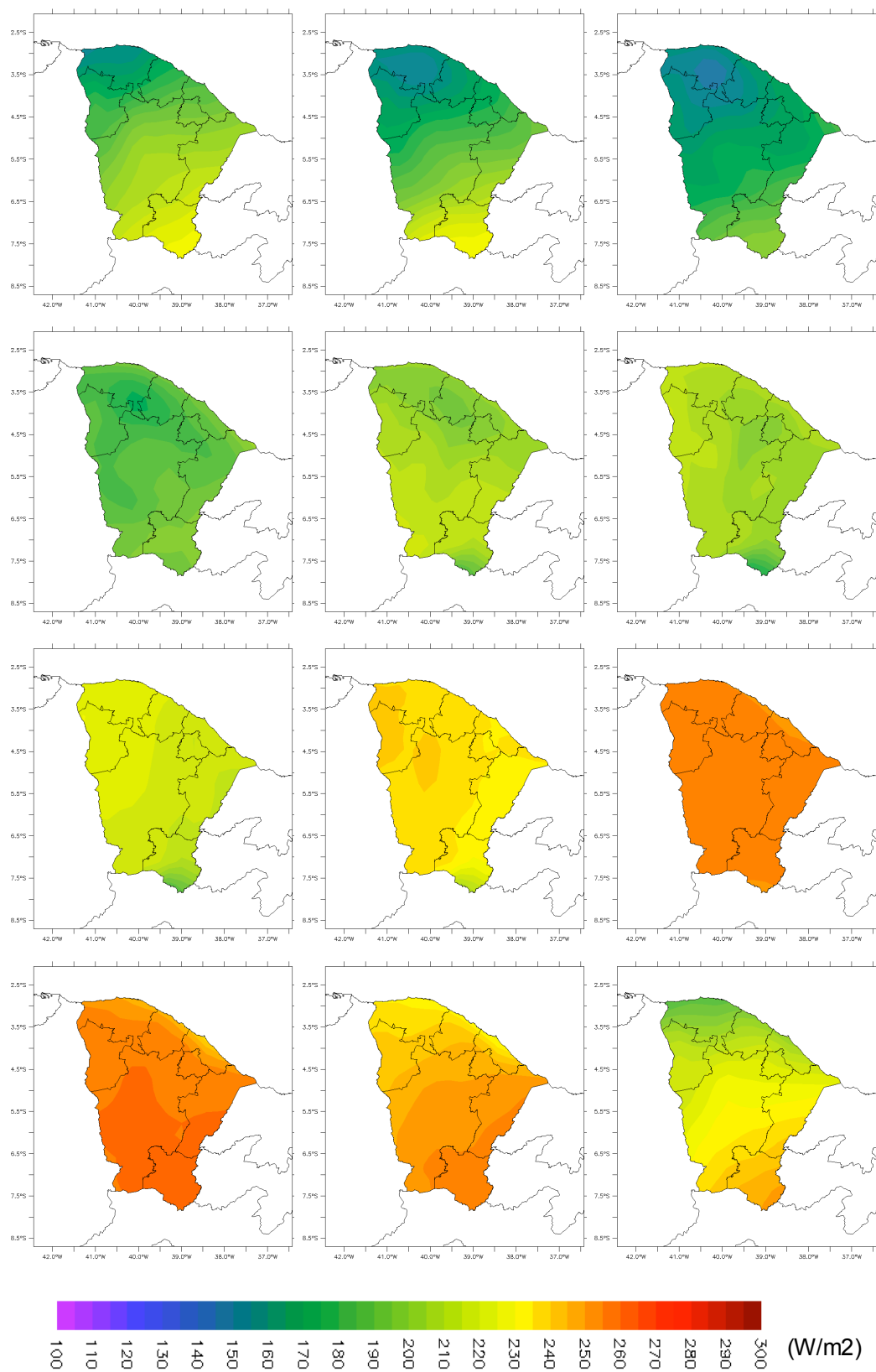


Figura 50. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1967.

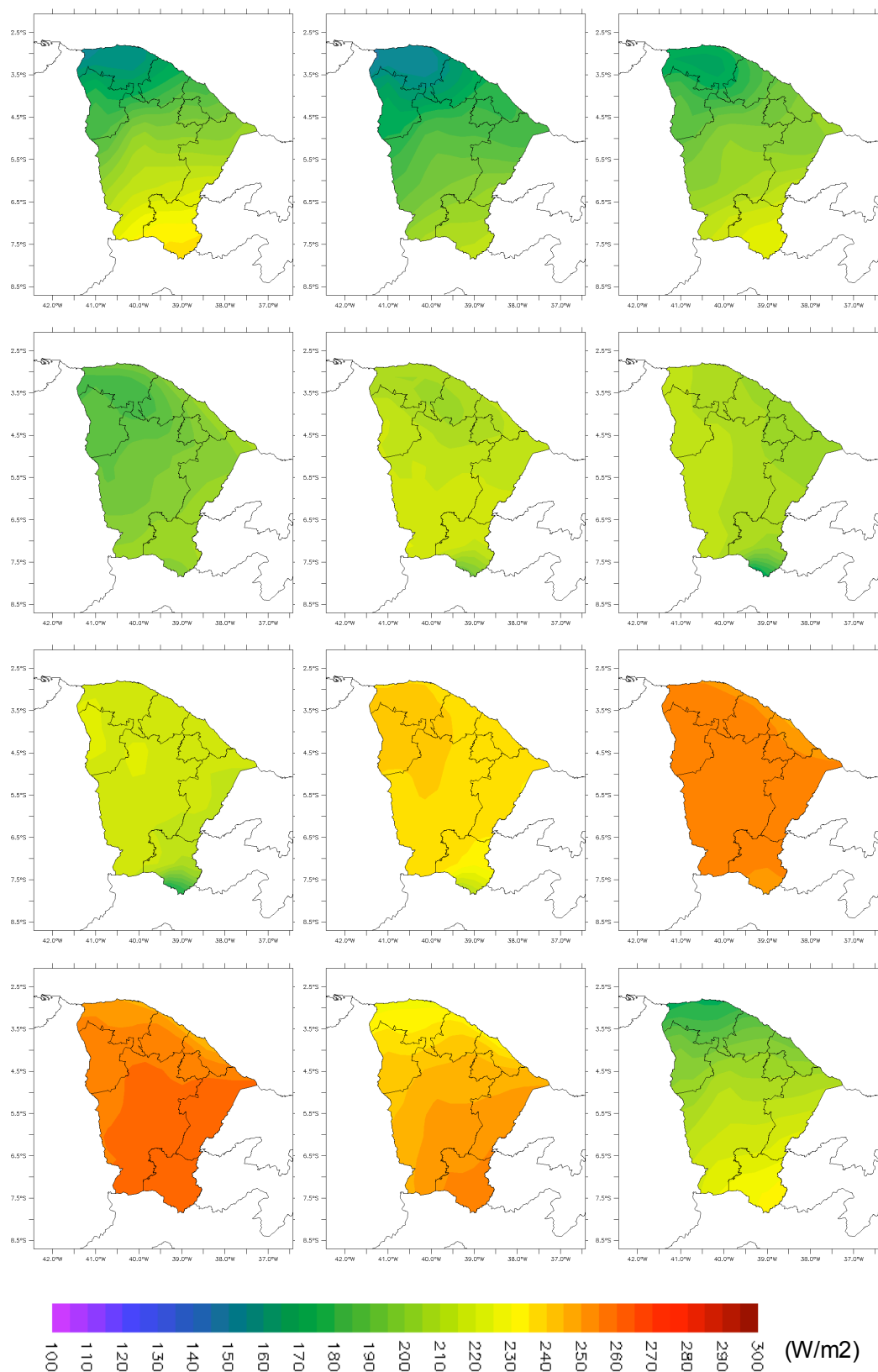


Figura 51. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1968.

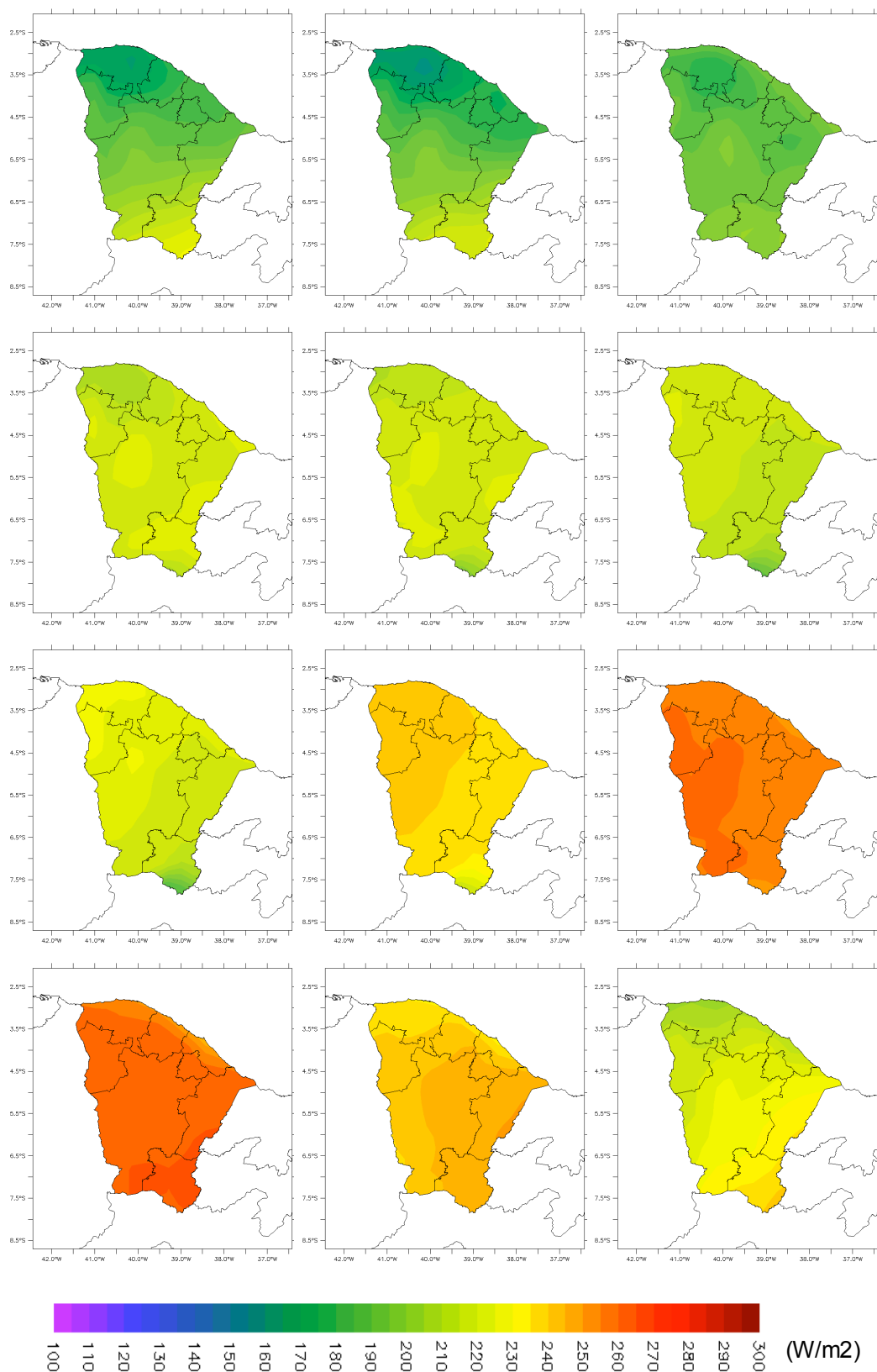


Figura 52. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1969.

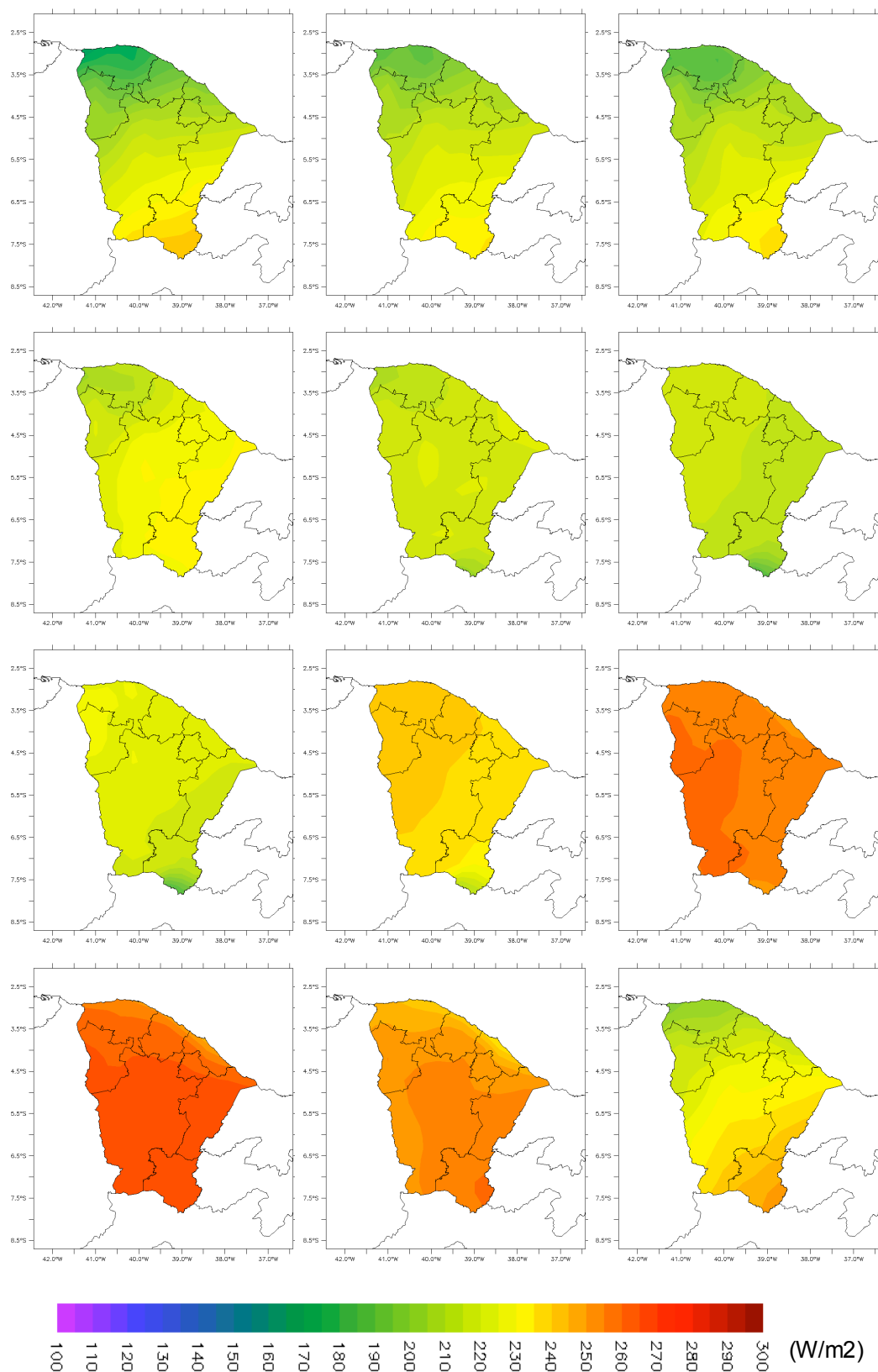


Figura 53. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1970.

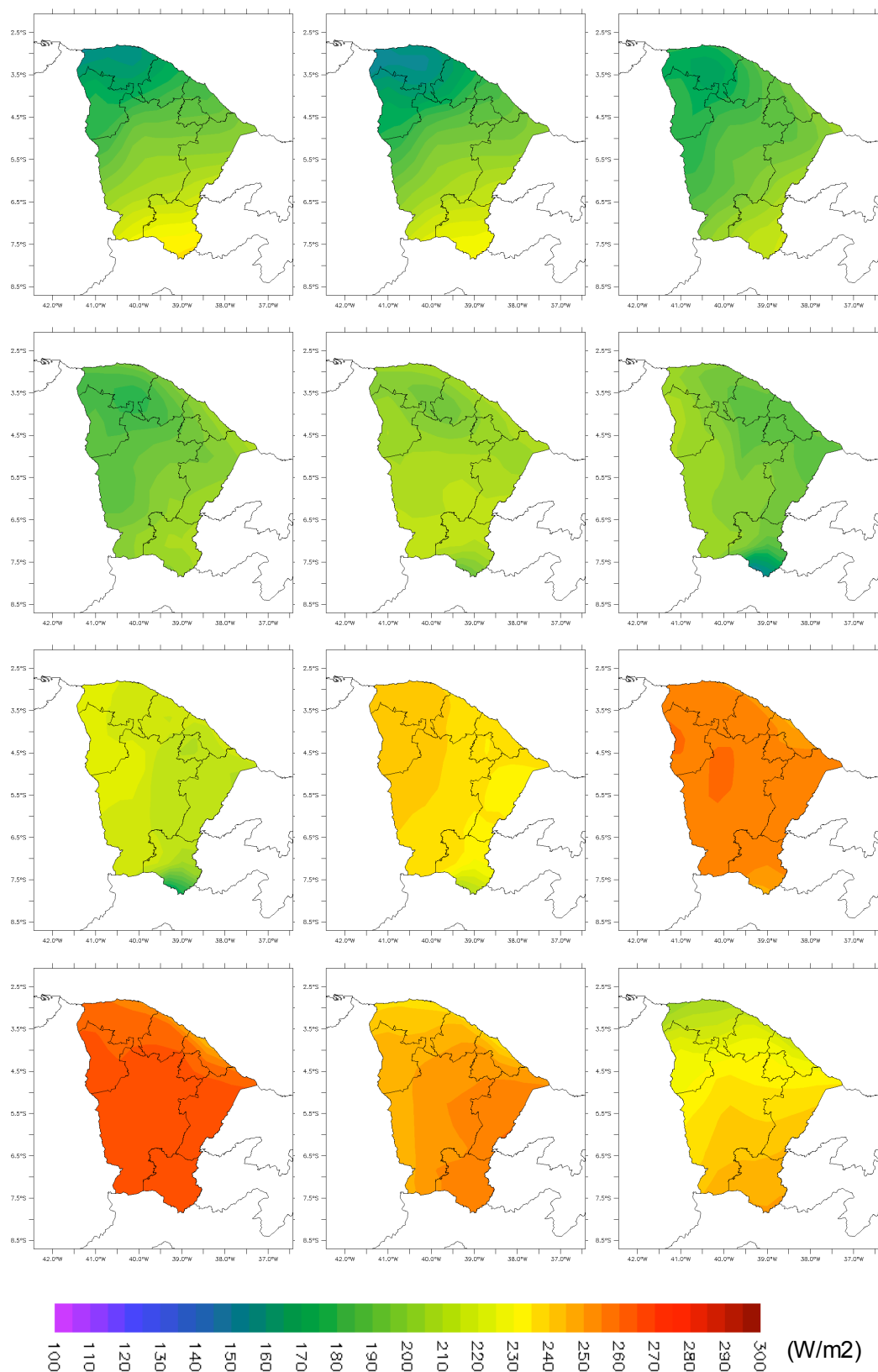


Figura 54. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1971.

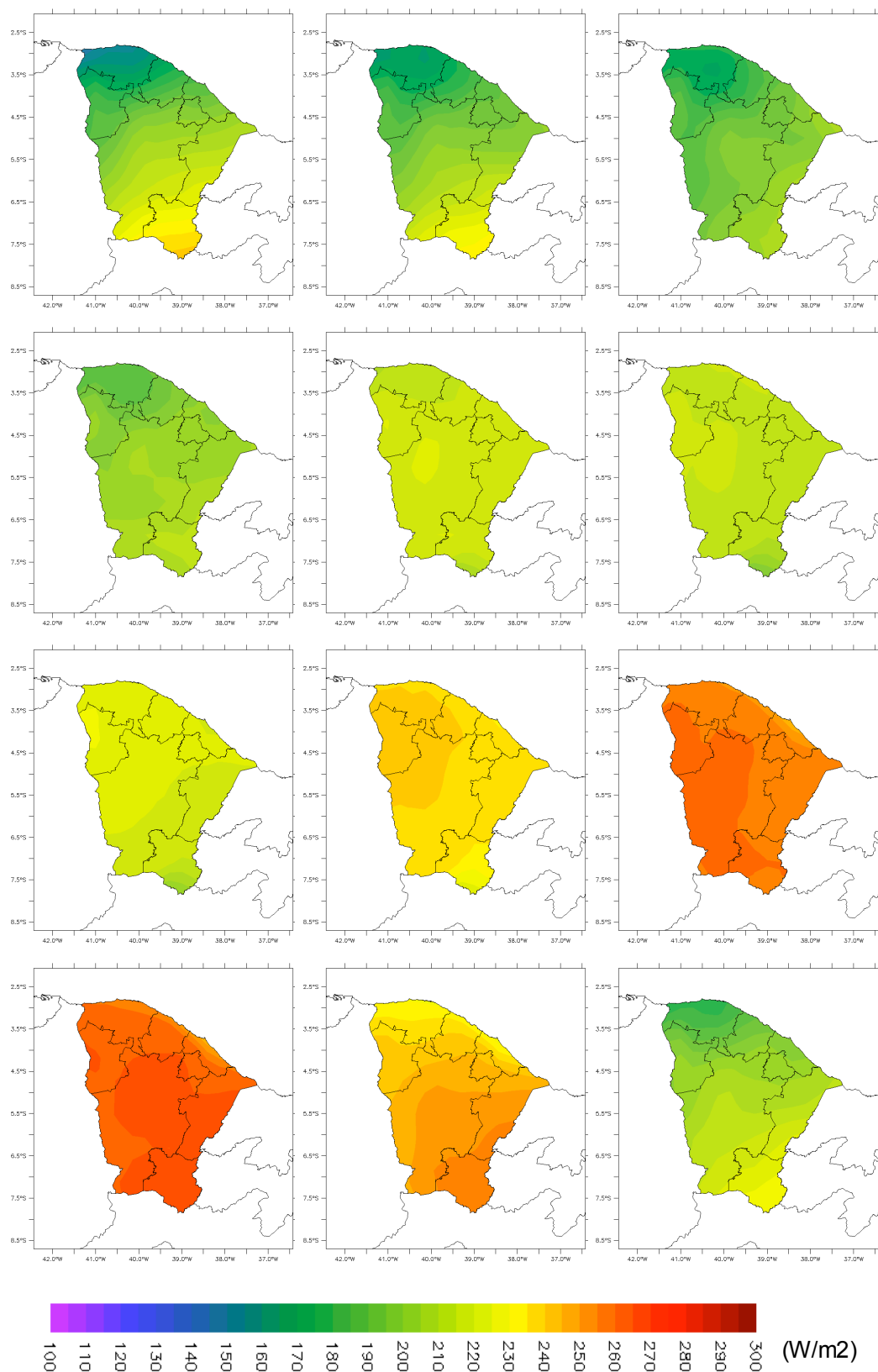


Figura 55. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1972.

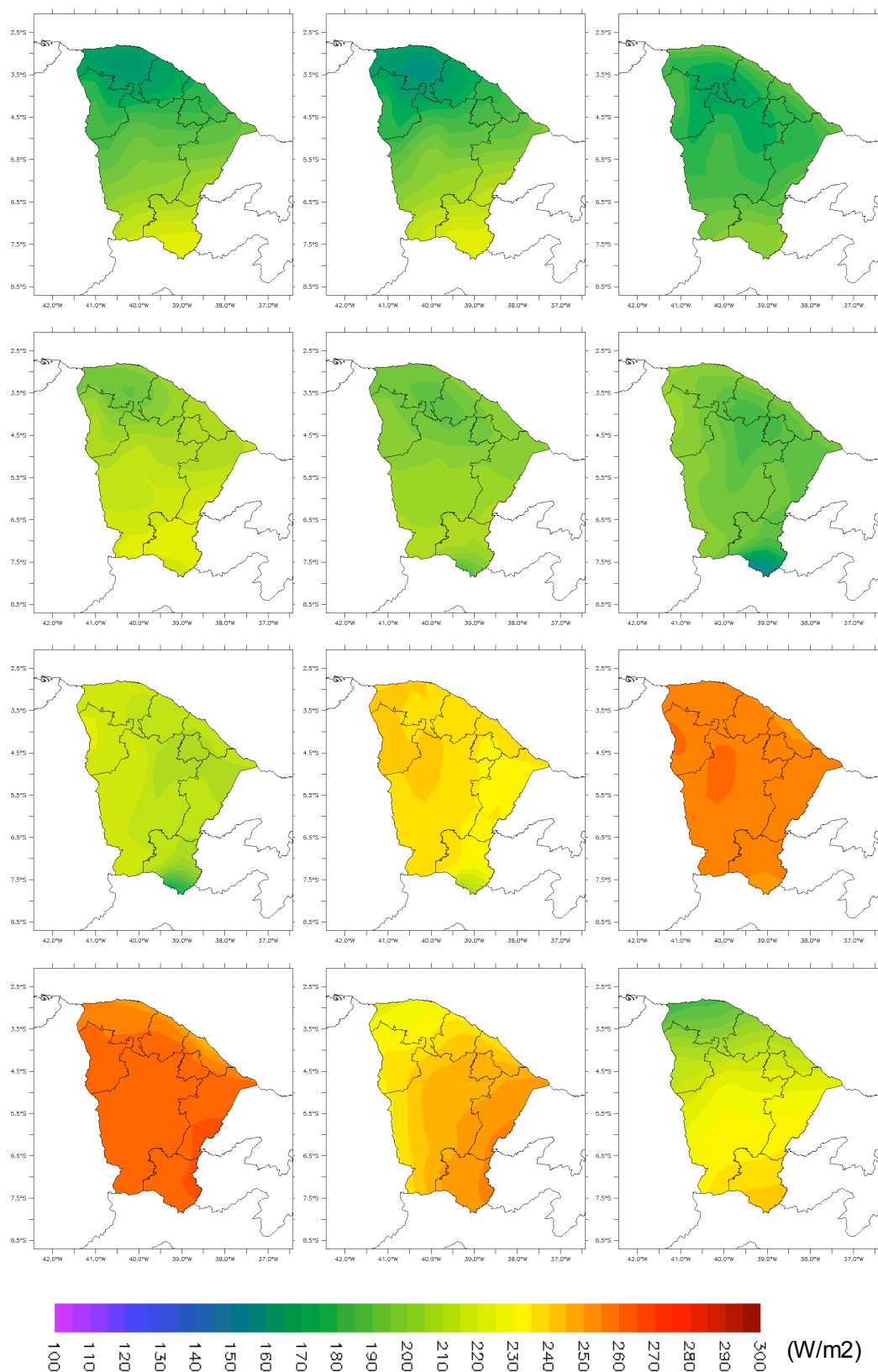


Figura 56. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1973.

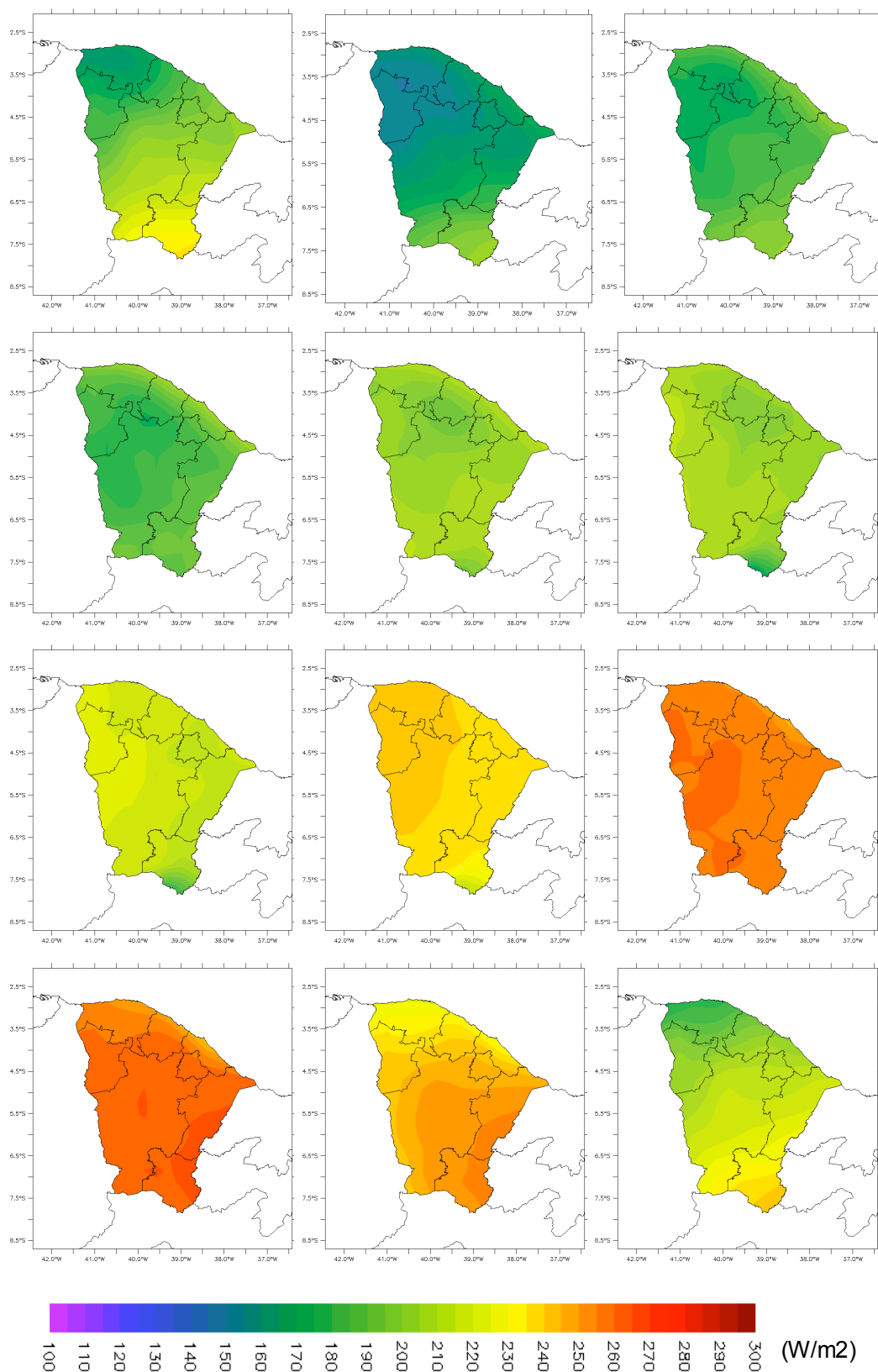


Figura 57. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1974.

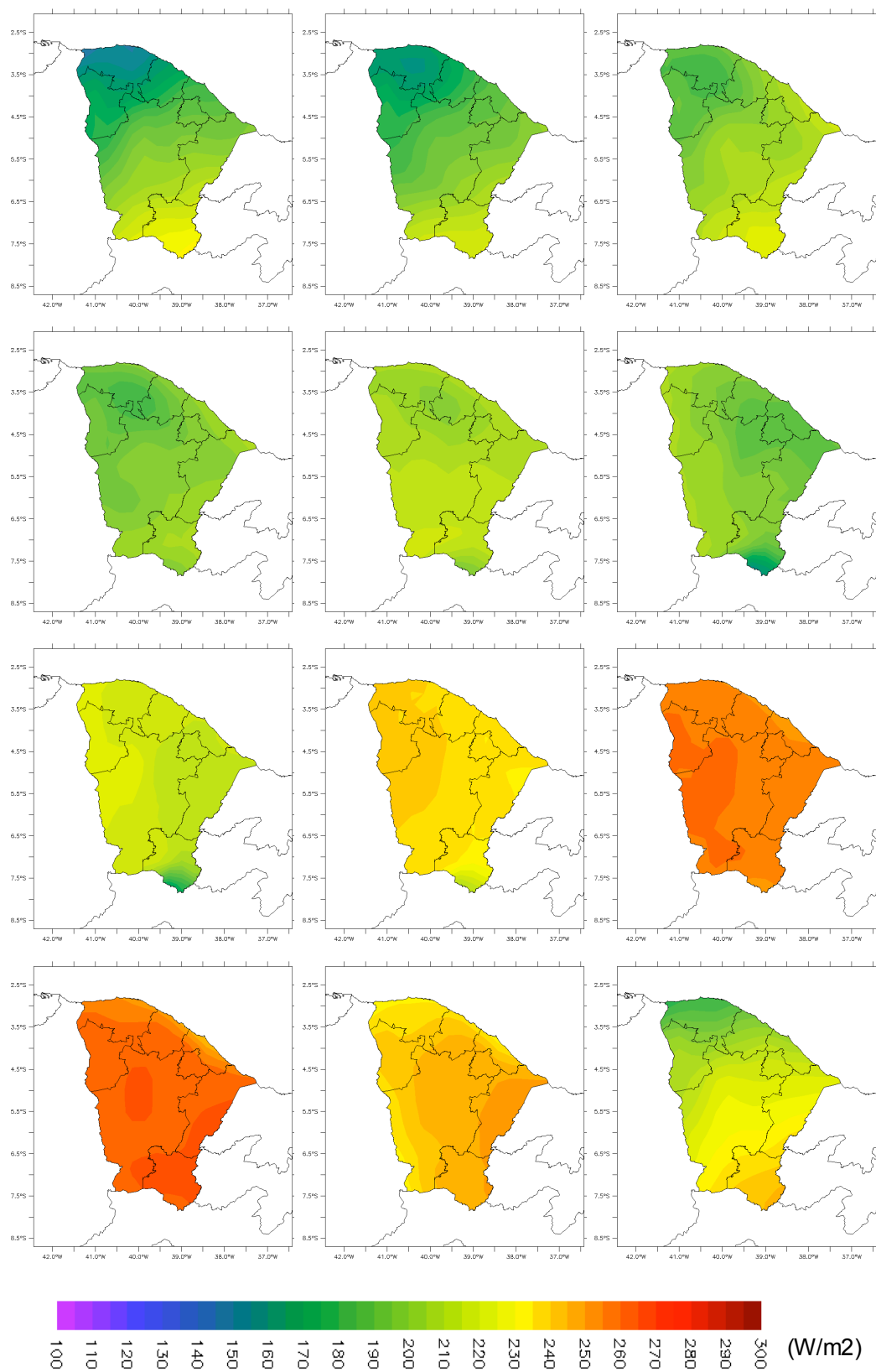


Figura 58. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1975.

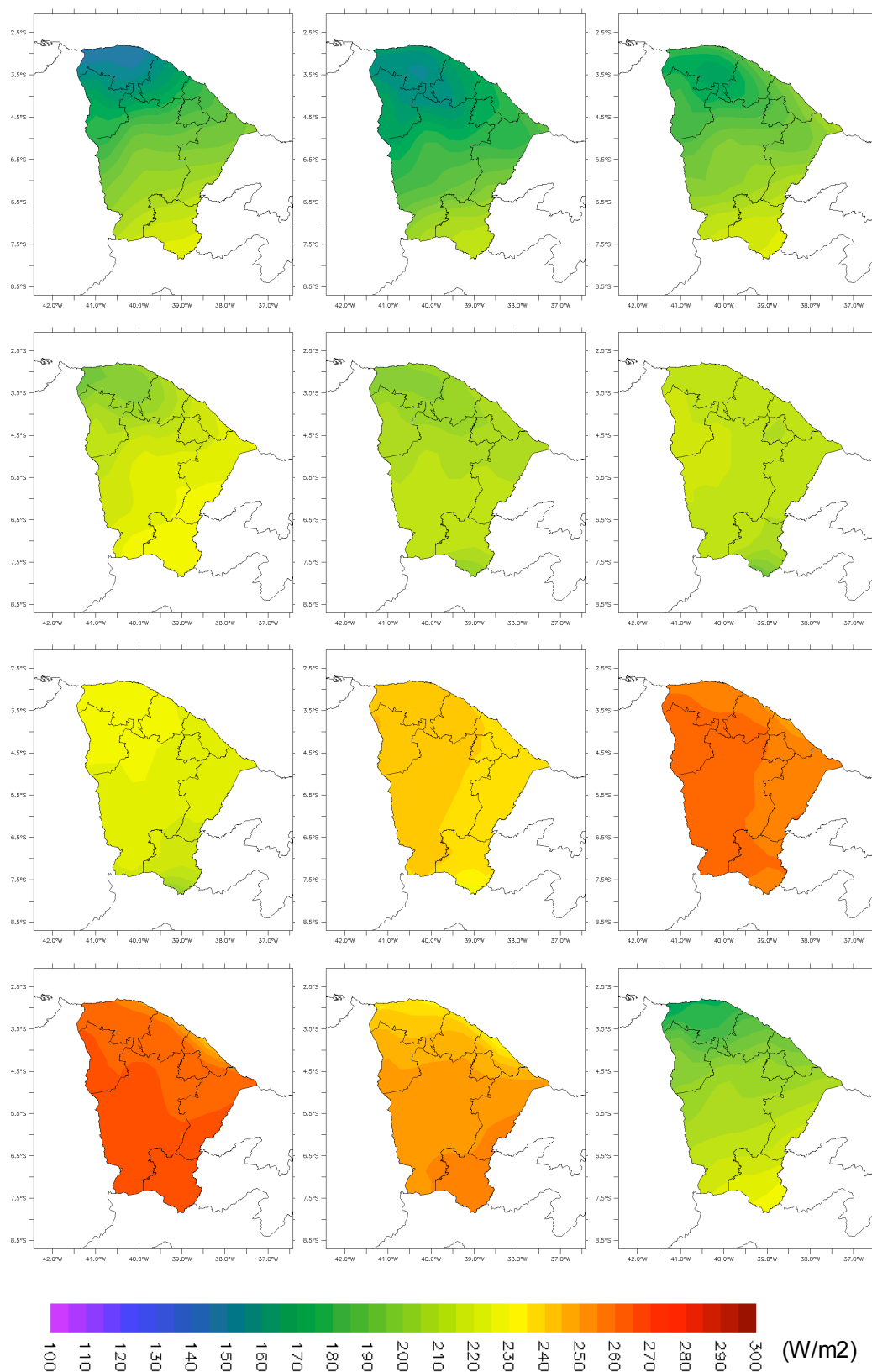


Figura 59. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1976.

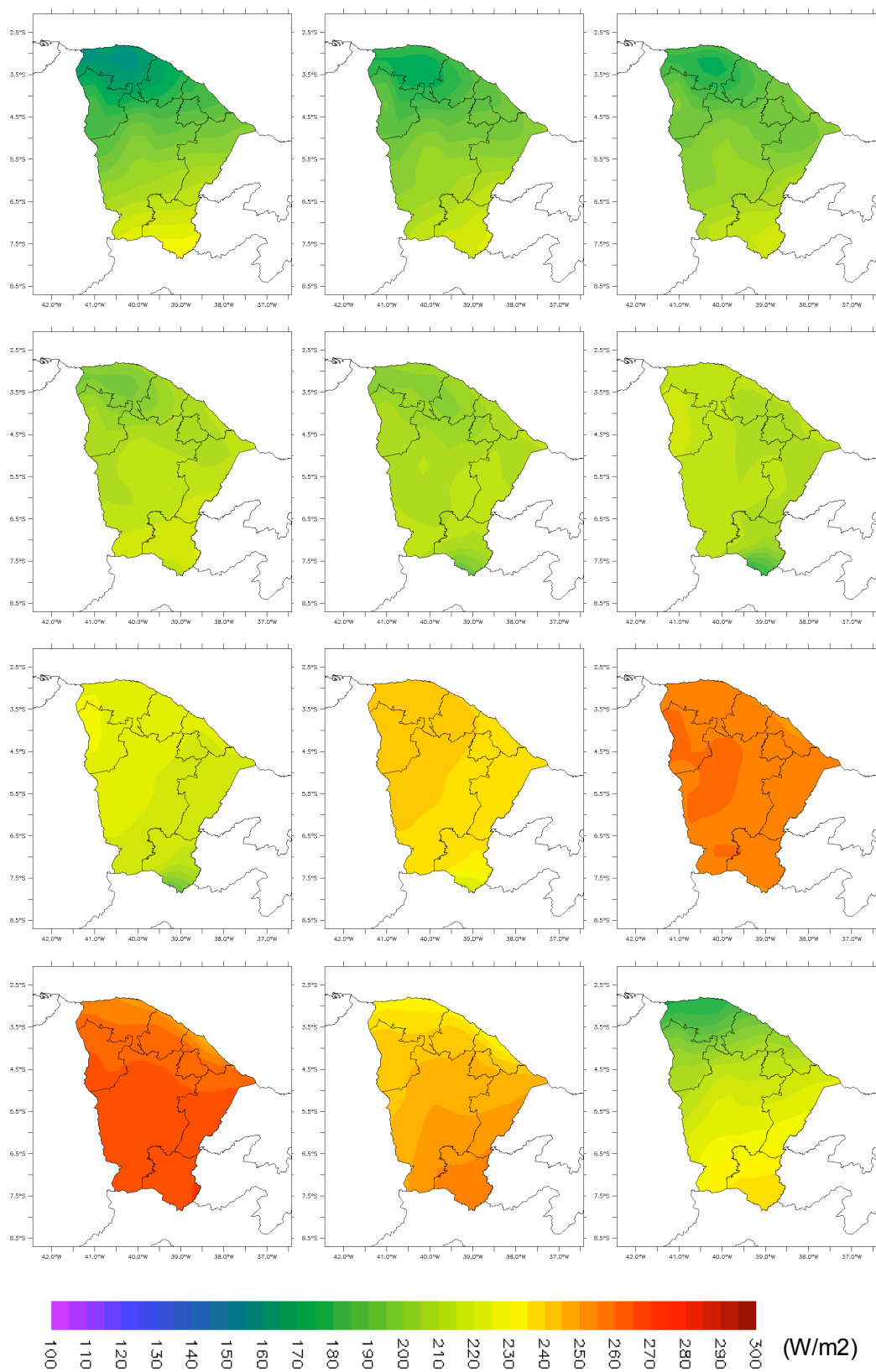


Figura 60. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1977.

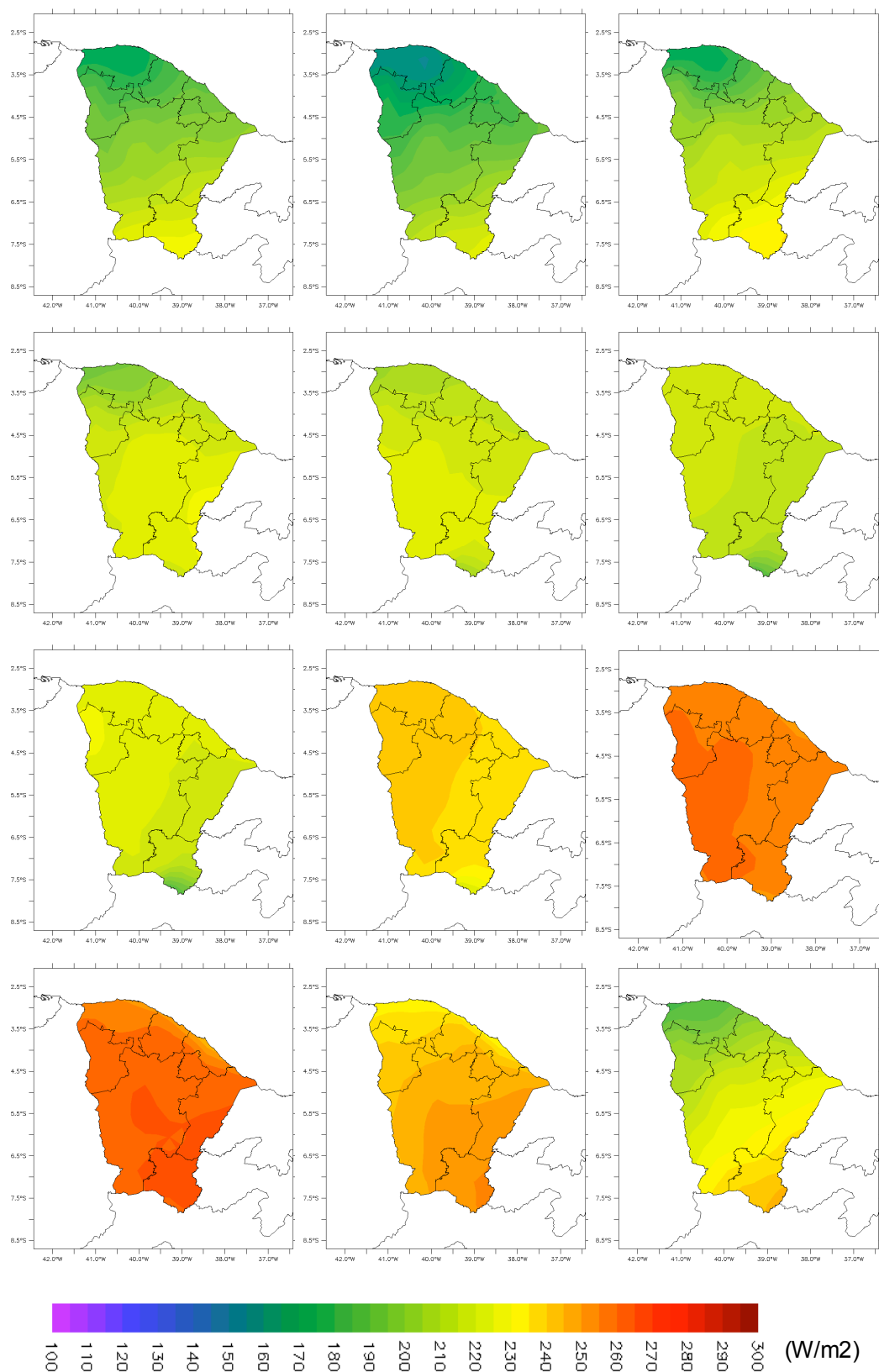


Figura 61. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1978.

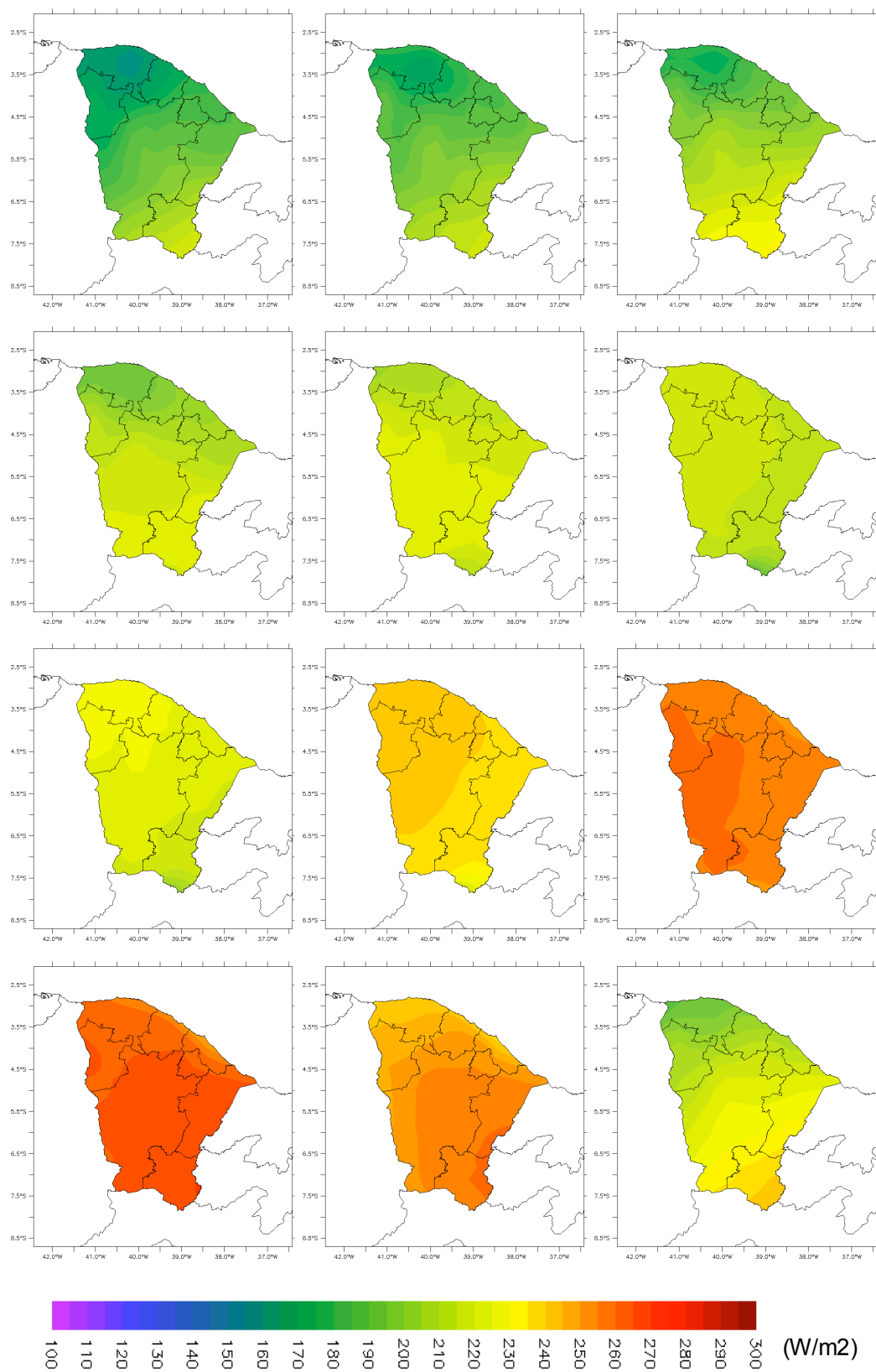


Figura 62. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1979.

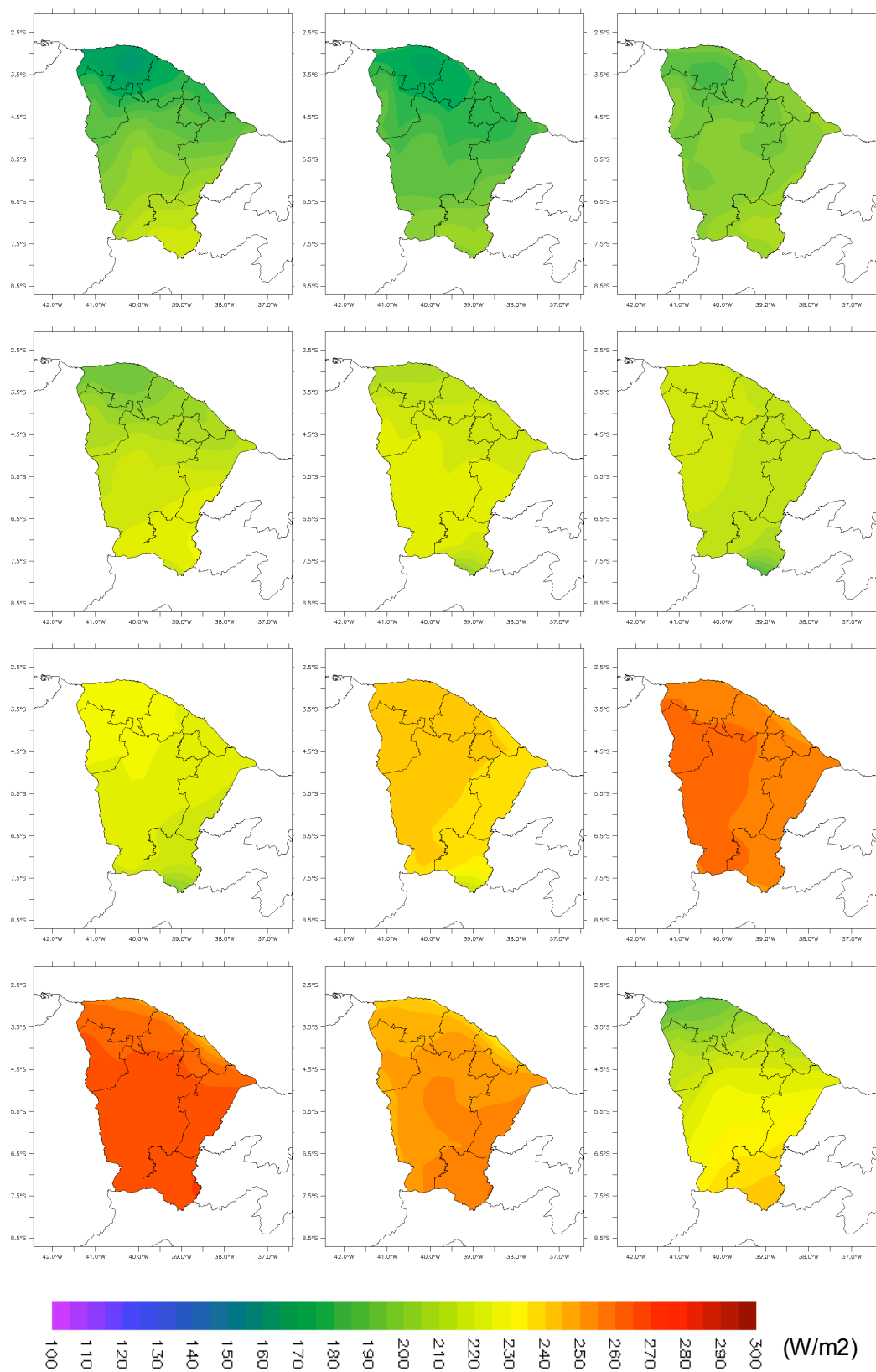


Figura 63. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1980.

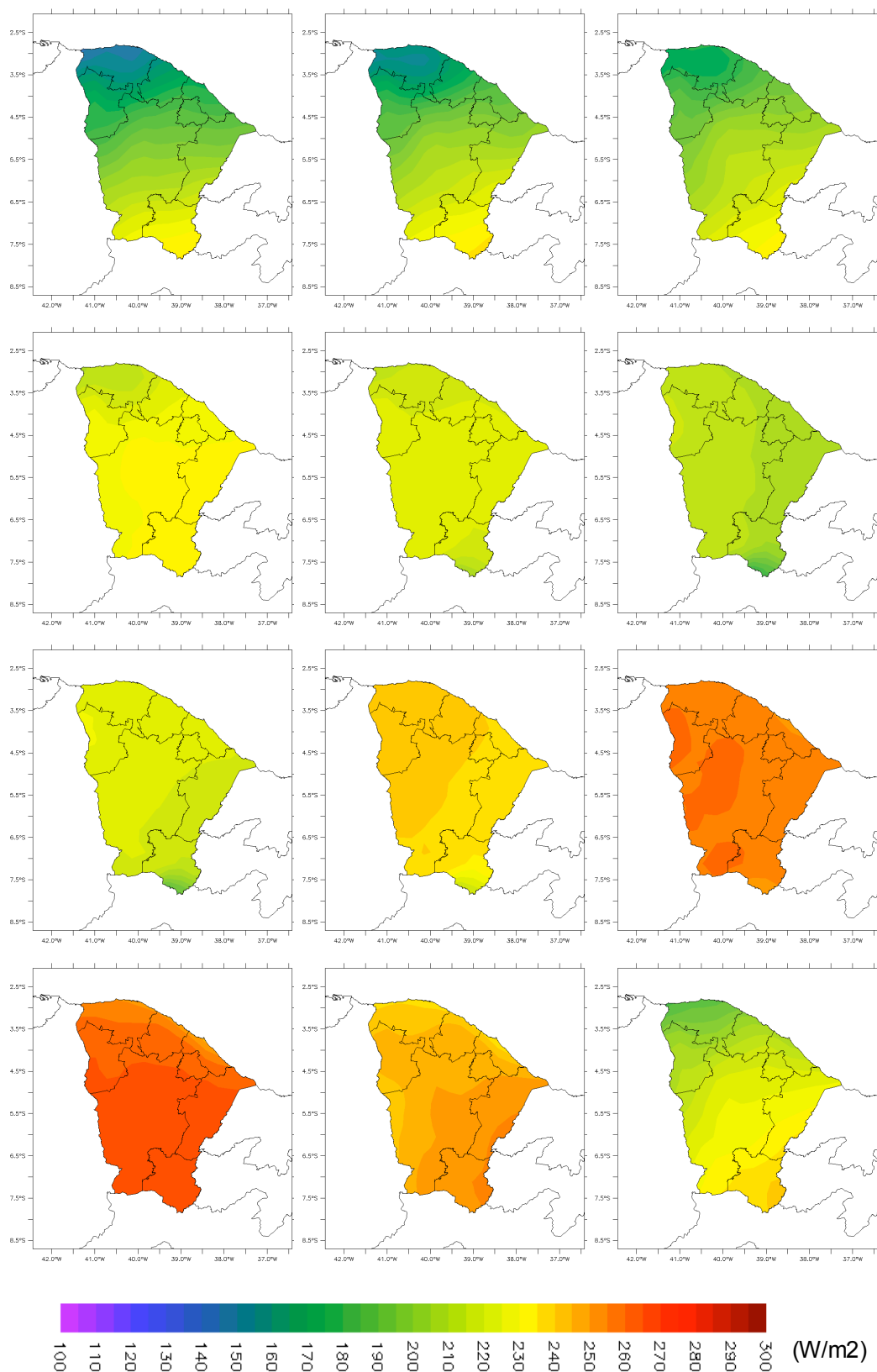


Figura 64. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1981.

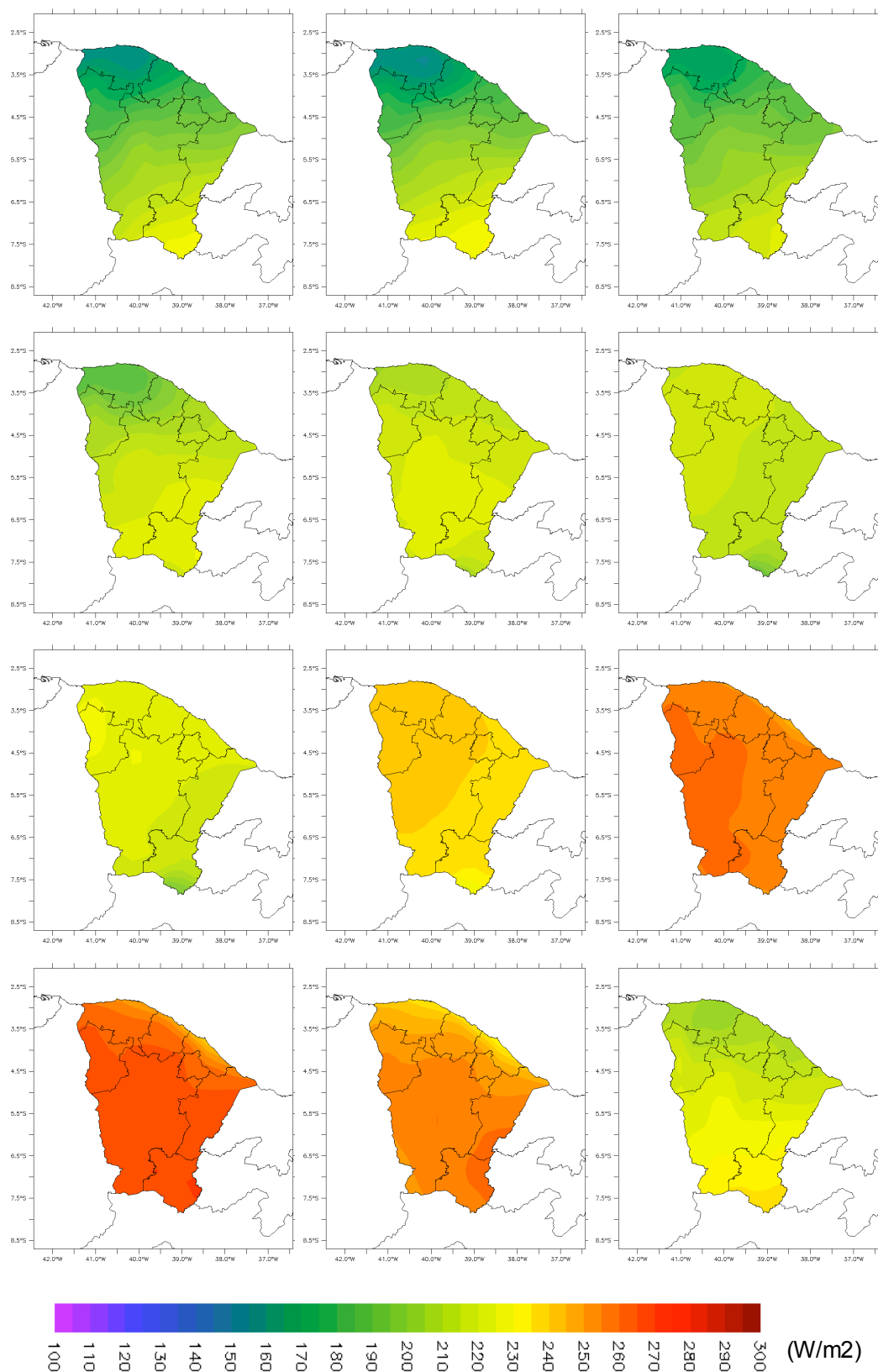


Figura 65. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1982.

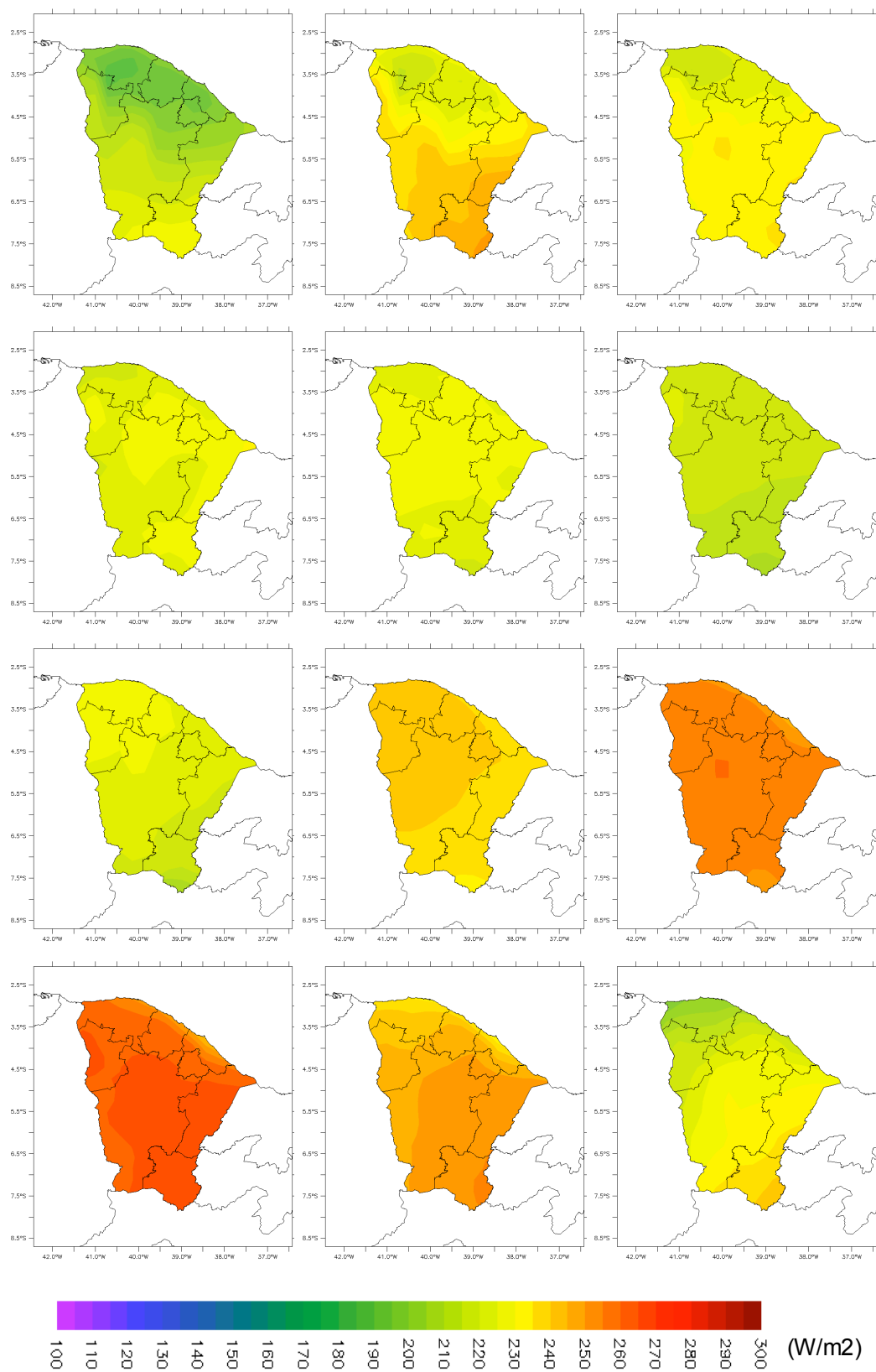


Figura 66. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1983.

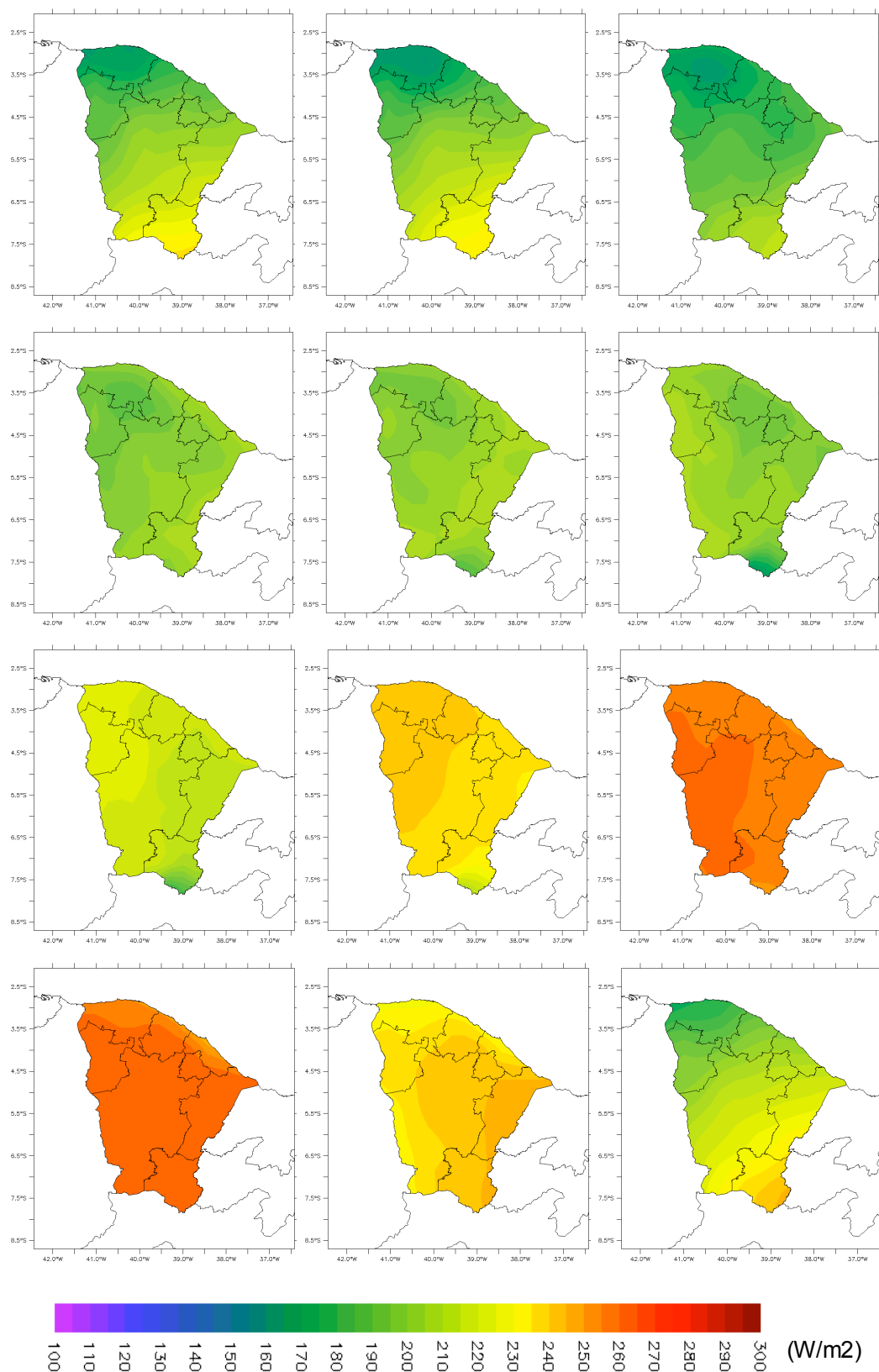


Figura 67. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1984.

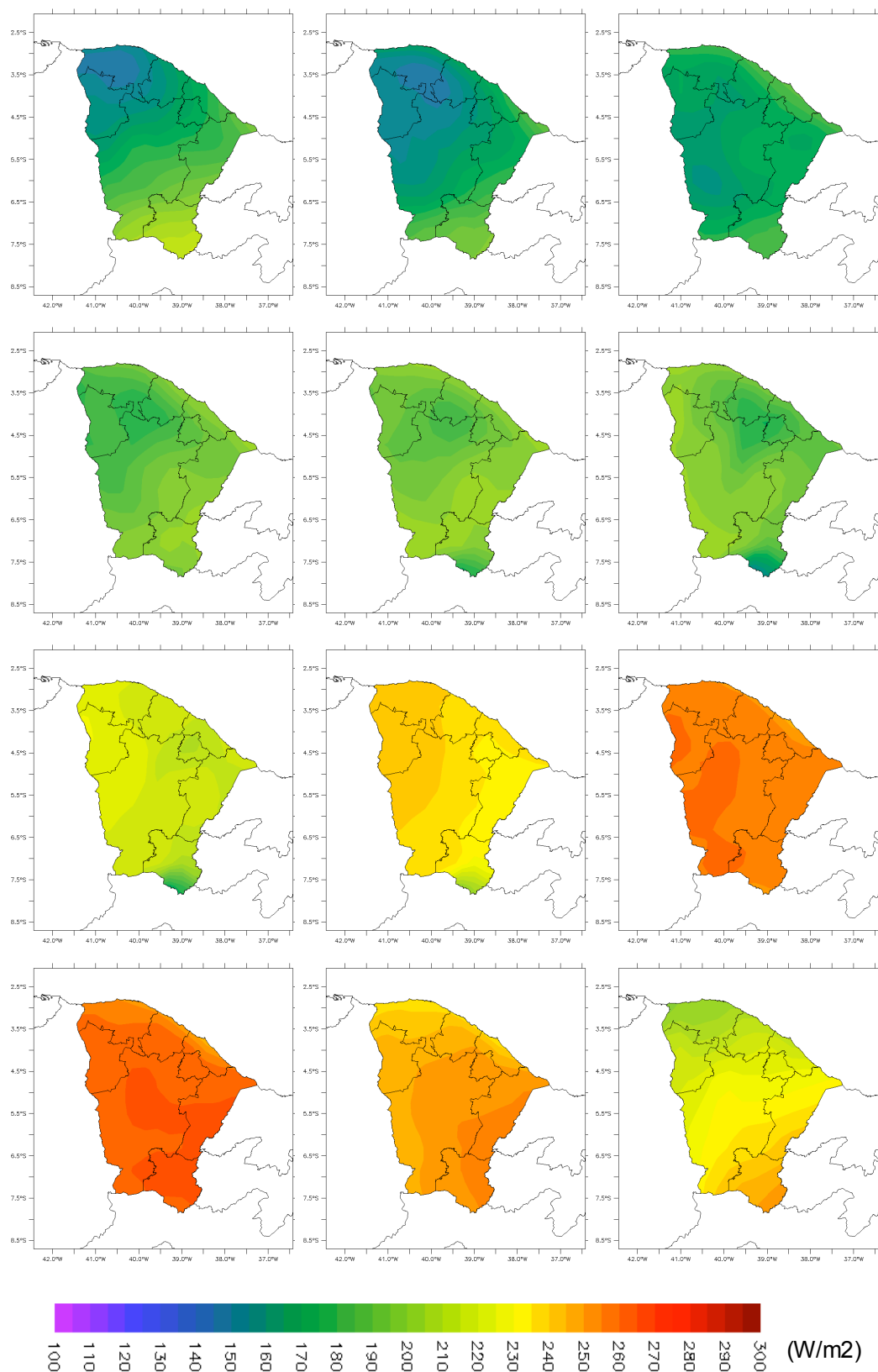


Figura 68. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1985.

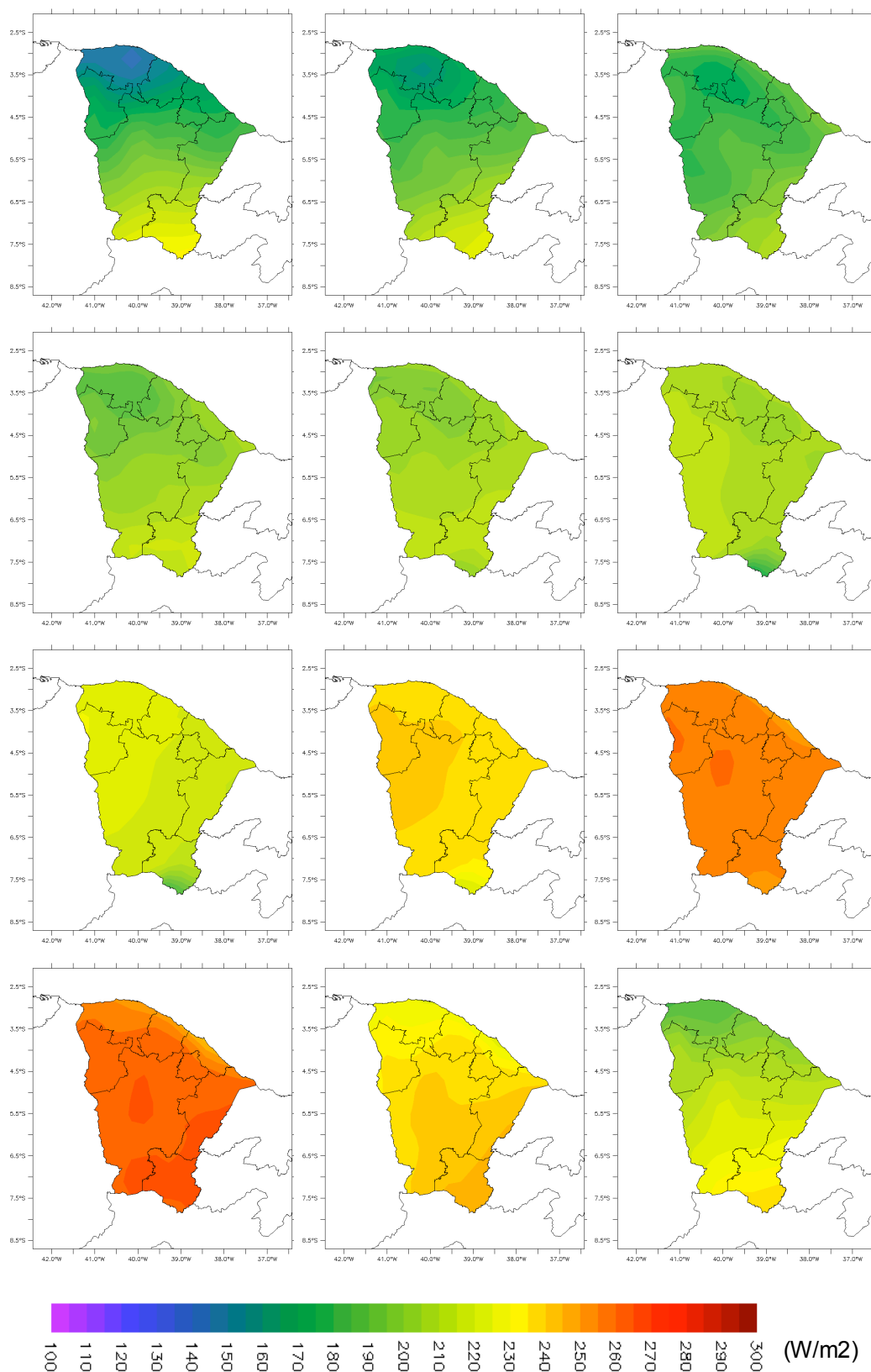


Figura 69. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1986.

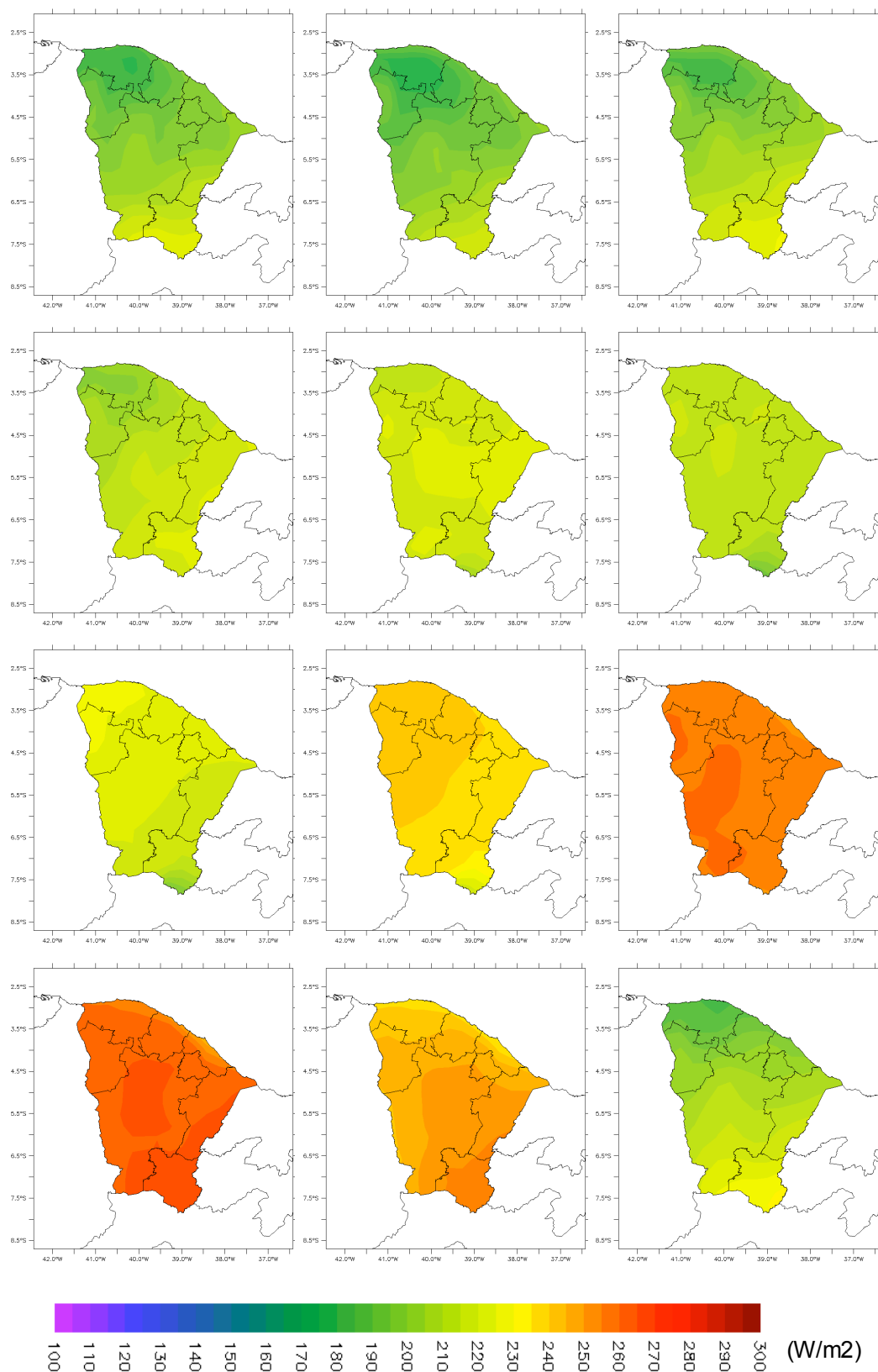


Figura 70. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1987.

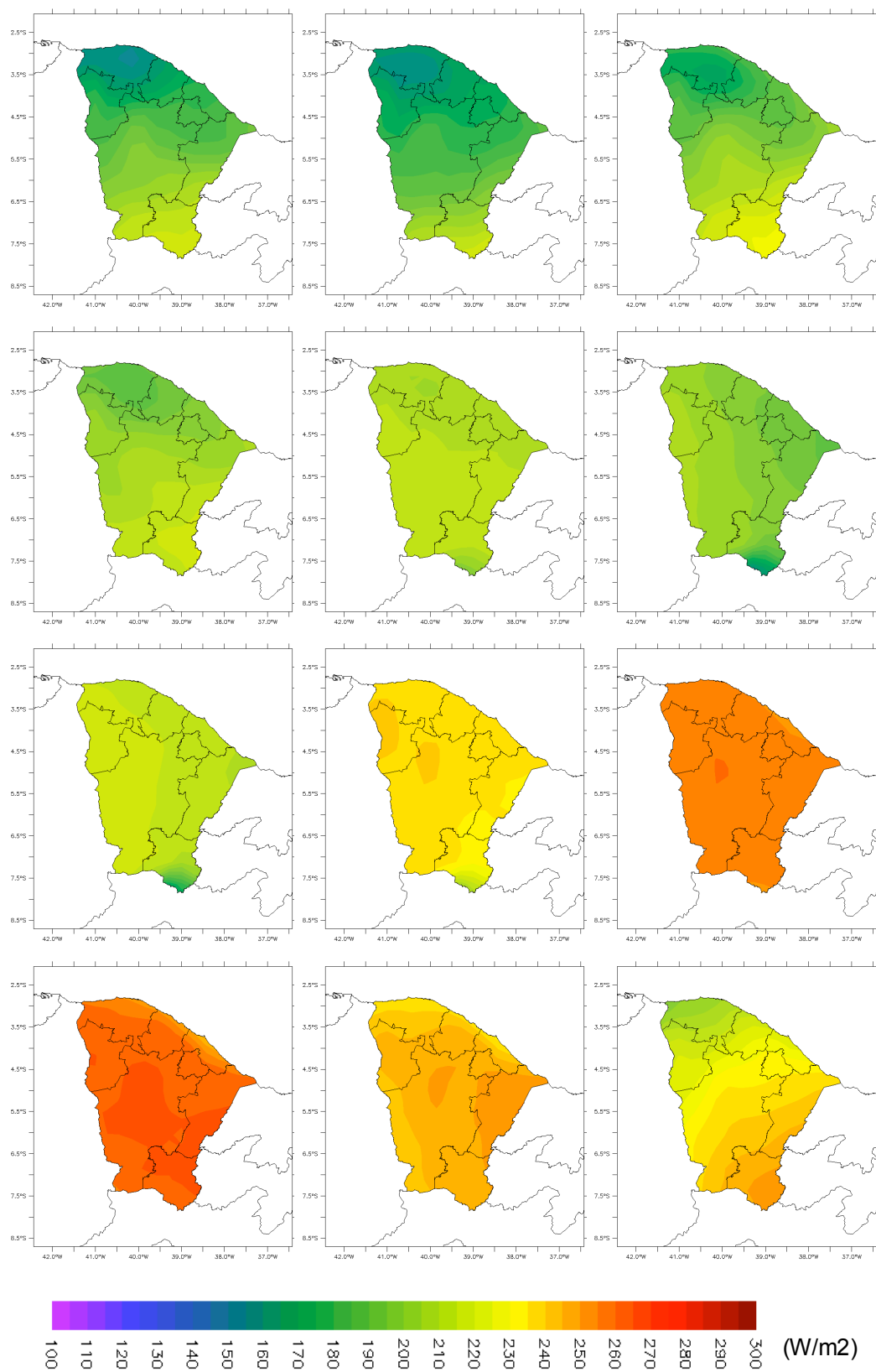


Figura 71. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1988.

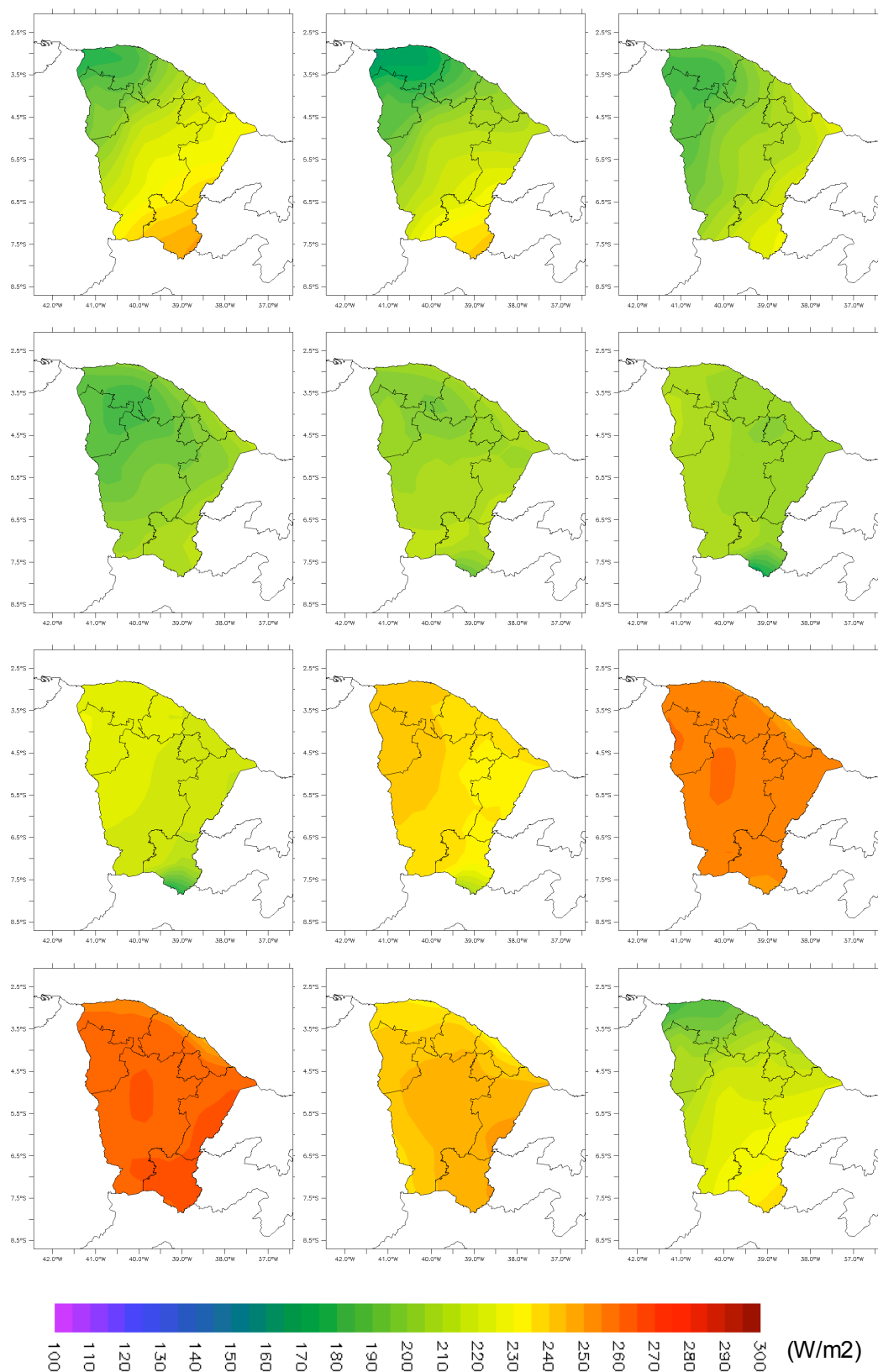


Figura 72. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1989.

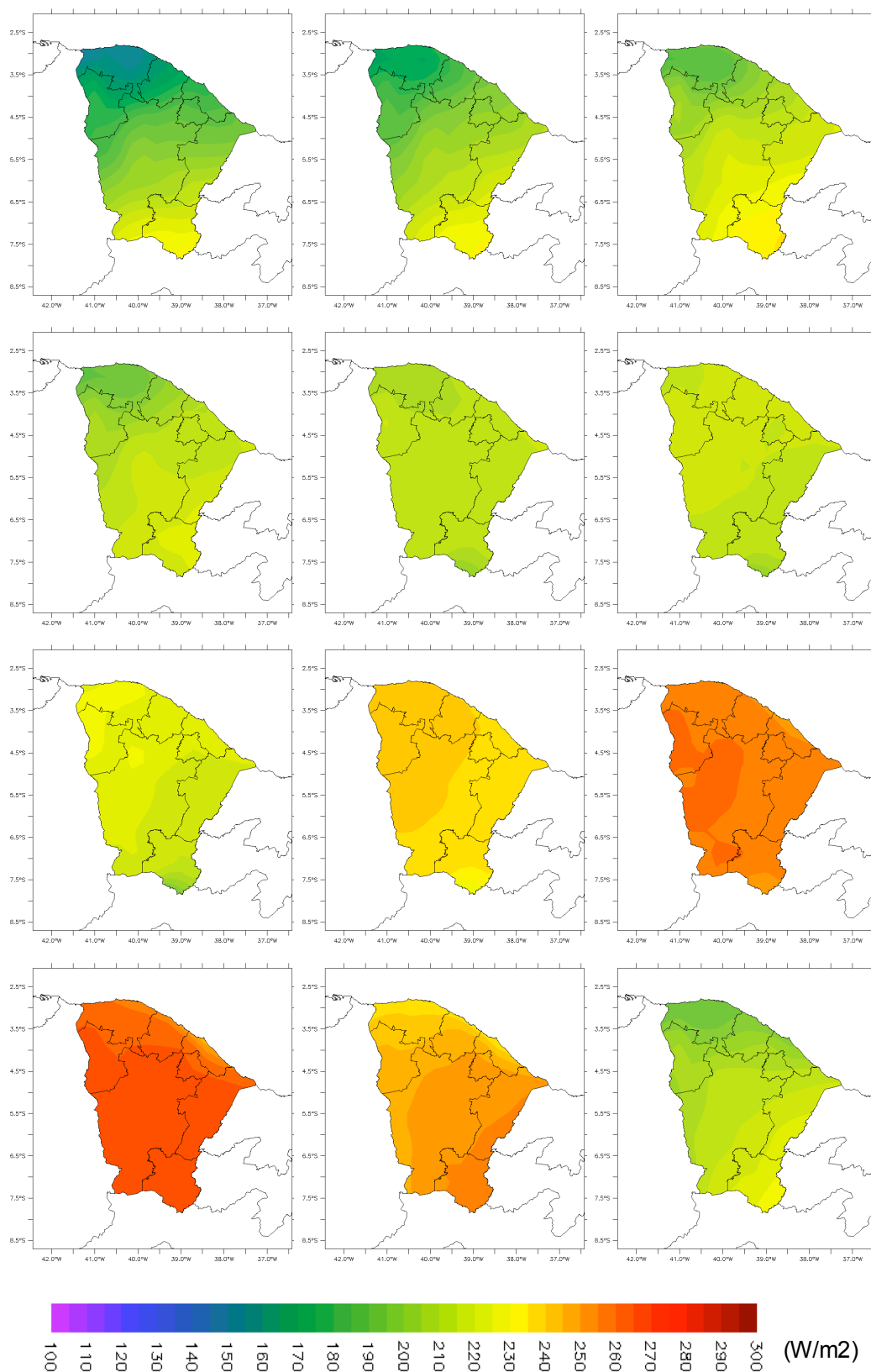


Figura 73. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1990.

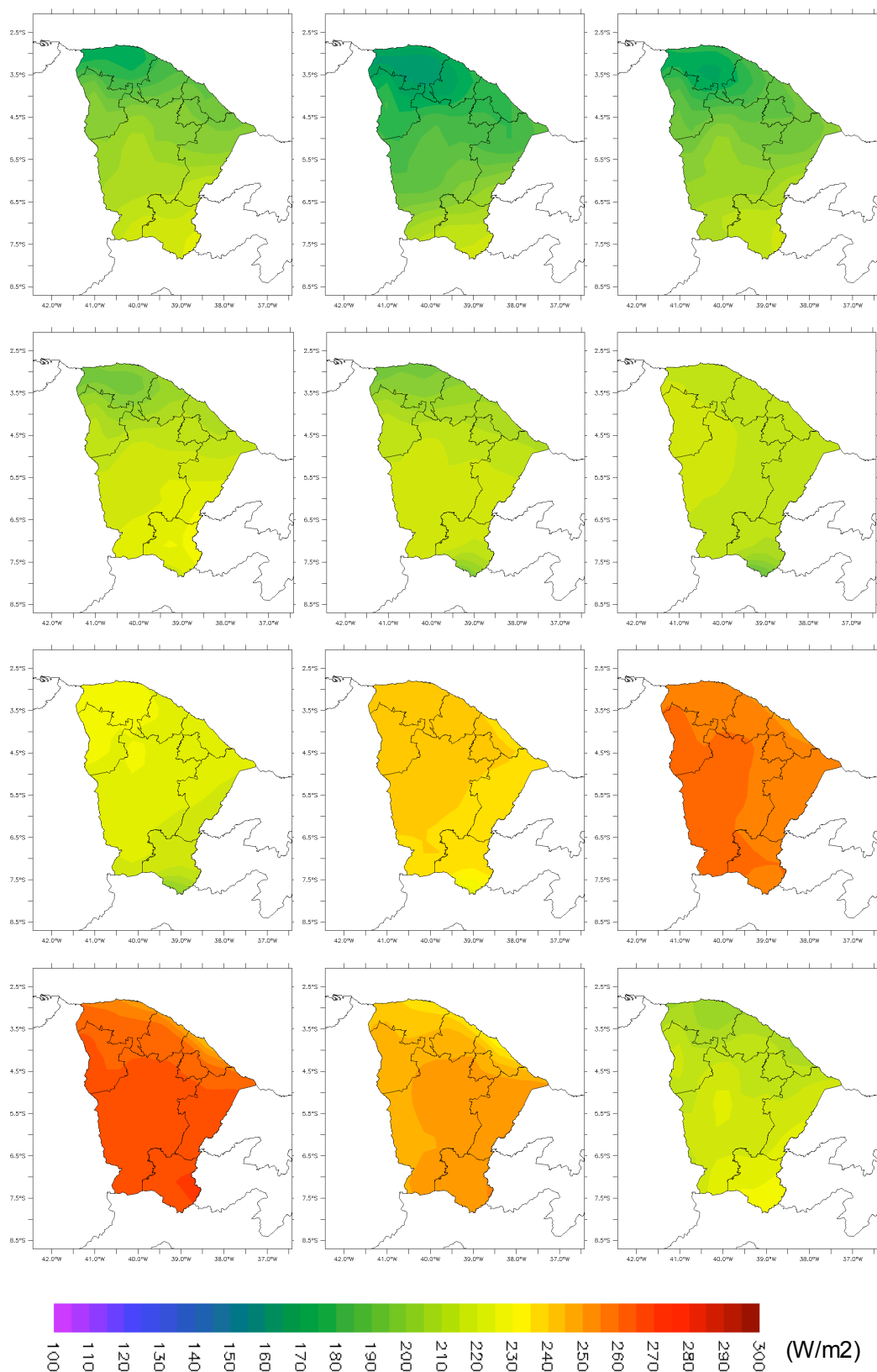


Figura 74. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 1991.

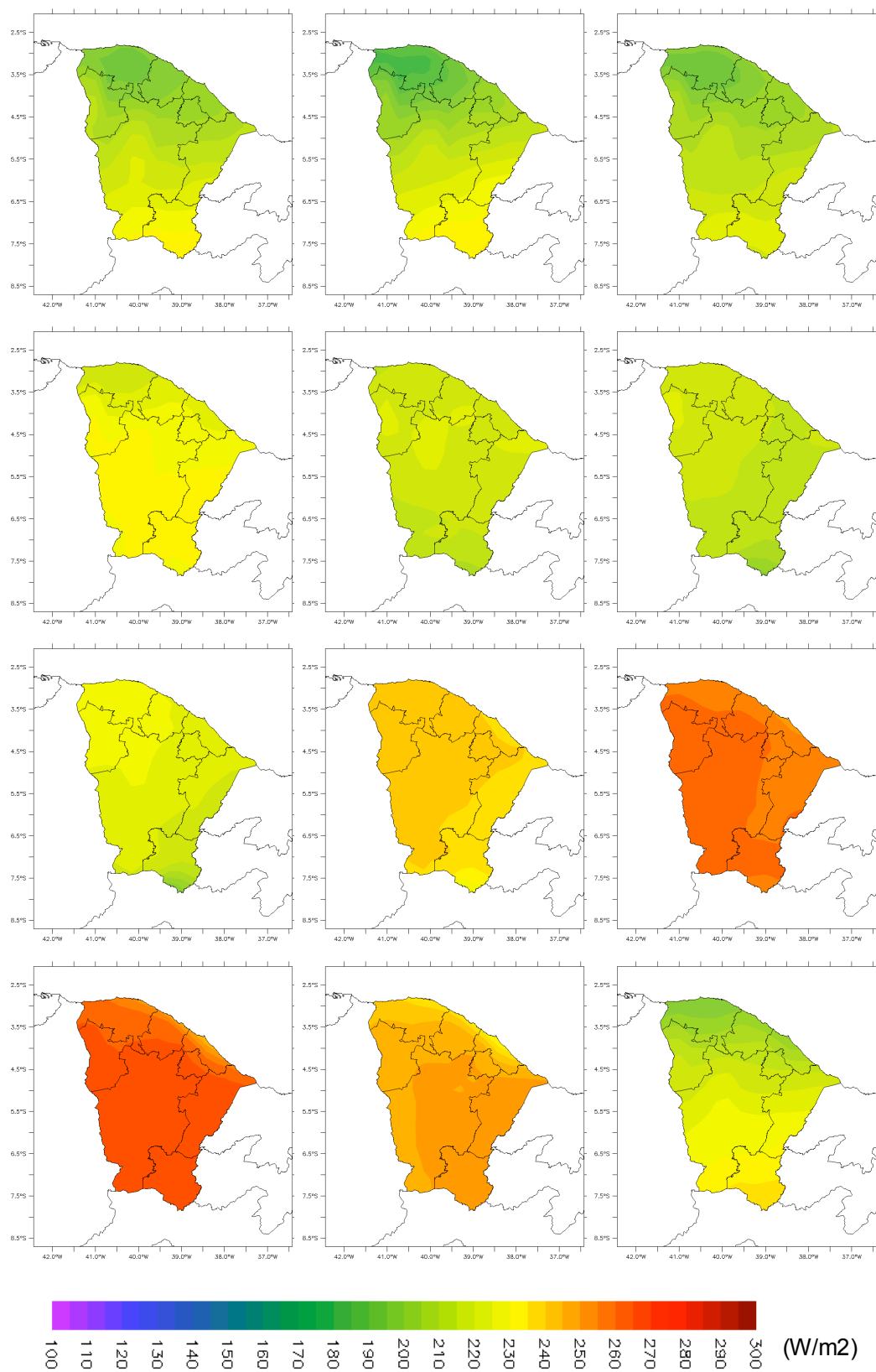


Figura 75. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1992.

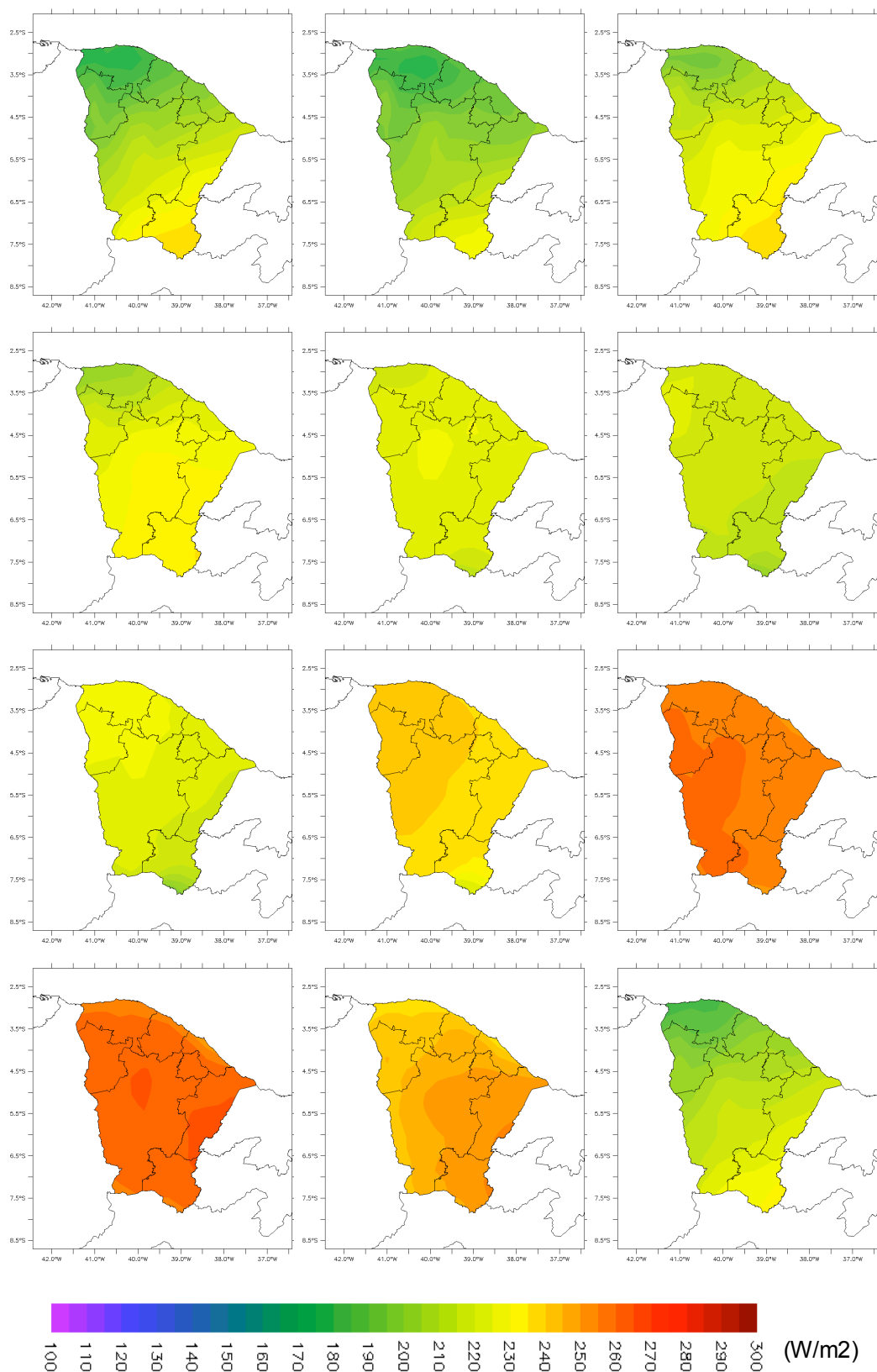


Figura 76. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1993.

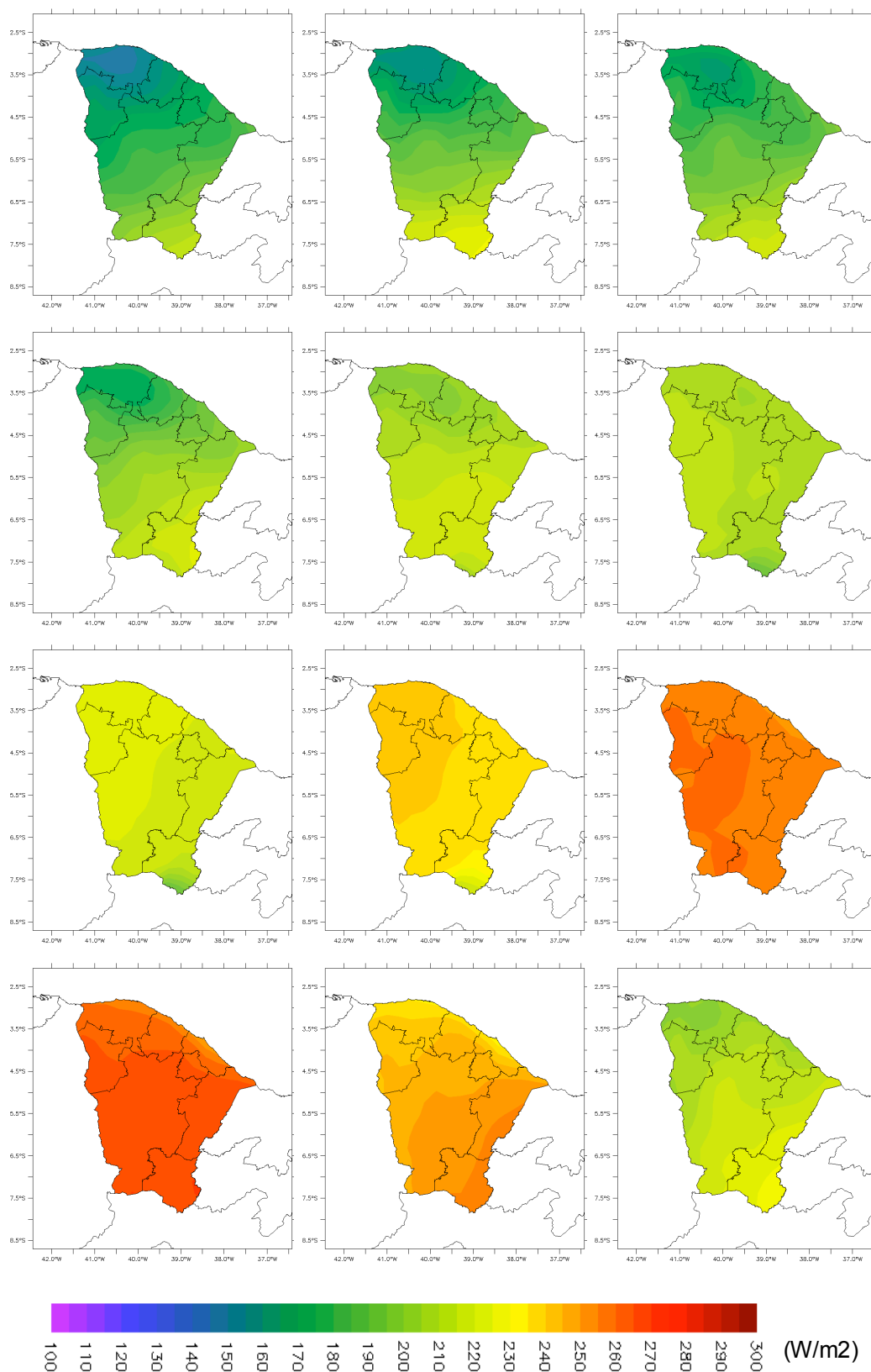


Figura 77. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1994.

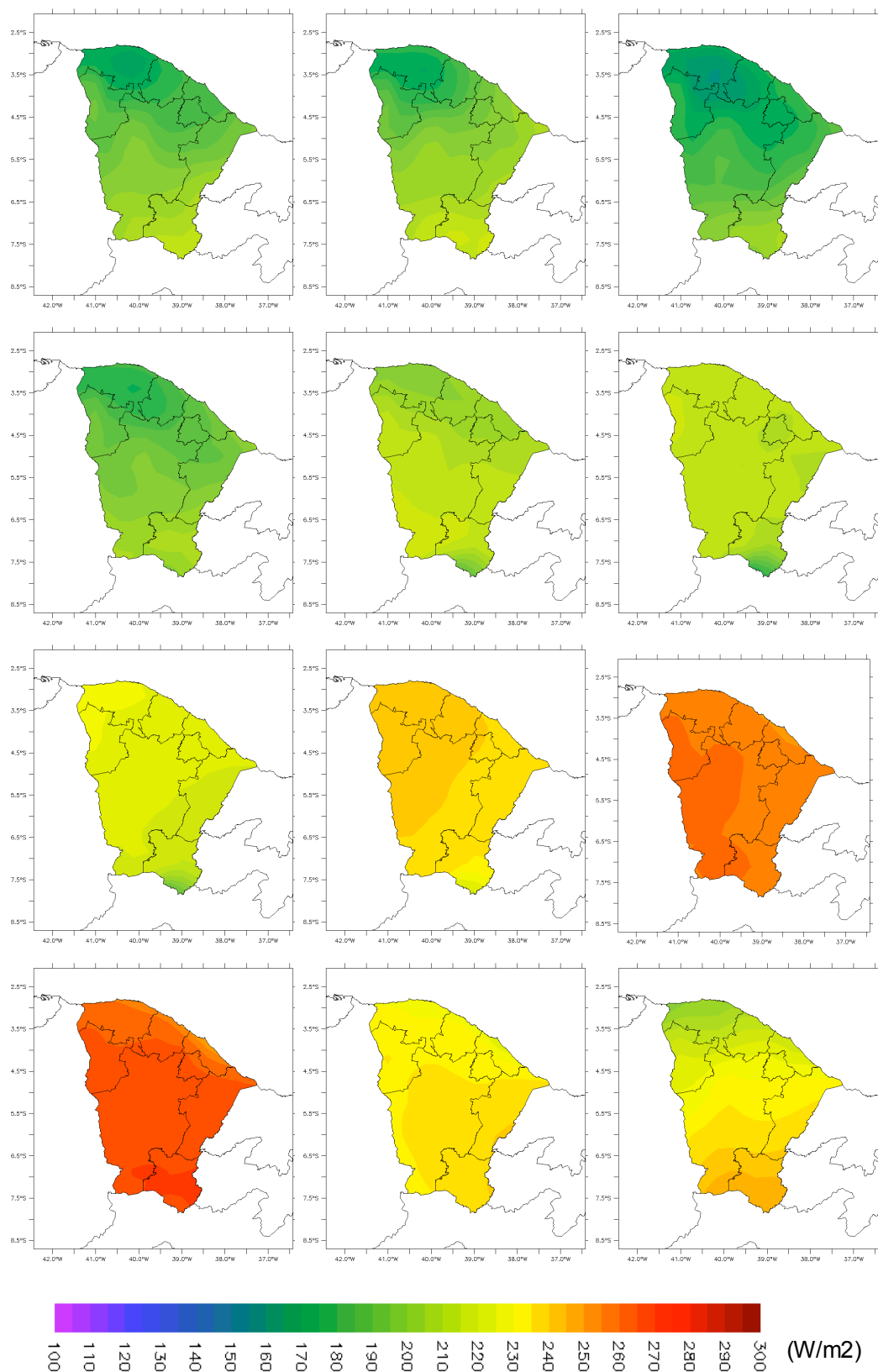


Figura 78. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1995.

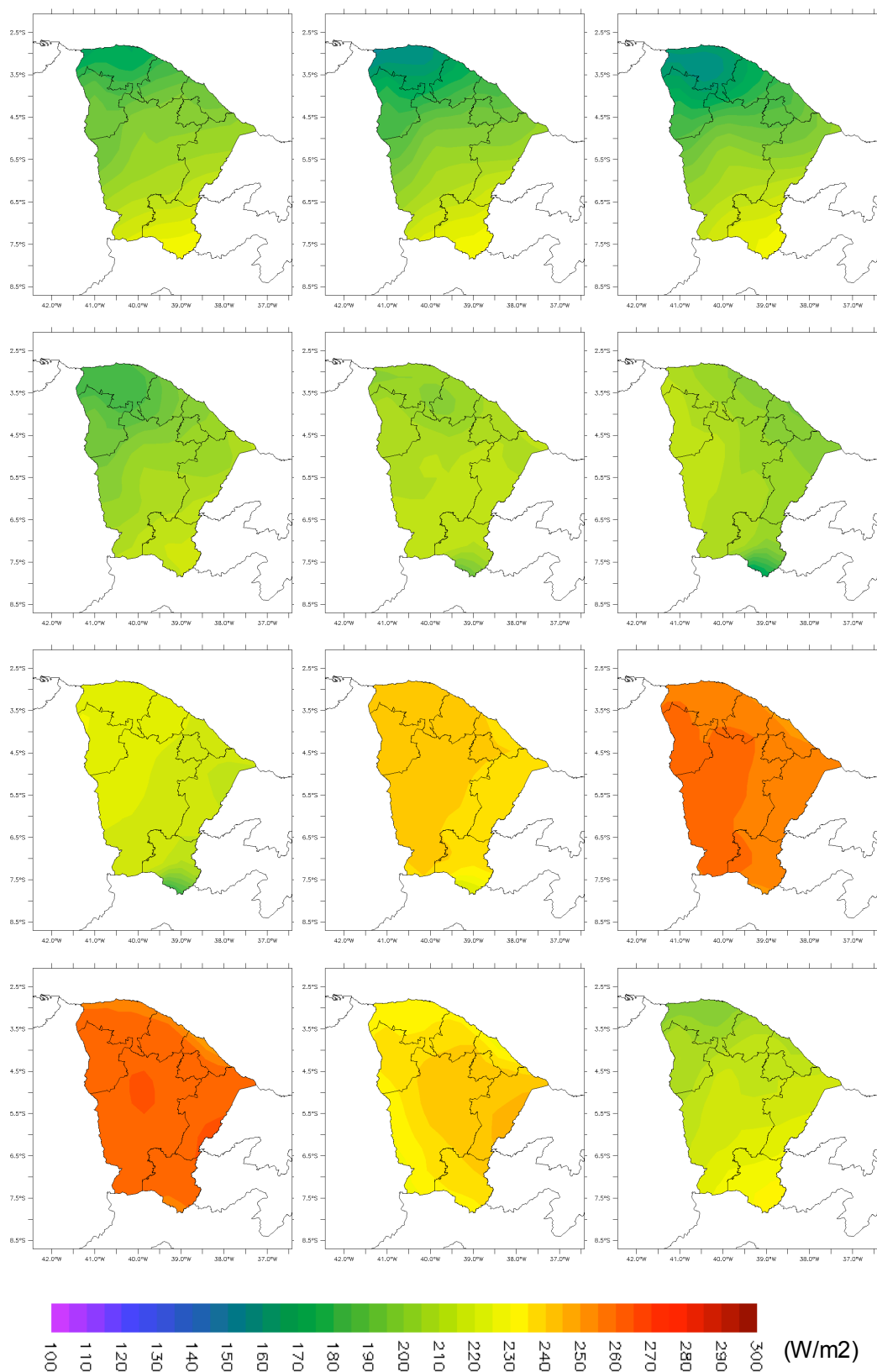


Figura 79. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1996.

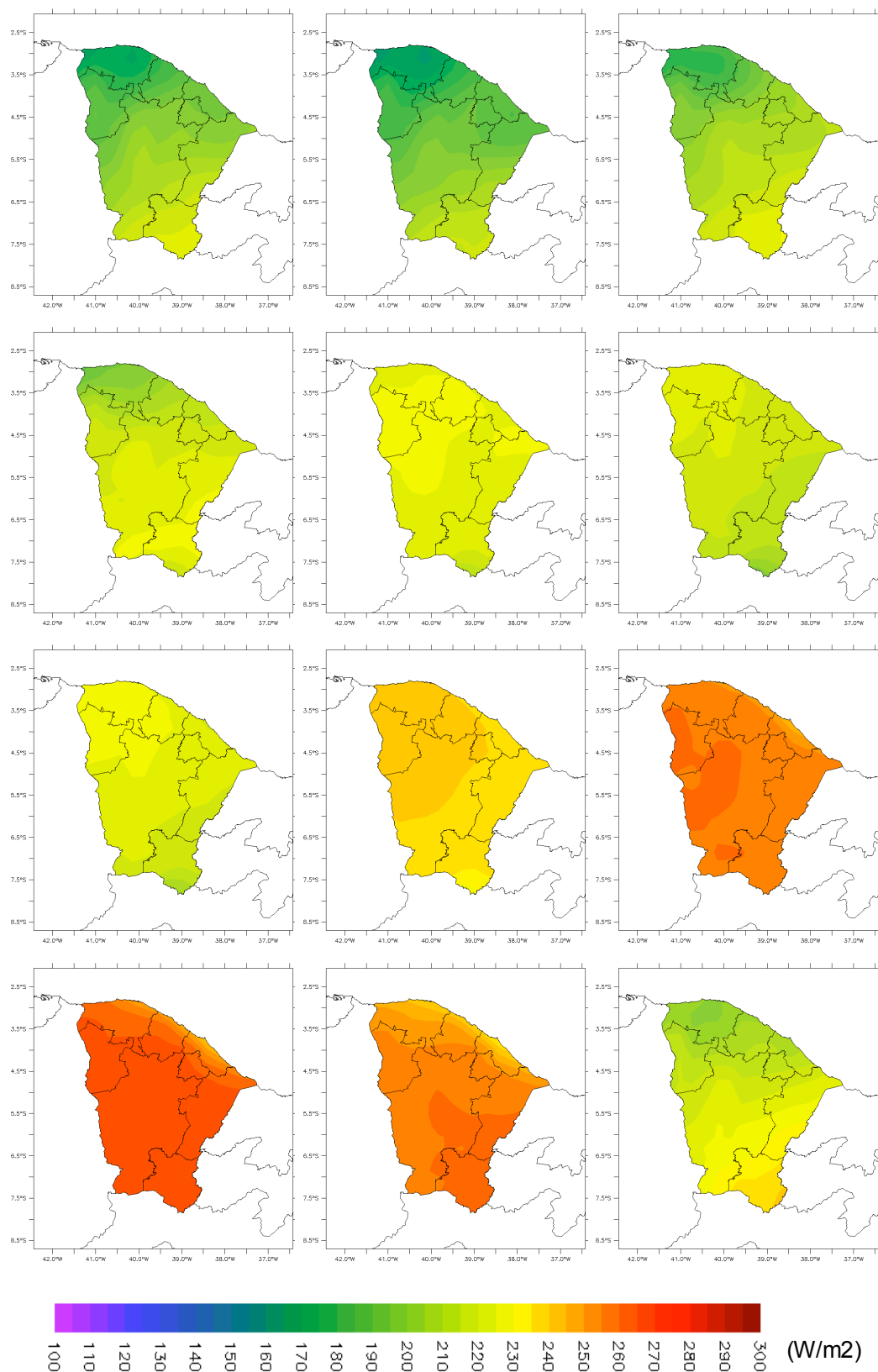


Figura 80. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1997.

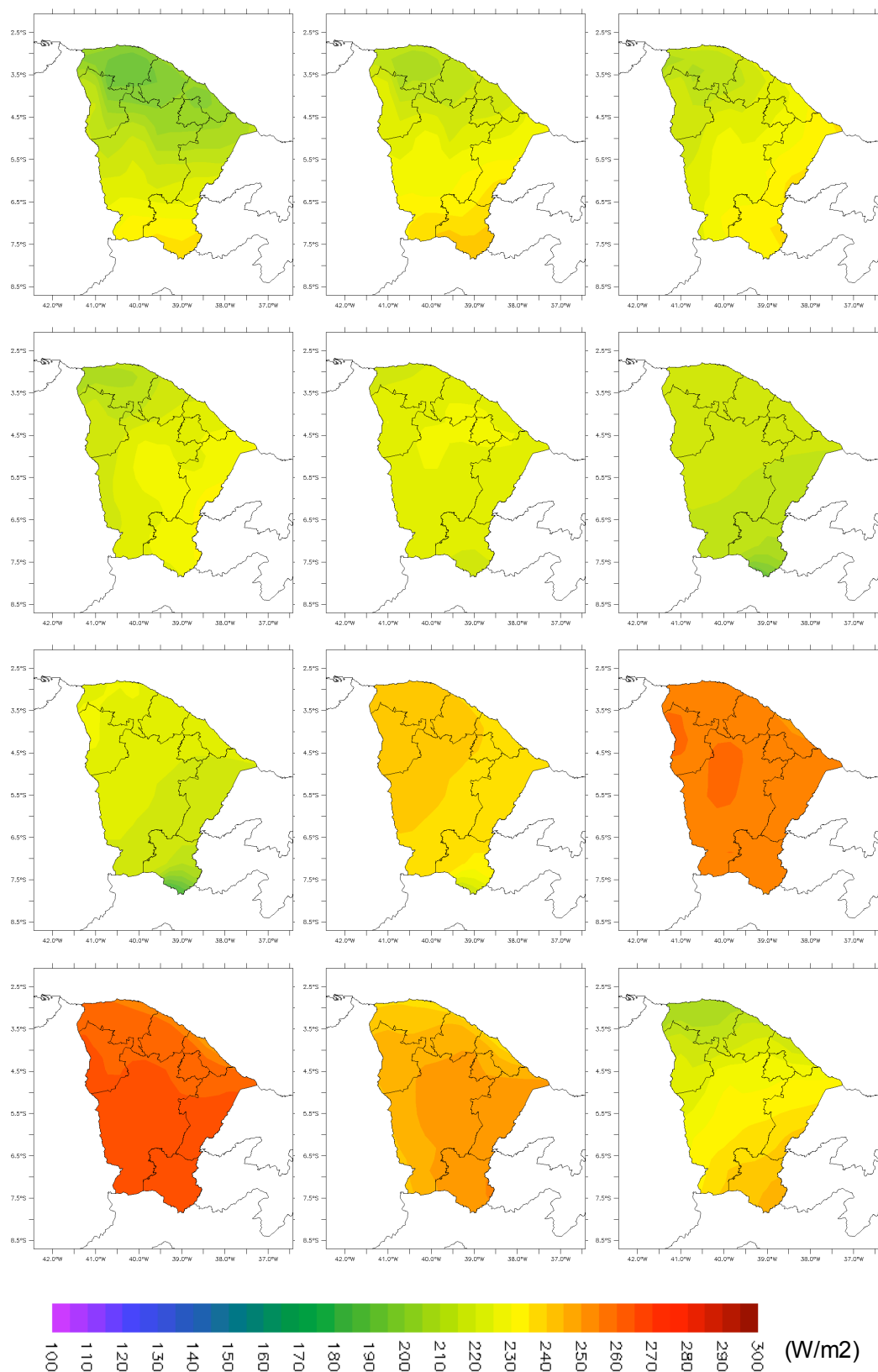


Figura 81. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1998.

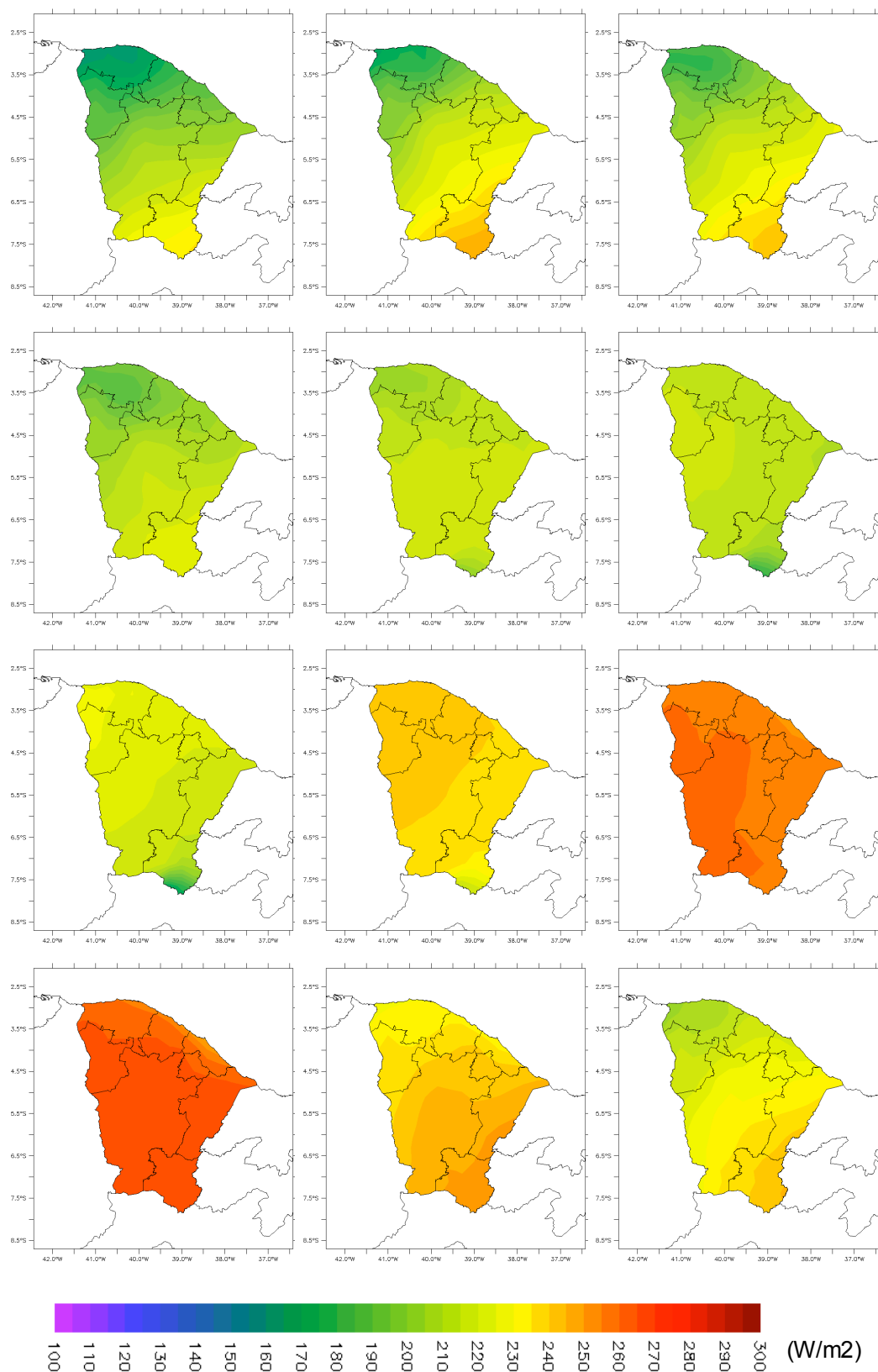


Figura 82. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 1999.

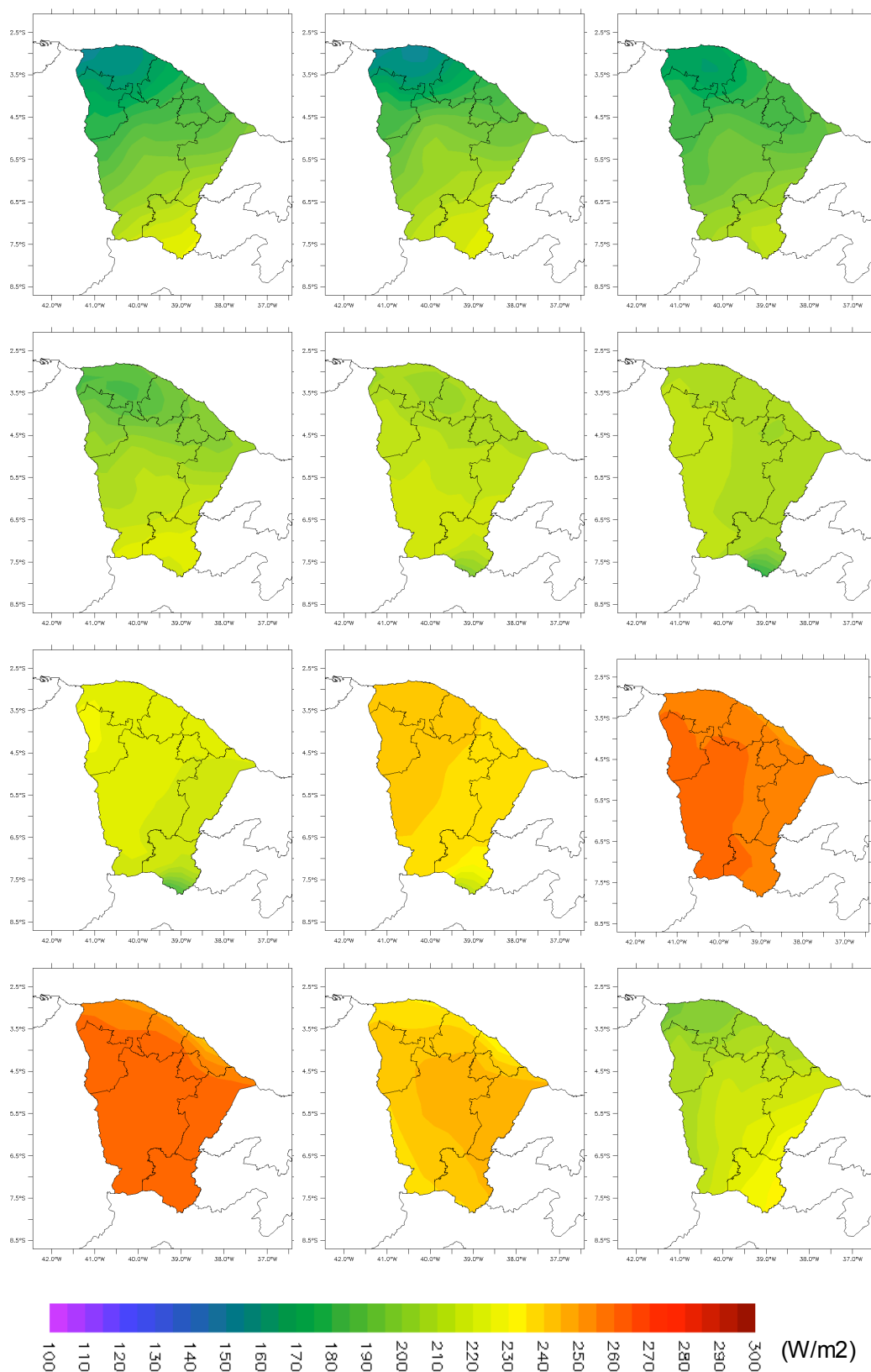


Figura 83. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2000.

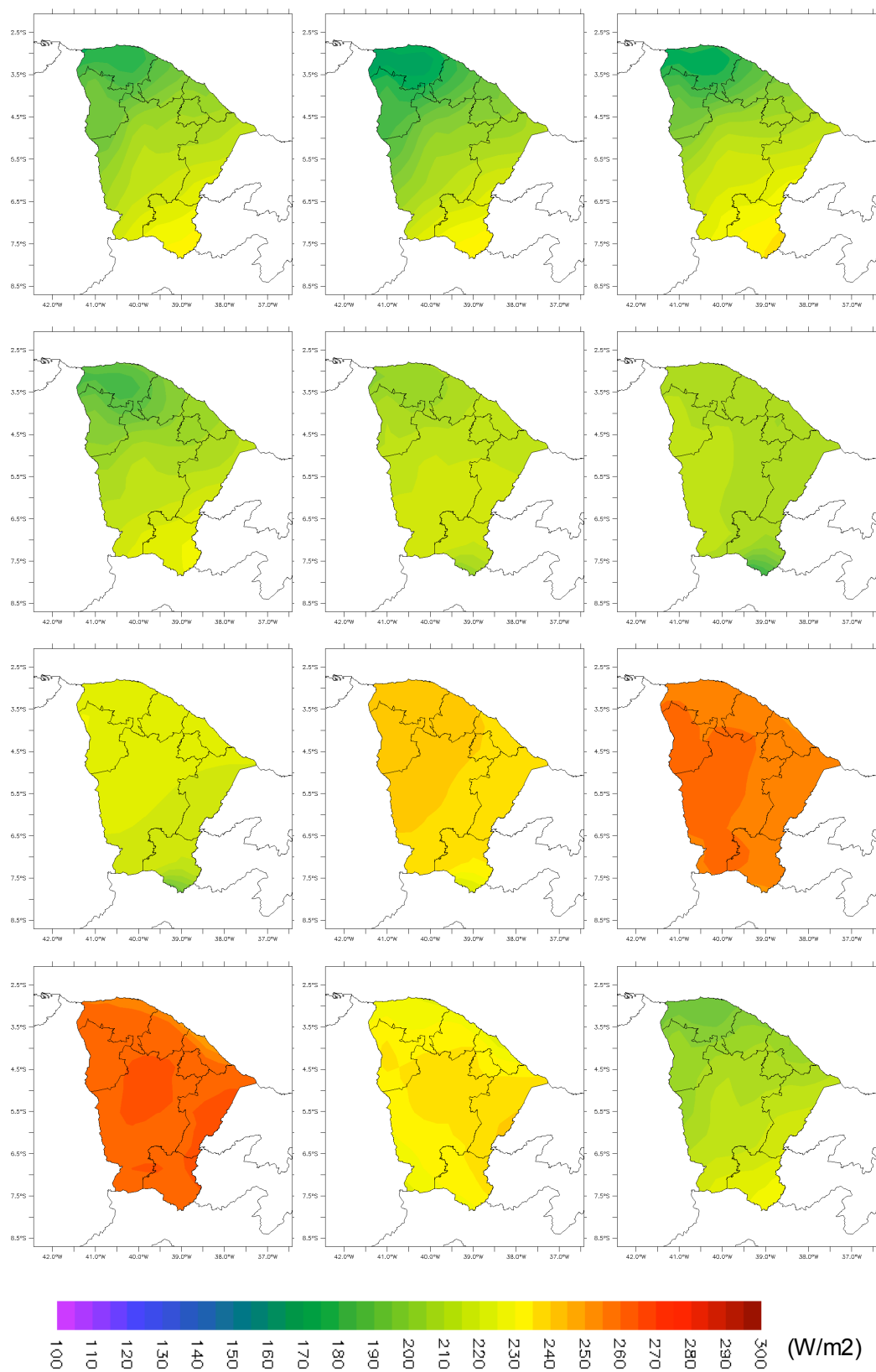


Figura 84. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2001.

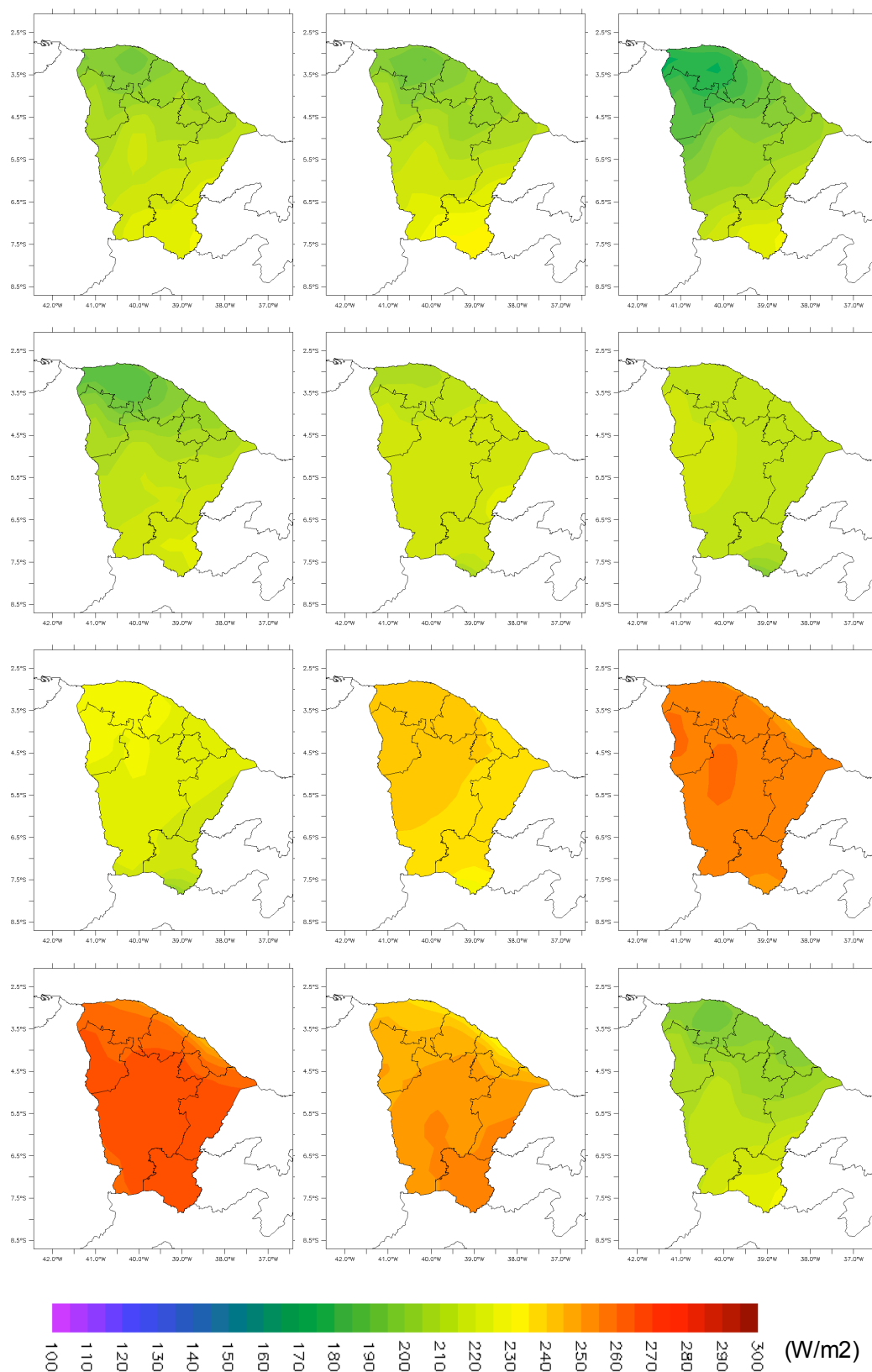


Figura 85. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2002.

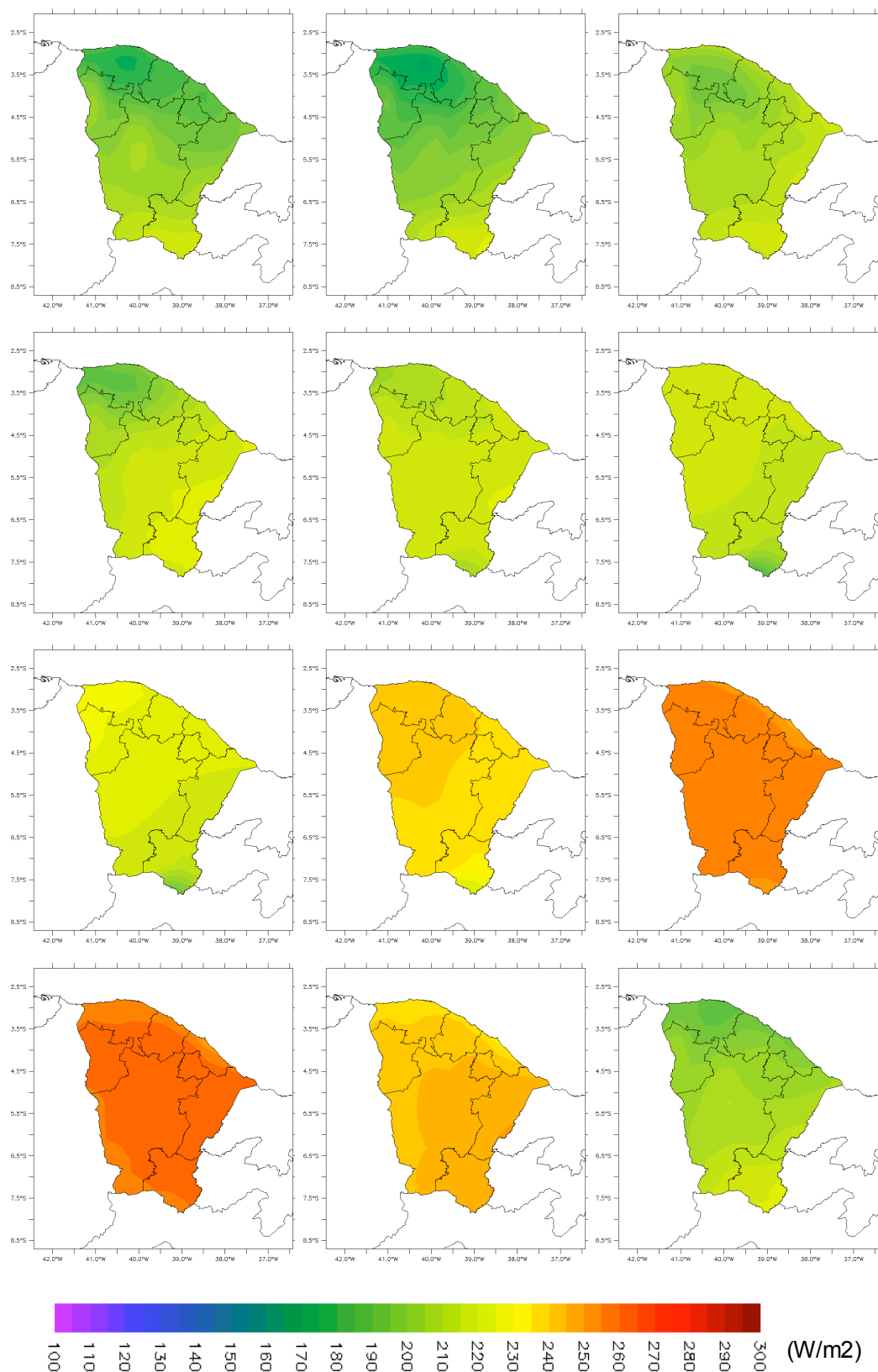


Figura 86. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2003.

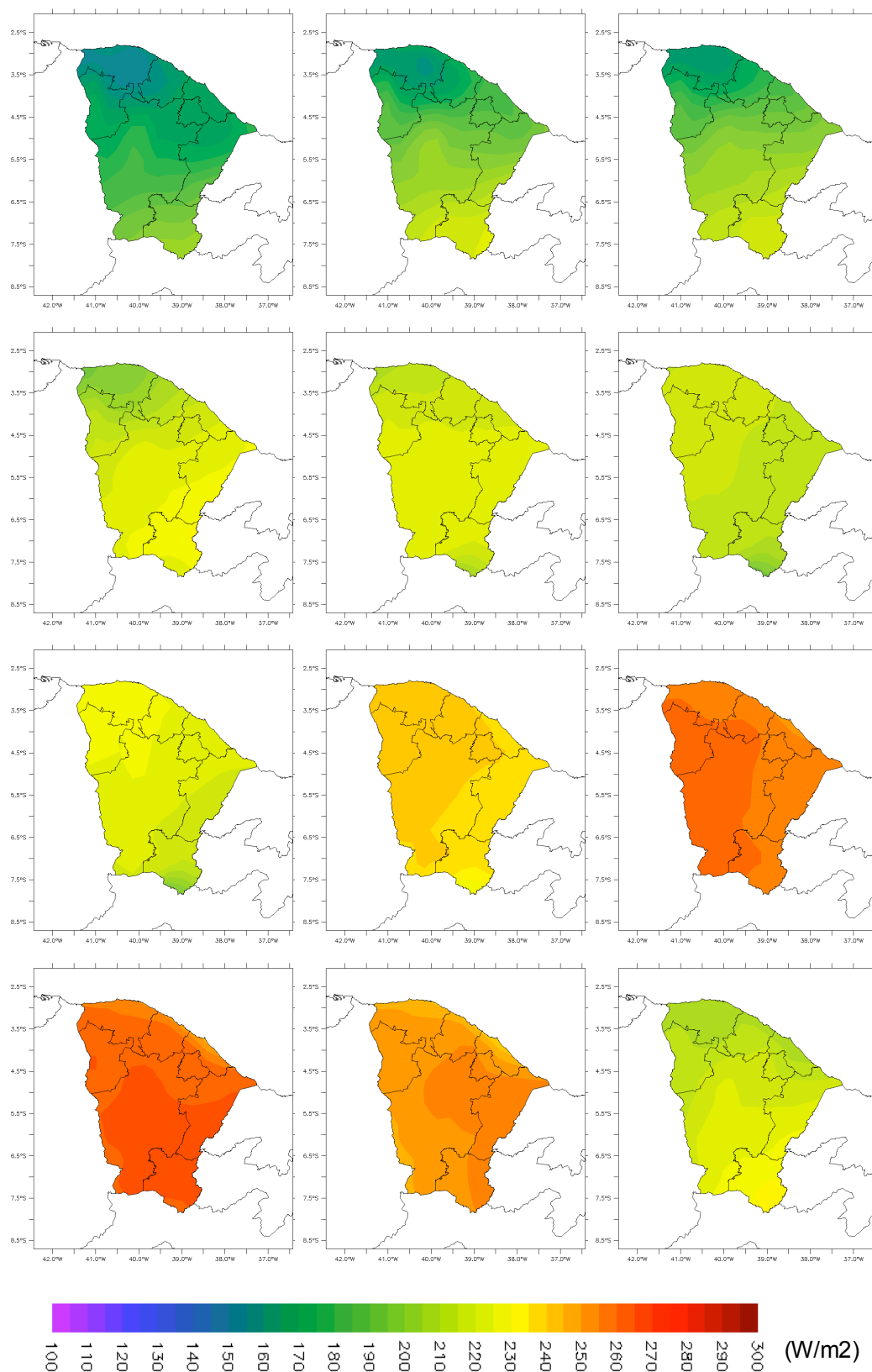


Figura 87. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2004.

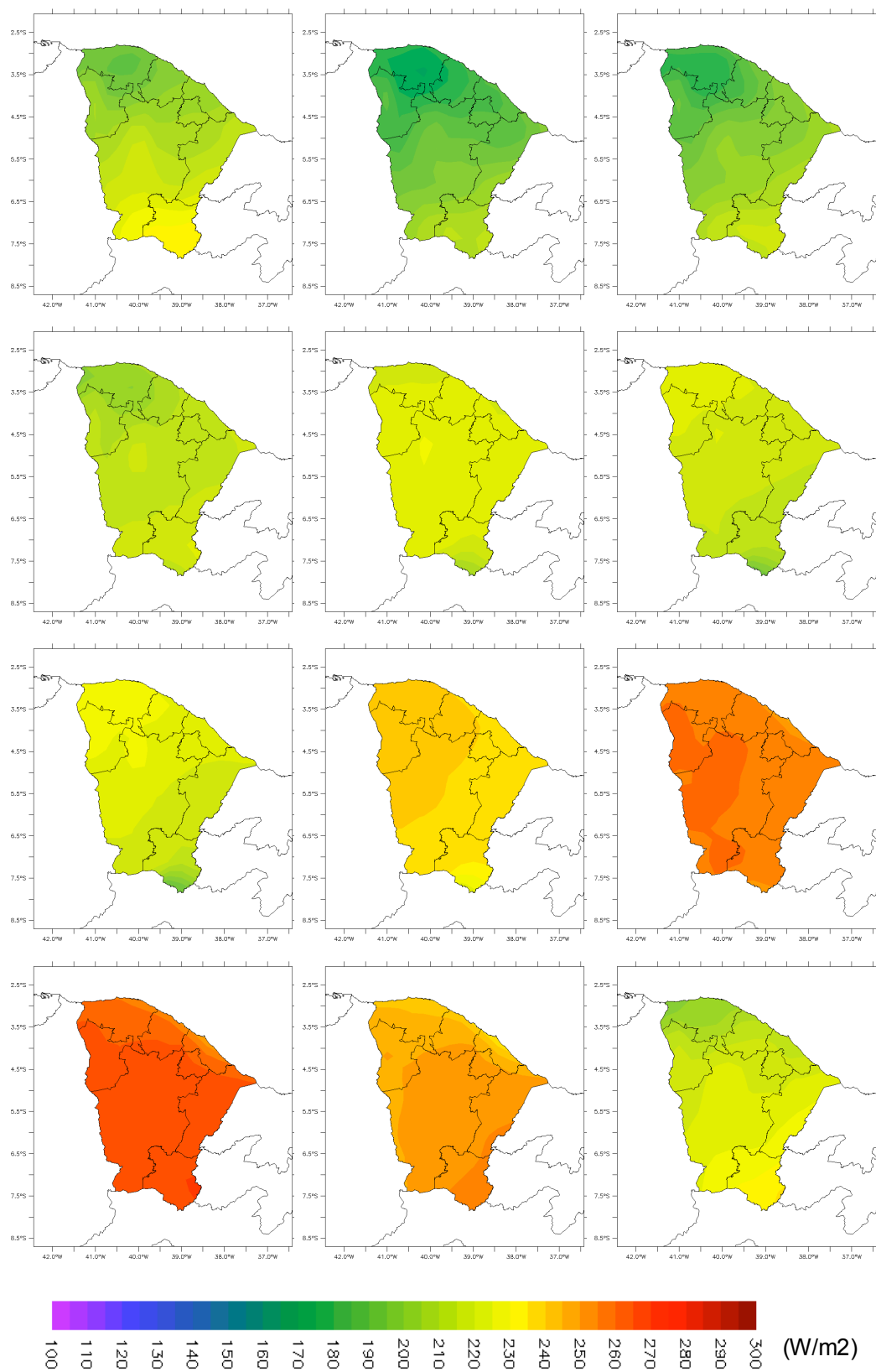


Figura 88. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2005.

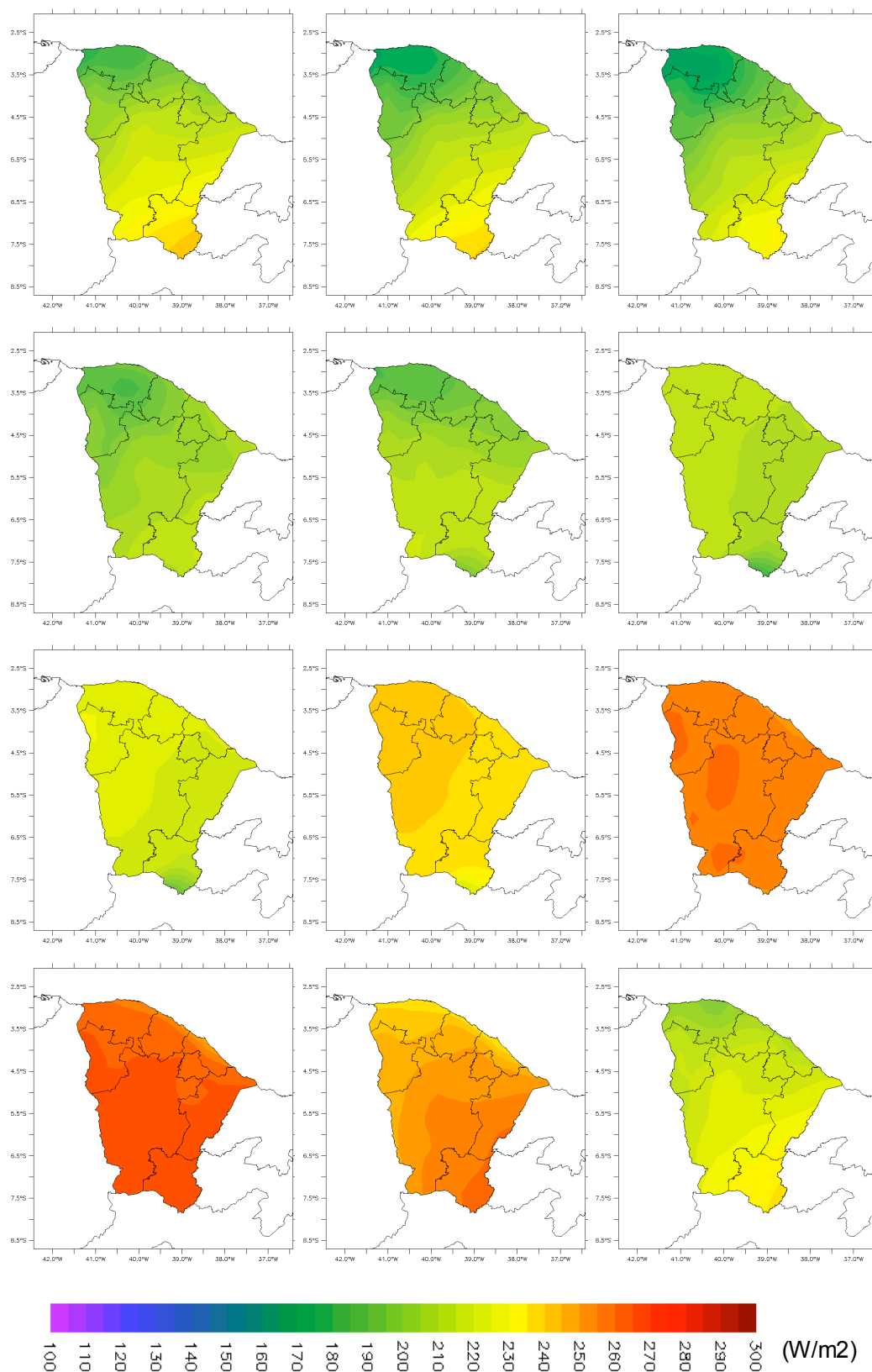


Figura 89. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2006.

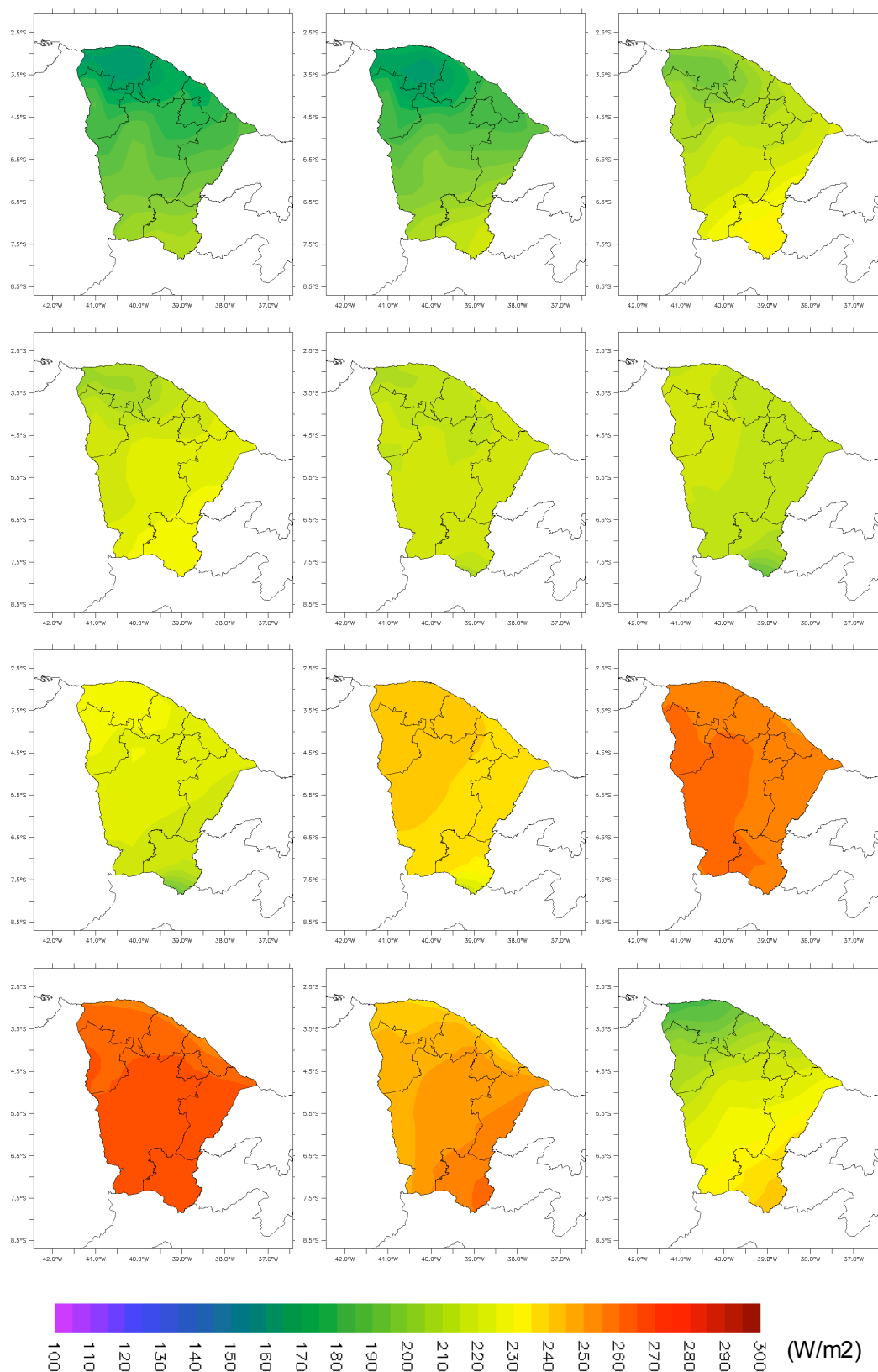


Figura 90. Média mensal da radiação solar (W/m²) para o ano de 2007.

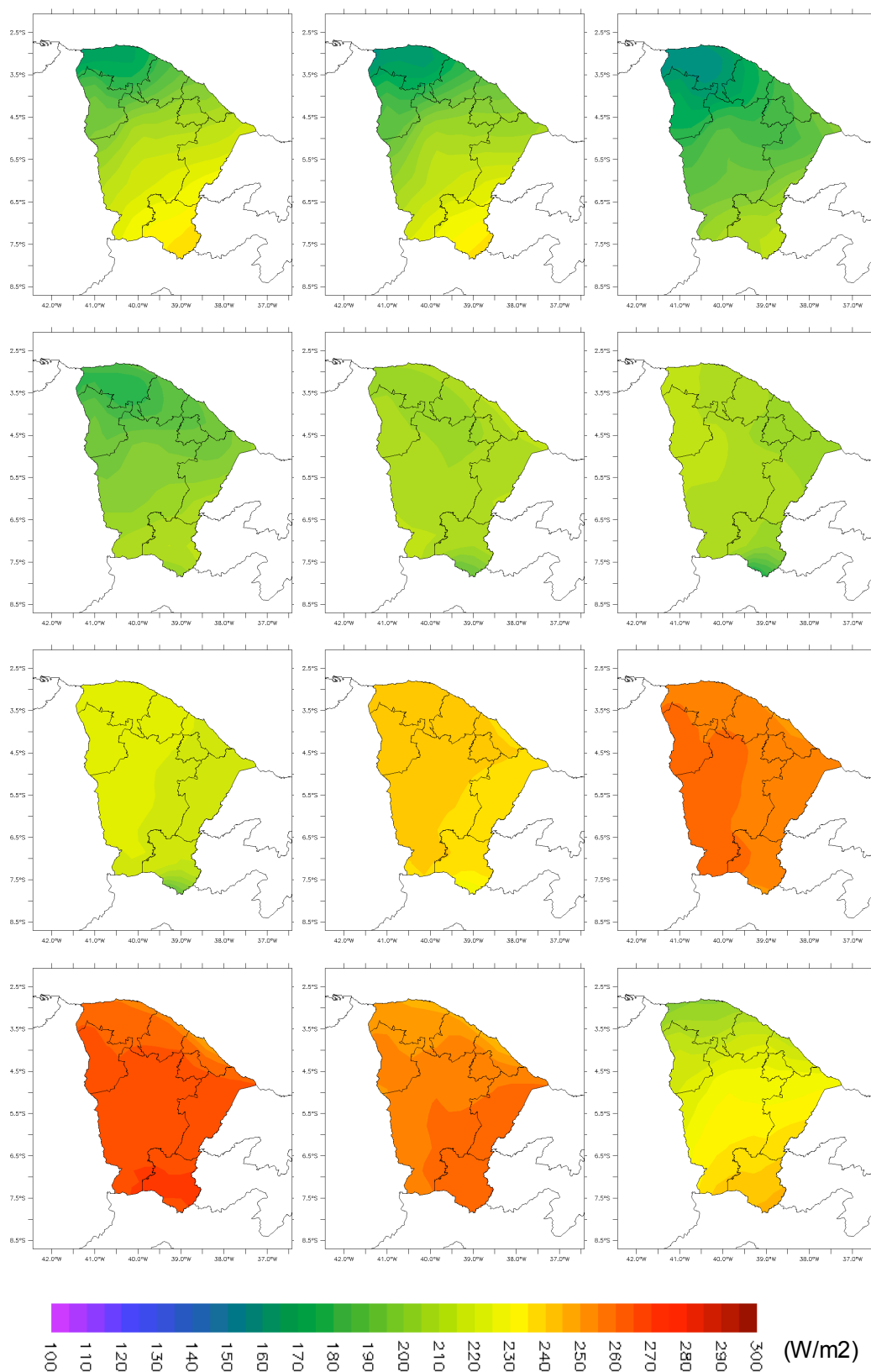


Figura 91. Média mensal da radiação solar (W/m^2) para o ano de 2008.

9. Referências Bibliográficas

Chen, C. e W.R. Cotton, 1983: A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. *Boundary-layer Meteorology*, Boston, n. 25, 289-321.

Cotton, W. R. et al., 2003: RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*. V. 82, 5-29.

Menezes Neto, O. L. de; A. A. Costa, F.P. Ramalho, 2009: Estimativa de radiação solar via modelagem atmosférica de mesoescala aplicada à região nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Meteorol.*, São Paulo, v. 24, n. 3.

Menezes Neto, O.L. de, 2007: Metodologia para estimativa de radiação solar aplicada a região nordeste de Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Ceará, 132p.



GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ

*Secretaria da Ciência, Tecnologia
e Educação Superior
Secretaria da Infraestrutura*

